بسم الله الرحمن الرحیم

POWEREN.IR

POWEREN.IR

پایداری و کنترل سیستمهای قدرت

(جلد دوم)

مؤلف : پرابها کندور

مترجمان : دکتر حسین سیفی - دکتر علی خاکی صدیق

POWEREN.IR

Kundur, Prabha

کندور، پرابها

پایداری و کنترل سیستمهای قدرت **(جلد دوم)** / مؤلف پرابها کندور؛
مترجمان حسین سیفی، علی خاکی‌صدیق. - تهران: دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر، ۱۳۷۶.
۲ ج: مصور، جدول، نمودار. - (انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۳۶، ۳۷).
شابک دوره: ۲-۰۲-۶۲۱۳-۹۶۴ **(دوره دو جلدی)** ISBN 964-6213-02-2 (2 Vol. Set)
شابک: ۴-۰۱-۶۲۱۳-۹۶۴ **(جلد دوم)** ISBN 964-6213-01-4 (Vol. 2)
فهرستنویسی براساس اطلاعات فیپا **(فهرستنویسی پیش از انتشار)**
عنوان اصلی: Power system stability and control
ترجمه جلد اول کتاب فوق توسط حسین سیفی و جلد دوم توسط علی خاکی‌صدیق می‌باشد.
واژه‌نما
کتابنامه
۱. برق - سیستمها - پایداری. ۲. برق - سیستمها - کنترل.
الف. سیفی، حسین، ۱۳۳۶ - مترجم. ب. خاکی‌صدیق، علی، ۱۳۴۱ - مترجم. ج. دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر، د. عنوان.
۲ پ ۹ک / TK ۱۰۱۰ ۶۲۱/۳۱۹
۱۳۷۶
کتابخانه ملی ایران ۳۶۰۴ - ۷۶م

عنوان:	پایداری و کنترل سیستمهای قدرت **(جلد دوم)**
مؤلف:	پرابها کندور
مترجم:	دکتر حسین سیفی - دکتر علی خاکی‌صدیق
ویراستار:	مهندس غلامعلی منتظر
طراح جلد:	محمد حمزه
ناشر:	انتشارات دانشگاه تربیت مدرس
شماره انتشار:	۳۷
شماره مسلسل:	۳۹
تاریخ انتشار:	۱۳۷۶
نوبت چاپ:	اول
تیراژ:	۲۰۰۰
حروفچینی:	ودید
لیتوگرافی:	بابک
چاپ:	ممتاز
مرکز پخش:	تهران - تقاطع بزرگراه دکتر چمران، دانشگاه تربیت مدرس - مرکز نشر - صندوق پستی ۴۸۳۴-۱۴۱۵۵
تلفن:	۸۰۰۶۶۳۴، فاکس ۸۰۰۶۵۴۴

قیمت: ۲۱۵۰۰ ریال

فهرست مطالب

پیشگفتار مترجمان
دیباچه مؤلف
پیشگفتار

بخش ۱ : زمینهٔ عمومی

فصل ۱ : مشخصه‌های عمومی سیستمهای مدرن قدرت ۱
۱-۱ پیدایش و تکامل سیستمهای قدرت ۱
۱-۲ ساختار سیستم قدرت ۵
۱-۳ کنترل سیستم قدرت ۸
۱-۴ معیارهای طراحی و بهره‌برداری برای پایداری ۱۵
منابع ۱۹

فصل ۲ : مقدمه‌ای بر مسألهٔ پایداری سیستمهای قدرت ۲۱
۲-۱ مفاهیم و تعاریف اولیه ۲۱
۲-۱-۱ پایداری زاویه‌ای روتور ۲۳
۲-۱-۲ پایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ ۳۴
۲-۱-۳ پایداری میان‌مدت و بلندمدت ۴۳
۲-۲ طبقه بندی پایداری ۴۵
۲-۳ مروری بر تاریخچهٔ مسائل پایداری ۴۷
منابع ۵۳

بخش ۲ : مشخصه‌ها و مدلسازی تجهیزات

فصل ۳ : نظریه و مدلسازی ماشینهای سنکرون ۵۵
۳-۱ شرح فیزیکی ۵۶
۳-۱-۱ ساختار آرمیچر و تحریک ۵۶

۳-۱-۲ ماشینهای سنکرون با چند زوج قطب ۶۰
۳-۱-۳ شکل امواج نیروی محرکهٔ مغناطیسی ۶۱
۳-۱-۴ محورهای طولی و عرضی ۶۶
۲ توصیف ریاضی ماشین سنکرون ۶۶
۳-۲-۱ مروری بر معادلات مدارهای مغناطیسی ۶۹
۳-۲-۲ معادلات اصلی حاکم بر ماشین سنکرون ۷۳
۳ تبدیل dq۰ ..... ۸۳
۴ نمایش در مبنای واحد ۹۲
۳-۴-۱ سیستم مبنای واحد برای کمیتهای استاتور ۹۳
۳-۴-۲ معادلات در مبنای واحد ولتاژهای استاتور ۹۴
۳-۴-۳ معادلات در مبنای واحد ولتاژهای روتور ۹۵
۳-۴-۴ معادلات شاردور استاتور ۹۶
۳-۴-۵ معادلات شاردور روتور ۹۶
۳-۴-۶ سیستم مبنای واحد برای روتور ۹۷
۳-۴-۷ توان و گشتاور مبنای واحد ۱۰۱
۳-۴-۸ سیستمهای جایگزین مبنای واحد و تبدیلات ۱۰۱
۳-۴-۹ خلاصه‌ای از معادلات در مبنای واحد ۱۰۳
۵ مدارهای معادل محورهای طولی و عرضی ۱۰۷
۶ تحلیل حالت ماندگار ۱۱۳
۳-۶-۱ روابط ولتاژ، جریان و شاردور ۱۱۴
۳-۶-۲ نمودار فازوری ۱۱۵
۳-۶-۳ زاویه روتور ۱۱۹
۳-۶-۴ مدار معادل حالت ماندگار ۱۲۰
۳-۶-۵ روش محاسبه مقادیر حالت ماندگار ۱۲۲
۷- مشخصه‌های گذرای الکتریکی ماشین سنکرون ۱۲۸
۳-۷-۱ جریان اتصال کوتاه در یک مدار ساده RL ۱۲۸
۳-۷-۲ اتصال کوتاه سه فاز در پایانه‌های یک ماشین سنکرون ۱۲۹

۳-۷-۳ حذف آفست جریان مستقیم در جریان اتصال کوتاه ۱۳۱
۳-۸ اشباع مغناطیسی ۱۳۳
۳-۸-۱ مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه ۱۳۴
۳-۸-۲ نمایش اشباع در مطالعات پایداری ۱۳۶
۳-۸-۳ مدلسازی اصلاح شدهٔ اشباع ۱۴۱
۳-۹ معادلات حرکت ۱۵۴
۳-۹-۱ مروری بر مکانیزم حرکت ۱۵۵
۳-۹-۲ معادلهٔ نوسان (تاب) ۱۵۵
۳-۹-۳ زمان شروع حرکت مکانیکی ۱۵۹
۳-۹-۴ محاسبه ثابت لختی ۱۵۹
۳-۹-۵ نمایش اجزا در مطالعات پایداری ۱۶۳
منابع ۱۶۴

فصل ۴ : پارامترهای ماشین سنکرون ۱۶۷
۴-۱ پارامترهای عملیاتی ۱۶۷
۴-۲ پارامترهای استاندارد ۱۷۲
۴-۳ مشخصه‌های پاسخ فرکانسی ۱۹۰
۴-۴ تعیین پارامترهای ماشین سنکرون ۱۹۲
منابع ۲۰۰

فصل ۵ : نمایش ماشین سنکرون در مطالعات پایداری ۲۰۳
۵-۱ ساده‌سازیهای ضروری در مطالعات سیستمهای بزرگ ۲۰۳
۵-۱-۱ چشمپوشی از عبارات ولتاژ ترانسفورمری استاتور ۲۰۳
۵-۱-۲ چشمپوشی از تأثیر تغییرات سرعت بر ولتاژهای استاتور ۲۰۸
۵-۲ مدل ساده شده با چشمپوشی از سیم‌پیچهای میراکننده ۲۱۳
۵-۳ مدل با شاردور ثابت ۲۱۷
۵-۳-۱ مدل کلاسیک ۲۱۷

۵-۳-۲ مدل با شاردور ثابت و با در نظر گرفتن تأثیر مدارهای زیرگذرا ۲۲۳
۵-۳-۳ خلاصه‌ای از مدلهای ساده شده برای بازه‌های زمانی مختلف ۲۲۵
۵-۴ حدود قابلیت تولید توان راکتیو در ماشین سنکرون ۲۲۵
۵-۴-۱ منحنی‌های قابلیت توان راکتیو ۲۲۶
۵-۴-۲ منحنیهای V و منحنیهای ترکیبی ۲۳۳
منابع ۲۳۶

فصل ۶: انتقال به صورت جریان متناوب ۲۳۷
۶-۱ خطوط انتقال ۲۳۸
۶-۱-۱ مشخصه‌های الکتریکی ۲۳۸
۶-۱-۲ معادلات عملکرد ۲۴۰
۶-۱-۳ بار امپدانس ضربه‌ای (طبیعی) ۲۴۴
۶-۱-۴ مدار معادل خط انتقال ۲۴۵
۶-۱-۵ پارامترهای نوعی ۲۴۸
۶-۱-۶ ملاحظات عملکرد خطوط انتقال فشار قوی ۲۵۰
۶-۱-۷ نمایهٔ ولتاژ و جریان در شرایط بی‌باری ۲۵۲
۶-۱-۸ مشخصه‌های ولتاژ - توان ۲۵۷
۶-۱-۹ ملاحظات مربوط به توان انتقالی و پایداری ۲۶۲
۶-۱-۱۰ تأثیر تلفات خط بر مشخصه‌های V-P و Q-P ۲۶۷
۶-۱-۱۱ حدود حرارتی ۲۶۸
۶-۱-۱۲ مشخصه‌های بارپذیری خط ۲۷۰
۶-۲ ترانسفورمرها ۲۷۳
۶-۲-۱ نمایش ترانسفورمرهای دو سیم‌پیچه ۲۷۵
۶-۲-۲ نمایش ترانسفورمرهای سه سیم‌پیچه ۲۸۵
۶-۲-۳ ترانسفورمرهای تغییردهندهٔ فاز ۲۹۱
۶-۳ انتقال توان بین منابع فعال ۲۹۵
۶-۴ تحلیل پخش بار ۳۰۱

۶-۴-۱ معادلات شبکه ۳۰۴
۶-۴-۲ روش گوس - سایدل ۳۰۶
۶-۴-۳ روش نیوتن - رافسون (NR) ۳۰۸
۶-۴-۴ روشهای پخش بار دکوپلهٔ سریع (FDLP) ۳۱۳
۶-۴-۵ مقایسه روشهای حل پخش بار ۳۱۵
۶-۴-۶ استفاده از روش مبتنی بر خاصیت پراکندگی ماتریس و تجزیه به عوامل مثلثی شکل ۳۱۷
۶-۴-۷ کاهش اندازهٔ شبکه ۳۱۸
منابع ۳۱۹

فصل ۷: بارهای سیستمهای قدرت ۳۲۱
۷-۱ مفاهیم اولیهٔ مدلسازی بار ۳۲۱
۷-۱-۱ مدلهای استاتیکی بار ۳۲۲
۷-۱-۲ مدلهای دینامیکی بار ۳۲۵
۷-۲ مدلسازی موتورهای القایی ۳۳۰
۷-۲-۱ معادلات یک موتور القایی ۳۳۱
۷-۲-۲ مشخصه‌های حالت ماندگار ۳۴۰
۷-۲-۳ ساختارهای دیگر روتور ۳۴۷
۷-۲-۴ نمایش اشباع ۳۵۱
۷-۲-۵ نمایش در مبنای واحد ۳۵۲
۷-۲-۶ نمایش در مطالعات پایداری ۳۵۶
۷-۳ مدل موتور سنکرون ۳۶۲
۷-۴ به دست آوردن پارامترهای مدل بار ۳۶۲
۷-۴-۱ روش مبتنی بر آزمایش ۳۶۲
۷-۴-۲ روش مبتنی بر مشخصهٔ مؤلفه‌های تشکیل دهندهٔ بار ۳۶۵
۷-۴-۳ مشخصه‌های نوعی بار ۳۶۶
منابع ۳۷۰

فصل ۸: سیستمهای تحریک ۳۷۳
۸-۱ نکات مربوط به سیستم تحریک ۳۷۳
۸-۲ اجزاء سیستم تحریک ۳۷۶
۸-۳ انواع سیستم تحریک ۳۷۷
۸-۳-۱ سیستمهای تحریک جریان مستقیم ۳۷۸
۸-۳-۲ سیستمهای تحریک جریان متناوب ۳۸۰
۸-۳-۳ سیستمهای تحریک استاتیکی ۳۸۴
۸-۳-۴ پیشرفتهای اخیر و جهت‌گیری آینده ۳۸۸
۸-۴ معیارهای عملکرد دینامیکی ۳۸۹
۸-۴-۱ معیارهای عملکرد سیگنال بزرگ ۳۸۹
۸-۴-۲ معیارهای عملکرد سیگنال کوچک ۳۹۲
۸-۵ توابع کنترلی و حفاظتی ۳۹۷
۸-۵-۱ تنظیم‌کننده‌های جریان متناوب و مستقیم ۳۹۸
۸-۵-۲ مدارهای پایدارساز سیستم تحریک ۳۹۸
۸-۵-۳ پایدارساز سیستم قدرت (PSS) ۳۹۹
۸-۵-۴ جبرانگر بار ۴۰۰
۸-۵-۵ محدودکنندهٔ زیرتحریک ۴۰۲
۸-۵-۶ محدودکنندهٔ فوق تحریک ۴۰۴
۸-۵-۷ محدودکننده و حفاظت ولت بر هرتز ۴۰۶
۸-۵-۸ مدارهای اتصال کوتاه‌کنندهٔ تحریک ۴۰۷
۸-۶ مدلسازی سیستمهای تحریک ۴۰۹
۸-۶-۱ سیستم مبنای واحد ۴۱۰
۸-۶-۲ مدلسازی اجزای سیستم تحریک ۴۱۷
۸-۶-۳ مدل سیستمهای تحریک کامل ۴۳۵
۸-۶-۴ آزمایش میدان برای به دست آوردن و تأیید صحت مدل ۴۴۸
منابع ۴۴۹

فصل ۹ : محرکه‌ها(توربینها) و سیستمهای تغذیه انرژی ۴۵۳
۹-۱ توربینهای آبی و سیستمهای گاورنر ۴۵۴
۹-۱-۱ تابع تبدیل توربین آبی ۴۵۶
۹-۱-۲ مدل غیرخطی توربین با فرض غیرقابل ارتجاع بودن ستون آب ۴۶۵
۹-۱-۳ گاورنر توربینهای آبی ۴۷۲
۹-۱-۴ مدل مشروح سیستم هیدرولیکی ۴۸۶
۹-۱-۵ راهنمایی برای مدلسازی توربینهای آبی ۵۰۰
۹-۲ توربینهای بخار و سیستمهای گاورنر ۵۰۱
۹-۲-۱ مدلسازی توربینهای بخار ۵۰۷
۹-۲-۲ کنترلهای توربین بخار ۵۱۹
۹-۲-۳ قابلیت عملکرد توربین بخار خارج از فرکانس معمول ۵۳۶
۹-۳ سیستمهای انرژی حرارتی ۵۴۳
۹-۳-۱ سیستمهای انرژی با سوخت فسیلی ۵۴۳
۹-۳-۲ سیستمهای انرژی مبنا هسته‌ای ۵۵۱
۹-۳-۳ مدلسازی سیستمهای انرژی حرارتی ۵۵۸
منابع ۵۵۹

فصل ۱۰ : انتقال به صورت جریان مستقیم فشار قوی ۵۶۳
۱۰-۱ ساختارها و اجزای سیستم HVDC ۵۶۴
۱۰-۱-۱ طبقه‌بندی خطوط HVDC ۵۶۴
۱۰-۱-۲ اجزای سیستم انتقال HVDC ۵۶۸
۱۰-۲ نظریه و معادلات عملکرد کنورتور ۵۷۱
۱۰-۲-۱ مشخصه‌های شیر ۵۷۱
۱۰-۲-۲ مدارهای کنورتور ۵۷۳
۱۰-۲-۳ ظرفیت ترانسفورمر کنورتور ۶۰۰
۱۰-۲-۴ کنورتورهای چند پُله ۶۰۱
۱۰-۳ عملکرد غیرعادی ۶۰۶

۱۰-۳-۱ حالت معکوس هدایتی (آتش بی‌موقع) ۶۰۶
۱۰-۳-۲ نقص کموتاسیون ۶۰۸
۱۰-۴ کنترل سیستمهای جریان مستقیم فشار قوی HVDC ۶۱۰
۱۰-۴-۱ اصول اساسی کنترل ۶۱۰
۱۰-۴-۲ پیاده‌سازی کنترل ۶۲۸
۱۰-۴-۳ سیستمهای کنترل آتش کنورتور ۶۳۰
۱۰-۴-۴ بستن و کنارگذری شیر ۶۳۷
۱۰-۴-۵ راه‌اندازی، توقف و معکوس کردن جهت انتقال توان ۶۳۸
۱۰-۴-۶ کنترلهای موجود در تقویت عملکرد سیستم جریان متناوب ۶۴۱
۱۰-۵ هارمونیکها و فیلترها ۶۴۲
۱۰-۵-۱ هارمونیکهای طرف جریان متناوب ۶۴۳
۱۰-۵-۲ هارمونیکهای طرف جریان مستقیم ۶۴۶
۱۰-۶ اثر قدرت سیستم جریان متناوب برتأثیر متقابل بین سیستم جریان
متناوب و جریان مستقیم ۶۴۸
۱۰-۶-۱ نسبت اتصال کوتاه ۶۴۸
۱۰-۶-۲ توان راکتیو و قدرت سیستم جریان متناوب ۶۴۹
۱۰-۶-۳ مسائل مربوط به سیستمهای با ESCR کم ۶۵۰
۱۰-۶-۴ راه‌حلهای مسائل مربوط به سیستمهای ضعیف ۶۵۲
۱۰-۶-۵ ثابت لختی موثر ۶۵۳
۱۰-۶-۶ کموتاسیون اجباری ۶۵۴
۱۰-۷ پاسخ به خطاهای سیستم جریان متناوب و جریان مستقیم ۶۵۵
۱۰-۷-۱ خطاهای خط جریان مستقیم ۶۵۶
۱۰-۷-۲ خطاهای کنورتور ۶۵۸
۱۰-۷-۳ خطاهای سیستم جریان متناوب ۶۵۸
۱۰-۸ سیستمهای چند پایانه‌ای HVDC ۶۶۳
۱۰-۸-۱ ساختارهای شبکهٔ MTDC ۶۶۳
۱۰-۸-۲ کنترل سیستمهای MTDC ۶۶۶

۱۰-۹ مدلسازی سیستمهای HVDC ۶۷۰
۱۰-۹-۱ نمایش برای حل پخش بار ۶۷۱
۱۰-۹-۲ سیستم مبنای واحد برای کمیتهای جریان مستقیم ۶۹۴
۱۰-۹-۳ نمایش در مطالعات پایداری ۶۹۶
منابع ۷۱۰

فصل ۱۱ : کنترل توان حقیقی و توان راکتیو ۷۱۵
۱۱-۱ توان حقیقی و کنترل فرکانس ۷۱۵
۱۱-۱-۱ اصول اساسی کنترل سرعت ۷۱۶
۱۱-۱-۲ کنترل خروجی توان واحد تولیدی ۷۲۸
۱۱-۱-۳ مشخصهٔ ترکیبی تنظیم سیستمهای قدرت ۷۳۲
۱۱-۱-۴ آهنگ پاسخ سیستمهای گاورنر توربین ۷۳۵
۱۱-۱-۵ اصول کنترل خودکار تولید (AGC) ۷۳۹
۱۱-۱-۶ پیاده‌سازی AGC ۷۵۸
۱۱-۱-۷ بارزدایی کمبود فرکانس ۷۶۶
۱۱-۲ کنترل توان راکتیو و ولتاژ ۷۷۱
۱۱-۲-۱ تولید و جذب توان راکتیو ۷۷۲
۱۱-۲-۲ روشهای کنترل ولتاژ ۷۷۳
۱۱-۲-۳ راکتورهای شنت ۷۷۴
۱۱-۲-۴ خازنهای شنت ۷۷۷
۱۱-۲-۵ خازنهای سری ۷۸۰
۱۱-۲-۶ کندانسورهای سنکرون ۷۸۶
۱۱-۲-۷ سیستمهای استاتیکی توان راکتیو ۷۸۷
۱۱-۲-۸ اصول جبرانسازی سیستم انتقال ۸۰۷
۱۱-۲-۹ مدلسازی وسایل جبرانسازی راکتیو ۸۲۷
۱۱-۲-۱۰ کاربرد ترانسفورمرهای تغییردهندهٔ تپ به سیستمهای انتقال ۸۳۵
۱۱-۲-۱۱ تنظیم ولتاژ سیستم توزیع ۸۳۸

۱۱-۲-۱۲ مدلسازی سیستمهای کنترل ULTC ترانسفورمر ۸۴۳
۱۱-۳ روشهای تحلیل پخش بار ۸۴۷
۱۱-۳-۱ پخش بار قبل از خطا ۸۴۹
۱۱-۳-۲ پخش بار بعد از خطا ۸۴۹
منابع ۸۵۲
واژه‌نامه ۸۵۷
واژه‌نما ۸۶۸

بخش ۳: پایداری سیستم: جنبه‌های فیزیکی، تحلیل و بهبود

فصل ۱۲: پایداری سیگنال ـ کوچک ۸۸۵
۱۲-۱ مفاهیم اساسی پایداری سیستمهای دینامیکی ۸۸۶
۱۲-۱-۱ نمایش فضای حالت ۸۸۶
۱۲-۱-۲ پایداری سیستم دینامیکی ۸۸۸
۱۲-۱-۳ خطی‌سازی ۸۸۹
۱۲-۱-۴ تحلیل پایداری ۸۹۳
۱۲-۲ خواص ویژهٔ ماتریس حالت ۸۹۴
۱۲-۲-۱ مقادیر ویژه ۸۹۴
۱۲-۲-۲ بردارهای ویژه ۸۹۵
۱۲-۲-۳ ماتریسهای مُدال ۸۹۶
۱۲-۲-۴ حرکت آزاد سیستم دینامیکی ۸۹۶
۱۲-۲-۵ شکل مُد، حساسیت، و عامل مشارکت ۹۰۰
۱۲-۲-۶ کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری ۹۰۴
۱۲-۲-۷ مفهوم فرکانس مختلط ۹۰۵
۱۲-۲-۸ روابط بین خواص ویژه و توابع تبدیل ۹۰۷
۱۲-۲-۹ محاسبهٔ مقادیر ویژه ۹۱۵
۱۲-۳ پایداری سیگنال کوچک یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت ۹۱۶
۱۲-۳-۱ ژنراتور نمایش داده شده با مدل کلاسیک ۹۱۷

۱۲-۳-۲ اثر دینامیکهای مدار تحریک ماشین سنکرون ۹۲۷
۱۲-۴ اثر سیستم تحریک ۹۴۸
۱۲-۵ پایدارساز سیستم قدرت ۹۵۷
۱۲-۶ ماتریس حالت سیستم با سیم‌پیچ میراکننده ۹۷۳
۱۲-۷ پایداری سیگنال کوچک سیستمهای چندماشینه ۹۸۳
۱۲-۸ روشهای خاص در تحلیل سیستمهای بسیار بزرگ ۹۹۱
۱۲-۹ مشخصه‌های مسائل پایداریِ سیگنال کوچک ۱۰۱۰
منابع ۱۰۱۷

فصل ۱۳ : پایداری گذرا ۱۰۲۱
۱۳-۱ دیدی مقدماتی از پایداری گذرا [۱ - ۳] ۱۰۲۱
۱۳-۲ روشهای انتگرالگیری عددی [۴ - ۶] ۱۰۳۱
۱۳-۲-۱ روش اویلر ۱۰۳۱
۱۳-۲-۲ روش اویلر اصلاح شدهٔ ۱۰۳۳
۱۳-۲-۳ روشهای رانگ ـ کوتا (R-K) [۴ و ۵] ۱۰۳۴
۱۳-۲-۴ پایداری عددی روشهای انتگرالگیری صریح ۱۰۳۷
۱۳-۲-۵ روشهای انتگرالگیری ضمنی ۱۰۳۷
۱۳-۳ شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سیستم قدرت ۱۰۴۴
۱۳-۳-۱ ساختار مدل سیستم قدرت ۱۰۴۴
۱۳-۳-۲ نمایش ماشین سنکرون ۱۰۴۶
۱۳-۳-۳ نمایش سیستم تحریک ۱۰۵۲
۱۳-۳-۴ نمایش شبکهٔ انتقال و بار ۱۰۵۴
۱۳-۳-۵ معادلات کلی سیستم ۱۰۵۶
۱۳-۳-۶ پاسخ معادلات کلی سیستم ۱۰۵۸
۱۳-۴ تحلیل خطاهای نامتعادل ۱۰۷۰
۱۳-۴-۱ مقدمه‌ای بر مؤلفه‌های متقارن [۱۵ - ۱۸] ۱۰۷۰
۱۳-۴-۲ امپدانسهای توالی ماشینهای سنکرون [۱۵] ۱۰۷۵

۱۳-۴-۳ امپدانسهای توالی خطوط انتقال ۱۰۸۳
۱۳-۴-۴ امپدانسهای توالی ترانسفورمرها ۱۰۸۳
۱۳-۴-۵ شبیه‌سازی انواع مختلف خطا ۱۰۸۶
۱۳-۴-۶ نمایش شرایط هادی-باز ۱۰۹۸
۱۳-۵ عملکرد رله‌های حفاظتی ۱۱۰۳
۱۳-۵-۱ حفاظت خط انتقال [۲۱ - ۲۳] ۱۱۰۳
۱۳-۵-۲ زمانهای رفع خطا ۱۱۱۳
۱۳-۵-۳ کمیتهای رله‌ای حین نوسان ۱۱۱۶
۱۳-۵-۴ ارزیابی عملکرد رلهٔ دیستانس حین نوسان ۱۱۲۱
۱۳-۵-۵ جلوگیری از عمل، حین شرایط گذرا ۱۱۲۲
۱۳-۵-۶ بازبست خودکار خط ۱۱۲۵
۱۳-۵-۷ حفاظت عدم همگامی ژنراتور ۱۱۲۶
۱۳-۵-۸ حفاظت فقدان تحریک ۱۱۳۱
۱۳-۶ مطالعهٔ موردی پایداری گذرای یک سیستم بزرگ ۱۱۳۸
۱۳-۷ روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا ۱۱۴۶
۱۳-۷-۱ توصیف روش تابع انرژی گذرا ۱۱۴۶
۱۳-۷-۲ تحلیل سیستمهای عملی قدرت [۴۰ - ۴۹] ۱۱۵۱
۱۳-۷-۳ محدودیتهای روشهای مستقیم ۱۱۵۹
منابع ۱۱۶۱

فصل ۱۴ : پایداری ولتاژ ۱۱۶۷
۱۴-۱ مفاهیم اساسیِ مربوط به پایداری ولتاژ ۱۱۶۸
۱۴-۱-۱ مشخصه‌های سیستم انتقال ۱۱۶۸
۱۴-۱-۲ مشخصه‌های ژنراتور ۱۱۷۴
۱۴-۱-۳ مشخصه‌های بار [۱ ، ۵] ۱۱۷۷
۱۴-۱-۴ مشخصه‌های وسایل جبرانسازی راکتیو ۱۱۷۹
۱۴-۲ فروپاشی ولتاژ ۱۱۸۳

۱۴-۲-۱ طرح نوعی از فروپاشی ولتاژ ۱۱۸۳
۱۴-۲-۲ مشخص سازی کلی براساس رویدادهای واقعی ۱۱۸۴
۱۴-۲-۳ دسته‌بندی پایداری ولتاژ ۱۱۸۶
۱۴-۳ تحلیل پایداری ولتاژ ۱۱۸۶
۱۴-۳-۱ ملاحظات مدلسازی ۱۱۸۷
۱۴-۳-۲ تحلیل دینامیکی ۱۱۸۸
۱۴-۳-۳ تحلیل استاتیکی ۱۲۰۱
۱۴-۳-۴ تعیین کوتاهترین فاصله تا ناپایداری ۱۲۲۰
۱۴-۳-۵ تحلیل پخش بار تداومی ۱۲۲۶
۱۴-۴ جلوگیری از فروپاشی ولتاژ ۱۲۳۳
۱۴-۴-۱ معیارهای طراحی سیستم ۱۲۳۴
۱۴-۴-۲ معیارهای بهره‌برداری از سیستم ۱۲۳۶
منابع ۱۲۳۷

فصل ۱۵ : نوسانهای زیر سنکرون ۱۲۴۱
۱۵-۱ مشخصه‌های پیچشی توربین - ژنراتور ۱۲۴۲
۱۵-۱-۱ مدل سیستم محور [۱ - ۶] ۱۲۴۲
۱۵-۱-۲ فرکانسهای طبیعی پیچشی و صورتهای مُد ۱۲۵۰
۱۵-۲ تداخل پیچشی با کنترلهای سیستم قدرت ۱۲۵۷
۱۵-۲-۱ تداخل با کنترلهای تحریک ژنراتور ۱۲۵۷
۱۵-۲-۲ تداخل با گاورنرهای سرعت ۱۲۶۶
۱۵-۲-۳ تداخل با کنورتورهای جریان مستقیم نزدیک ۱۲۶۶
۱۵-۳ تشدید زیر سنکرون ۱۲۷۰
۱۵-۳-۱ مشخصه‌های سیستمهای انتقالِ جبران شده ۱۲۷۰
با خازن سری [۱۶ و ۱۵]
۱۵-۳-۲ خود تحریکی ناشی از اثر ژنراتور القایی ۱۲۷۲
۱۵-۳-۳ تداخل پیچشی منجر به SSR ۱۲۷۳

۱۵-۳-۴ روشهای تحلیلی ۱۲۷۴
۱۵-۳-۵ روشهای مواجهه با مسائل SSR..... ۱۲۸۰
۱۵-۴ اثر اغتشاشهای حاصل از کلیدزنی شبکه..... ۱۲۸۱
۱۵-۵ تداخل پیچشی بین واحدهایی که به طور تنگاتنگ به هم تزویج شده‌اند.... ۱۲۸۶
۱۵-۶ مشخصه‌های پیچشی ژنراتور آبی..... ۱۲۸۹
منابع..... ۱۲۸۹

فصل ۱۶ : پایداری میان مدت و بلند مدت..... ۱۲۹۵
۱۶-۱ ماهیت پاسخ سیستم به آشفتگیهای شدید ۱۲۹۵
۱۶-۲ تفاوت بین پایداری میان مدت و بلند مدت..... ۱۳۰۰
۱۶-۳ پاسخ نیروگاه حین آشفتگیهای شدید ۱۳۰۲
۱۶-۳-۱ نیروگاههای حرارتی ۱۳۰۲
۱۶-۳-۲ نیروگاههای آبی ۱۳۰۴
۱۶-۴ شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی بلند مدت ۱۳۰۹
۱۶-۴-۱ هدف از شبیه‌سازیهای دینامیکی بلند مدت ۱۳۰۹
۱۶-۴-۲ ملاحظات مدلسازی ۱۳۰۹
۱۶-۴-۳ روشهای انتگرالگیریِ عددی..... ۱۳۱۰
۱۶-۵ مطالعات موردی دربارهٔ آشفتگیهای شدید سیستم ۱۳۱۱
۱۶-۵-۱ مطالعهٔ موردی راجع به پارهٔ پُر تولید ۱۳۱۲
۱۶-۵-۲ مطالعهٔ موردی شامل یک پارهٔ کم‌تولید..... ۱۳۱۶
منابع..... ۱۳۲۴

فصل ۱۷ : روشهای بهبود پایداری..... ۱۳۲۹
۱۷-۱ تقویت پایداری گذرا..... ۱۳۳۰
۱۷-۱-۱ رفع خطا با سرعت زیاد ۱۳۳۰
۱۷-۱-۲ کاهش راکتانس سیستم انتقال ۱۳۳۰
۱۷-۱-۳ جبرانسازی قابل تنظیم شنت..... ۱۳۳۲

هیجده

۱۷-۱-۴ بازدارندهٔ دینامیکی [۶-۱۰] ۱۳۳۲
۱۷-۱-۵ کلیدزنی راکتورا ۱۳۳۳
۱۷-۱-۶ کار مستقل از قطب کلیدها ۱۳۳۳
۱۷-۱-۷ کلیدزنیِ تک قطبی ۱۳۳۴
۱۷-۱-۸ باز و بست سریع شیر توربین بخار ۱۳۳۸
۱۷-۱-۹ خارج کردن ژنراتور ۱۳۴۷
۱۷-۱-۱۰ جداسازی کنترل شدهٔ سیستم و بارزدایی ۱۳۵۰
۱۷-۱-۱۱ سیستمهای تحریک با سرعت زیاد ۱۳۵۲
۱۷-۱-۱۲ کنترل تحریک ناپیوسته [۴۰] ۱۳۵۳
۱۷-۱-۱۳ کنترل خطوط انتقال HVDC ۱۳۵۸
۱۷-۲ تقویت پایداری سیگنال کوچک ۱۳۵۹
۱۷-۲-۱ پایدارسازهای سیستم قدرت ۱۳۵۹
۱۷-۲-۲ کنترل تکمیلی جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو ۱۳۷۵
۱۷-۲-۳ کنترل تکمیلیِ خطوط انتقال HVDC ۱۳۸۵
منابع ۱۳۹۶
واژه‌نامه ۱۴۰۳
واژه‌نما ۱۴۰۹

POWEREN.IR

بخش ۳: پایداری سیستم: جنبه‌های فیزیکی، تحلیل و بهبود

فصل دوازدهم

پایداری سیگنال ـ کوچک

فصل دوم مقدمه‌ای کلی بر پایداری سیستم قدرت، شامل مفاهیم اولیه، دسته‌بندی، و تعاریف عبارات مربوطه را ارائه کرد. اکنون طبقه‌بندیهای مختلف پایداری سیستم را، با شروع این فصل بر روی پایداری سیگنال ـ کوچک، به تفصیل بررسی خواهیم کرد. از این‌رو اطلاعات مربوط به مشخصه‌ها و مدلسازی اجزای جزئی سیستم که در فصلهای سوم تا یازدهم ارائه گردید، بسیار مفید خواهد بود.

همچنانکه در فصل دوم تعریف شد، پایداری سیگنال ـ کوچک، توانایی سیستم قدرت در نگهداری سنکرونیزم است هنگامی که تحت اغتشاشهای کوچک قرار گیرد. در این مفهوم، اغتشاش، کوچک درنظر گرفته می‌شود اگر بتوان به منظور تحلیل سیستم، معادلاتی که پاسخ حاصل از سیستم را توصیف می‌کنند، خطی کرد. ناپایداری نیز می‌تواند به دو صورت ظاهر شود: ۱) افزایش ماندگار[1] در زاویهٔ روتور ژنراتور ناشی از فقدان گشتاور سنکرون‌کننده، ۲) نوسان روتور با دامنهٔ افزایشی ناشی از فقدان گشتاور میراکنندهٔ کافی. در سیستمهای قدرت موجود، مسألهٔ ناپایداری سیگنال ـ کوچک معمولاً ناشی از میرایی غیرکافی نوسانهای سیستم می‌باشد. تحلیل پایداری سیگنال ـ کوچک با بکارگیری روشهای خطی اطلاعات ارزشمندی را در خصوص مشخصه‌های دینامیکی ذاتی سیستم قدرت فراهم می‌کند که در طراحی سیستم بسیار مفید است.

این فصل جنبه‌های اساسی پایداری سیستمهای دینامیکی را مرور کرده، روشهای تحلیلی سودمندی را در مطالعهٔ پایداری سیگنال ـ کوچک ارائه می‌کند، پس از نشان دادن مشخصه‌های

---

1. Steady Increase

مسائل پایداری سیگنال – کوچک، عوامل مؤثر بر آنها را شناسایی خواهد کرد.

۱۲ ـ ۱ مفاهیم اساسی پایداری سیستمهای دینامیکی

۱۲ ـ ۱ ـ ۱ نمایش فضای حالت

رفتار هر سیستم دینامیکی، مانند سیستم قدرت را می‌توان به کمک مجموعه‌ای از n معادلهٔ دیفرانسیل معمولی به صورت زیر توصیف کرد:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad i = 1, 2, \dots, n \qquad (۱ - ۱۲)$$

که در آن n، مرتبهٔ سیستم و r تعداد ورودیها است. این معادله را می‌توان با استفاده از نمایش بردار ماتریسی به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \qquad (۲ - ۱۲)$$

که در آن داریم:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \qquad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{pmatrix} \qquad \mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}$$

بردار ستونی $\mathbf{x}$، *بردار حالت*[1]، و عناصر آن x_i، *متغیرهای حالت*[2] نامیده می‌شوند. بردار ستونی $\mathbf{u}$ بردار ورودیهای سیستم است که سیگنالهای خارجی هستند که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. زمان با t و مشتق زمانی متغیر حالت با $\dot{x}$ نشان داده می‌شوند. اگر مشتقات متغیرهای حالت توابع صریحی[3] از زمان نباشند، سیستم را *خودگردان*[4] گویند. در این حالت، معادلهٔ ۱۲ ـ ۲ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \qquad (۳ - ۱۲)$$

معمولاً ما به آن دسته از متغیرهای سیستم به عنوان متغیرهای خروجی علاقه‌مندیم که بتوان آنها را از روی سیستم مشاهده کرد. این متغیرها را می‌توان برحسب متغیرهای حالت و ورودی به صورت زیر بیان کرد:

1. State Vector 2. State Variables 3. Explicit 4. Autonomous

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \qquad (۴ - ۱۲)$$

که در آن:

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} \qquad \mathbf{g} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{pmatrix}$$

بردار ستونی $\mathbf{y}$ بردار خروجیها، و $\mathbf{g}$ بردار توابع غیرخطی است که متغیرهای حالت و ورودی را به متغیرهای خروجی مرتبط می‌سازد.

مفهوم حالت

مفهوم حالت در روش فضای حالت یک مفهوم اساسی است. حالت یک سیستم نشان‌دهندهٔ مقدار حداقل اطلاعاتی در بارهٔ سیستم در هر لحظهٔ زمان (t_0) است که لازم است تا به کمک آن بتوان رفتار آیندهٔ آن‌را بدون مراجعه به ورودی قبل از t_0 تعیین کرد.

می‌توان از هر مجموعه از n متغیر مستقل خطی سیستم برای توصیف حالت سیستم استفاده کرد. این متغیرها متغیرهای *حالت* نامیده می‌شوند که مجموعهٔ حداقلی از متغیرهای دینامیکی را تشکیل می‌دهند و همراه با ورودیهای سیستم، توصیفی کامل از رفتار سیستم را فراهم می‌آورند. متغیرهای دیگر سیستم را می‌توان از اطلاعات حالت مشخص کرد.

متغیرهای حالت ممکن است کمیتهای فیزیکیِ سیستم مانند: زاویه، سرعت، ولتاژ باشند و ممکن است فقط متغیرهای ریاضی مجرد، متناظر با معادلات دیفرانسیل توصیف کنندهٔ دینامیک سیستم باشند. انتخاب متغیرهای حالت منحصربفرد نمی‌باشد. این بدان معنا نیست که حالت سیستم در هر زمان منحصربفرد نیست بلکه بدین مفهوم است که نمایش اطلاعات حالت منحصربفرد نمی‌باشد. هر مجموعه از متغیرهای حالت را که انتخاب کنیم، اطلاعات یکسانی دربارهٔ سیستم فراهم خواهند کرد. اگر سیستم را با تعداد متغیر حالتی بیش از مرتبهٔ سیستم توصیف کنیم، همهٔ آنها مستقل نخواهند بود.

حالت سیستم را می‌توان در یک فضای اقلیدسی n ـ بعدی به نام *فضای حالت*[1] نمایش داد. هنگامی که از مجموعهٔ متفاوت دیگری از متغیرهای حالت برای توصیف سیستم استفاده

1. State Space

می‌کنیم، در واقع یک سیستم مختصات متفاوت را انتخاب کرده‌ایم.

اگر سیستم در حالت تعادل نباشد و یا ورودی آن غیر صفر باشد، حالت سیستم با زمان تغییر می‌کند. مجموعه نقاطی را که به وسیلهٔ حالت سیستم به هنگام حرکت سیستم در فضای حالت رسم می‌شوند، *مسیر حالت*[1] می‌نامند.

نقاط تعادل (یا منفرد)

نقاط تعادل نقاطی هستند که در آن نقاط، کلیهٔ مشتقاتِ $\dot{x}_1$ و $\dot{x}_2$ و ... و $\dot{x}_n$ همزمان صفر شوند این نقاط، مکانهایی با سرعت صفر را بروی مسیر تعریف می‌کنند. بنابراین سیستم در حالت استراحت است زیرا کلیهٔ متغیرها ثابت و تغییر ناپذیر با زمان هستند.

بنابراین نقطهٔ منفرد یا تعادل، باید معادله زیر را برآورده سازد:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_0) = 0 \qquad (۵-۱۲)$$

که در آن $\mathbf{x}_0$ بردار حالت $\mathbf{x}$ در نقطهٔ تعادل است.

اگر توابع f_i $(i = 1, 2, \ldots, n)$ در معادلهٔ ۱۲ ـ ۳ خطی باشند، سیستم، خطی است. سیستم خطی تنها یک نقطهٔ تعادل دارد (اگر ماتریس سیستم غیر منفرد باشد). اما یک سیستم غیر خطی ممکن است بیش از یک نقطهٔ تعادل داشته باشد.

نقاط منفرد بخوبی مشخصهٔ رفتار سیستم دینامیکی را بیان می‌کنند، و بنابراین می‌توانیم دربارهٔ پایداری سیستم از ماهیت این نقاط نتایجی را به دست آوریم.

۱۲ ـ ۱ ـ ۲ پایداری سیستم دینامیکی

پایداری سیستم خطی، کاملاً از ورودی مستقل است و حالت یک سیستم پایدار با ورودی صفر، همواره مستقل از حالت اولیهٔ کراندار، به مبدأ فضای حالت باز خواهد گشت.

برخلاف سیستم خطی، پایداری سیستم غیر خطی به نوع و اندازهٔ ورودی، و حالت اولیه، بستگی دارد و باید این عوامل را در تعریف پایداری سیستم غیر خطی در نظر داشت.

در نظریهٔ سیستمهای کنترل، مرسوم است که پایداری سیستم غیر خطی را به صورت زیر، بسته به ناحیهٔ فضای حالت که در آن بردار حالت تغییر می‌کند، دسته‌بندی کنند:

- پایداری محلی یا پایداری در جزء؛

1. State Trajectory

- پایداری محدود؛
- پایداری جامع یا پایداری در کل.

پایداری محلی

سیستم را حول نقطهٔ تعادل *پایدار محلی*[1] گویند اگر هنگامی که تحت اغتشاشهایی کوچک قرار گیرد، در داخل ناحیه‌ای کوچک حول نقطهٔ تعادل باقی بماند. اگر با افزایش t، سیستم به حالت اولیه باز گردد، آن را *پایدار مجانبی*[2] در جزء گویند.

باید توجه شود که در تعریف کلی پایداری محلی، به بازگشت حالت به حالت اولیه الزامی نیست و بنابراین، چرخه‌های حدی کوچک را نیز شامل می‌شود. در عمل معمولاً به پایداری مجانبی علاقه‌مند هستیم.

شروط پایداری محلی (به عبارت دیگر، پایداری تحت اغتشاش کوچک) را می‌توان با خطی‌سازی معادلات غیر خطی سیستم حول نقطهٔ تعادل مورد نظر مطالعه کرد. این مطلب در بخش بعدی نشان داده شده است.

پایداری محدود[3]

اگر حالت سیستمی درون یک ناحیهٔ محدود R باقی بماند، آن را پایدار در داخل R نامند. اگر، علاوه بر آن حالت سیستم از هر نقطهٔ داخل R، به نقطهٔ تعادل اولیه باز گردد، پایدار مجانبی در داخل ناحیهٔ محدود R خواهد بود.

پایداری جامع

سیستم را پایدار جامع[4] گویند اگر R شامل کل فضای محدود باشد.

۱۲ ـ ۱ ـ ۳ خطی‌سازی

اکنون روش خطی سازی معادلهٔ ۱۲ ـ ۳ را توصیف می‌کنیم. فرض کنید $\mathbf{x}_0$ بردار حالت اولیه و $\mathbf{u}_0$ بردار ورودی متناظر با نقطهٔ تعادلی باشد که باید حول آن عملکرد سیگنال کوچک را بررسی کرد. از آنجا که $\mathbf{x}_0$ و $\mathbf{u}_0$ معادلهٔ ۱۲ ـ ۳ را برآورده می‌سازند، داریم:

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = 0 \qquad (۱۲ ـ ۶)$$

1. Locally Stable 2. Asymptotically Stable 3. Finite Stability
4. Globally Stable

حال فرض کنید که سیستم را از حالت بالا به صورت زیر منحرف کنیم:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_\circ + \Delta\mathbf{x} \qquad \mathbf{u} = \mathbf{u}_\circ + \Delta\mathbf{u}$$

که در آن پیشوند Δ نشان‌دهندهٔ یک انحراف کوچک است.

در این صورت حالت جدید باید معادلهٔ ۱۲ ـ ۳ را برآورده سازد. از این رو داریم:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \dot{\mathbf{x}}_\circ + \Delta\dot{\mathbf{x}} \\ &= \mathbf{f}\,[(\mathbf{x}_\circ + \Delta\mathbf{x}), (\mathbf{u}_\circ + \Delta\mathbf{u})]\end{aligned} \qquad (۷ ـ ۱۲)$$

از آنجا که انحراف کوچک فرض می‌شود، توابع غیر خطی $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ را می‌توان برحسب بسط سریهای تیلور بیان کرد. با صرف‌نظر کردن از عباراتی که توانهای مرتبه دوم و بالاتر از Δx و Δu را شامل می‌شوند، می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i = \dot{x}_{i\circ} + \Delta\dot{x}_i &= f_i\,[(\mathbf{x}_\circ + \Delta\mathbf{x}), (\mathbf{u}_\circ + \Delta\mathbf{u})] \\ &= f_i(\mathbf{x}_\circ, \mathbf{u}_\circ) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1}\Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}\Delta x_n \\ &\quad + \frac{\partial f_i}{\partial u_1}\Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r}\Delta u_r\end{aligned}$$

از آنجا که $\dot{x}_{i\circ} = f_i(\mathbf{x}_\circ, \mathbf{u}_\circ)$ است، نتیجه می‌شود:

$$\Delta\dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1}\Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}\Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1}\Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r}\Delta u_r$$

که $i = 1, 2, \dots, n$ است. به طور مشابهی، از معادلهٔ ۱۲ ـ ۴، داریم:

$$\Delta v_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1}\Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n}\Delta x_n + \frac{\partial g_i}{\partial u_1}\Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r}\Delta u_r$$

که $j = 1, 2, \dots, m$ است. بنابراین، صورت خطی شدهٔ معادلات ۱۲ ـ ۳ و ۱۲ ـ ۴ عبارت است از:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\,\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{u} \qquad (۸ ـ ۱۲)$$

$$\Delta\mathbf{y} = \mathbf{C}\,\Delta\mathbf{x} + \mathbf{D}\,\Delta\mathbf{u} \qquad (۹ ـ ۱۲)$$

که در آن داریم:

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \qquad \mathbf{B}=\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{pmatrix}$$

(۱۰ ـ ۱۲)

$$\mathbf{C}=\begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \qquad \mathbf{D}=\begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{pmatrix}$$

مشتقات پاره‌ای بالا در نقطهٔ تعادلی که حول آن، انحرافِ کوچک تحلیل می‌شود، محاسبه می‌گردند. در معادلات ۱۲ ـ ۸ و ۱۲ ـ ۹

$\Delta\mathbf{x}$: بردار حالت n بُعدی؛

$\Delta\mathbf{y}$: بردار خروجی m بُعدی؛

$\Delta\mathbf{u}$: بردار ورودی r بُعدی؛

A ماتریس حالت دستگاه با اندازهٔ $n \times n$؛

B ماتریس ورودی یا کنترل با اندازهٔ $n \times r$؛

C ماتریس خروجی با اندازهٔ $m \times n$؛

و **D** ماتریسی (پیش خور) است که سهمی از ورودی را که مستقیماً در خروجی ظاهر می‌شود تعریف می‌کند و اندازهٔ آن $m \times r$ می‌باشد.

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادلات بالا، معادلات حالت را در حوزهٔ فرکانس به دست می‌آوریم:

$$s\,\Delta\mathbf{x}(s) - \Delta\mathbf{x}(0) = \mathbf{A}\,\Delta\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{u}(s) \qquad (۱۱ ـ ۱۲)$$

$$\Delta\mathbf{y}(s) = \mathbf{C}\,\Delta\mathbf{x}(s) + \mathbf{D}\,\Delta\mathbf{u}(s) \qquad (۱۲ ـ ۱۲)$$

شکل ۱۲ ـ ۱ نمودار بلوکی نمایش فضای حالت را نشان می‌دهد. از آنجا که تابع تبدیل سیستم را نشان می‌دهیم، شروط اولیهٔ $\Delta\mathbf{x}(0)$ صفر فرض شده است.

روشی متداول در حل معادلات حالت با حل کردن برای $\Delta\mathbf{x}(s)$ و محاسبهٔ $\Delta\mathbf{y}(s)$،

به صورت زیر به دست می‌آید:

از مرتب کردن معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۱، داریم:

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})\,\Delta\mathbf{x}(s) = \Delta\mathbf{x}(0) + \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{u}(s)$$

از این رو:

$$\begin{aligned}\Delta\mathbf{x}(s) &= (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\,[\Delta\mathbf{x}(0) + \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{u}(s)] \\ &= \frac{\operatorname{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}\,[\Delta\mathbf{x}(0) + \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{u}(s)]\end{aligned} \qquad (۱۳ ـ ۱۲)$$

و متناظراً

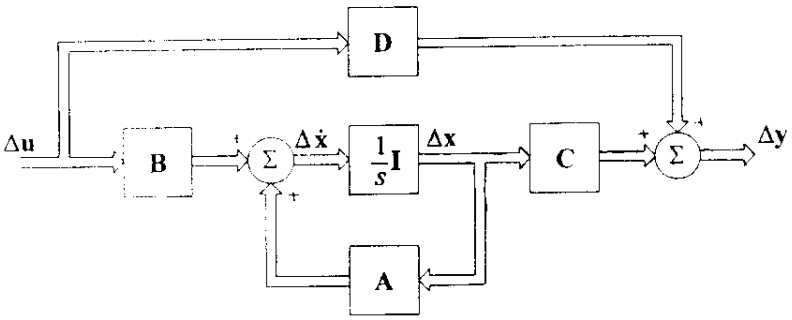
$$\Delta\mathbf{y}(s) = \mathbf{C}\,\frac{\operatorname{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}\,[\Delta\mathbf{x}(0) + \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{u}(s)] + \mathbf{D}\,\Delta\mathbf{u}(s) \qquad (۱۴ ـ ۱۲)$$

همچنان که مشاهده می‌شود تبدیلهای لاپلاس $\Delta\mathbf{x}$ و $\Delta\mathbf{y}$ دو جمله دارند، که یکی به شرایط اولیه و دیگری به ورودیها وابسته است. که به ترتیب تبدیلهای لاپلاس *مؤلفه‌های حالت ـ صفر* و *آزاد* بردارهای خروجی و حالت می‌باشند.

قطبهای $\Delta\mathbf{x}(s)$ و $\Delta\mathbf{y}(s)$ ریشه‌های معادلهٔ زیر هستند:

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0 \qquad (۱۵ ـ ۱۲)$$

مقادیر s که معادلهٔ بالا را برآورده می‌سازند مقادیر ویژهٔ ماتریس $\mathbf{A}$ بوده، و معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۵ را *معادلهٔ مشخصهٔ* ماتریس $\mathbf{A}$ می‌نامند.



شکل ۱۲ ـ ۱ نمودار بلوکی نمایش فضای حالت

۱۲ ـ ۱ ـ ۴ تحلیل پایداری

روش اول لیاپانوف [۱]

پایداری در جزء یک سیستم غیر خطی به کمک ریشه‌های معادلهٔ مشخصهٔ سیستم از اولین تقریبها (یعنی مقادیر ویژهٔ **A**) بیان می‌شود:

الف) هنگامی که مقادیر ویژه، قسمتهای حقیقی منفی دارند، سیستم اصلی پایدار مجانبی است.

ب) هنگامی که حداقل یکی از مقادیر ویژه، قسمت حقیقی مثبت دارد، سیستم اصلی ناپایدار است.

ج) هنگامی که مقادیر ویژه، قسمتهای حقیقی مساوی با صفر دارند، در حالت کلی استنتاج براساس اولین تقریب امکان‌پذیر نیست.

پایداری در کل را می‌توان با پاسخ صریح معادلات دیفرانسیل غیر خطی (به وسیلهٔ کامپیوترهای دیجیتال یا آنالوگ) مطالعه نمود. روشی که پاسخ صریح معادلات دیفرانسیل سیستم را لازم ندارد، روش مستقیم لیاپانوف است.

روش دوم لیاپانوف، یا روش مستقیم

روش دوم سعی دارد که پایداری را مستقیماً با استفاده از توابع مناسبی که در فضای حالت تعریف می‌شوند، تعیین کند. علامت تابع لیاپانوف و علامت مشتق زمانی آن نسبت به معادلات حالت سیستم در نظر گرفته می‌شوند.

تعادل معادلهٔ ۱۲ ـ ۳ *پایدار* است اگر یک تابع معین مثبت $V(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ چنان وجود داشته باشد که مشتق کلی آن $\dot{V}$ نسبت به معادله ۱۲ ـ ۳ مثبت[۱] نباشد.

سیستم در ناحیه‌ای که در آن $\dot{V}$ نیمه معین[۲] منفی است، *پایدار* است و اگر $\dot{V}$ معین منفی باشد *پایدار مجانبی* است.

پایداری در کل سیستمهای قدرت موضوع فصل بعدی است. در این فصل پایداری در جزء سیستمهای قدرت موردنظر بوده، که این پایداری با مقادیر ویژهٔ **A** داده می‌شود. همچنان که در بخش بعد نشان داده می‌شود، مُدهای طبیعیِ پاسخ سیستم، به مقادیر ویژه وابسته هستند.

---

۱. یک تابع را در یک حوزهٔ D فضای حالت معین گویند اگر دارای علامتی یکسان برای کلیهٔ **x**ها در D باشد و برای $\mathbf{x} = 0$، صفر شود. برای مثال، $V(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$ معین مثبت است.

۲. یک تابع را در حوزهٔ D فضای حالت، نیمه معین گویند اگر برای کلیه x در D، دارای علامت یکسان باشد و برای حداقل یک $\mathbf{x} \neq 0$، صفر شود. برای مثال، $V(x_1, x_2, x_3) = (x_1 - x_2)^2 + x_3^2$ نیمه معین مثبت است، زیرا برای $x_1 = x_2$ و $x_3 = 0$ صفر است.

تحلیل خواص ویژهٔ[1] **A**، اطلاعات سودمندی را در خصوص مشخصه‌های پایداری سیستم فراهم می‌آورد.

یادآوری این نکته سودمند است که ماتریس **A** ماتریس ژاکوبی است که عناصر a_{ij} آن با مشتقات نسبی $\partial f_i / \partial x_j$، که در نقطهٔ تعادلی تحت اغتشاش کوچک محاسبه شده، داده شده‌اند. این ماتریس معمولاً *ماتریس حالت*[2] یا *ماتریس دستگاه*[3] نامیده می‌شود. واژهٔ «دستگاه» از حوزهٔ کنترل فرایند سرچشمه گرفته و در فرهنگ مهندسی کنترل جا باز کرده است. دستگاه آن قسمت از سیستم را که می‌خواهد کنترل شود نشان می‌دهد.

۱۲ ـ ۲ خواص ویژهٔ ماتریس حالت

۱۲ ـ ۲ ـ ۱ مقادیر ویژه

مقادیر ویژهٔ ماتریس مقادیری از پارامتر اسکالر λ است که به ازای آنها برای معادلهٔ زیر پاسخهای غیر جزیی (به عبارت دیگر، غیر از $\phi = 0$) وجود داشته باشد:

$$\mathbf{A}\phi = \lambda\phi \qquad (۱۶ ـ ۱۲)$$

که در آن:

A ماتریس مربعی $n \times n$ (که برای سیستمهای فیزیکی مانند سیستم قدرت، حقیقی است) و ϕ بردار $n \times 1$ است.

برای پیدا کردن مقادیر ویژه، معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۶ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\phi = 0 \qquad (۱۷ ـ ۱۲)$$

و برای داشتن پاسخ غیر جزئی باید داشته باشیم:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 0 \qquad (۱۸ ـ ۱۲)$$

بسط دترمینان فوق، *معادلهٔ مشخصه*[4] را می‌دهد و n پاسخ $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$، مقادیر ویژه[5] **A** هستند.

مقادیر ویژه ممکن است حقیقی یا مختلط باشند. اگر **A** حقیقی باشد، مقادیر ویژهٔ مختلط همواره به صورت جفتهای مزدوج رخ خواهند داد.

1. Eigen Properties 2. State Matrix 3. Plant Matrix
4. Characteristic Equation 5. Eigen Values

ماتریسهای همانند،[1] مقادیر ویژهٔ یکسان دارند. بسادگی نیز می‌توان نشان داد که ماتریس و ترانهاده‌اش مقایر ویژهٔ یکسانی دارند.

۱۲ ـ ۲ ـ ۲ بردارهای ویژه

برای هر مقدار ویژهٔ λ_i، بردار n ستونی ϕ_i را که معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۶ را برآورده می‌سازد، *بردار ویژهٔ راست*[2] $\mathbf{A}$ متناظر با مقدار ویژه λ_i، می‌نامند. بنابراین، داریم:

$$\mathbf{A}\phi_i = \lambda_i \phi_i \qquad i = ۱ \text{ و } ۲, \dots, n \qquad (۱۹ ـ ۱۲)$$

بردار ویژهٔ ϕ_i به صورت زیر است:

$$\phi_i = \begin{pmatrix} \phi_{۱i} \\ \phi_{۲i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{pmatrix}$$

از آنجا که معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۷ همگن است، $k\phi_i$ (که در آن k، اسکالر است) نیز یک پاسخ می‌باشد. بنابراین، بردارهای ویژه تنها در حدود یک مضرب اسکالر تعیین می‌گردند.

به‌طور مشابه، بردار n ردیفی ψ_i را که معادلهٔ زیر را برآورده سازد:

$$\psi_i \mathbf{A} = \lambda_i \psi_i \qquad i = ۱ \text{ و } ۲, \dots, n \qquad (۲۰ ـ ۱۲)$$

بردار ویژهٔ چپ[3] متناظر با مقدار ویژهٔ λ_i، نامیده می‌شود.

بردارهای ویژهٔ چپ و راستِ متناظر با مقادیر ویژهٔ مختلف، متعامد[4] هستند. به عبارت دیگر، اگر λ_i مساوی λ_j نباشد، داریم:

$$\psi_j \phi_i = ۰ \qquad (۲۱ ـ ۱۲)$$

لیکن، در مورد بردارهای ویژهٔ متناظر با همان مقدار ویژه داریم:

$$\psi_i \phi_i = C_i \qquad (۲۲ ـ ۱۲)$$

---

1. Similar
2. Right Eigenvector
3. Left Eigenvector
4. Orthognal

که در آن c_i ثابتی غیر صفر است.

از آنجاییکه بردارهای ویژه را می‌توان در عددی ضرب یا برعددی غیرصفر بخش کرد، لذا متداول است که این بردارها را به گونه‌ای *نرمالیزه*[1] می‌کنند که رابطهٔ زیر برآورده شود:

$$\psi_i \phi_i = 1 \qquad (۱۲-۲۳)$$

۱۲ - ۲ - ۳ ماتریسهای مُدال

برای بیان خواص ویژهٔ **A** به طور مختصر، معرفی ماتریسهای زیر مناسب است:

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \qquad (۱۲-۲۴)$$

$$\Psi = [\psi_1^T \ \ \psi_2^T \dots \ \ \psi_n^T]^T \qquad (۱۲-۲۵)$$

(۱۲ - ۲۶) ماتریس قطری، با مقادیر ویژهٔ $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ روی قطر $= \Lambda$

هر کدام از ماتریسهای بالا $n \times n$ هستند. معادلات ۱۲ - ۱۹ و ۱۲ - ۲۳ را می‌توان برحسب این ماتریسها به صورت زیر بسط داد:

$$\mathbf{A}\Phi = \Phi\Lambda \qquad (۱۲-۲۷)$$

$$\Psi\Phi = \mathbf{I} \Rightarrow \Psi = \Phi^{-1} \qquad (۱۲-۲۸)$$

از معادلهٔ ۱۲ - ۲۷ نتیجه می‌شود:

$$\Phi^{-1}\mathbf{A}\Phi = \Lambda \qquad (۱۲-۲۹)$$

۱۲ - ۲ - ۴ حرکت آزاد سیستم دینامیکی

با مراجعه به معادلهٔ حالت ۱۲ - ۹، مشاهده می‌کنیم که حرکت آزاد (با ورودی صفر) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} \qquad (۱۲-۳۰)$$

همیشه مجموعه‌ای از معادلات به صورت بالا، *حاصل از ملاحظات فیزیکی*، بهترین وسیلهٔ

1. Normalize

مطالعات تحلیلی حرکت نمی‌باشد. مسأله آن است که میزان تغییر هر متغیر حالت، ترکیبی خطی از کلیهٔ متغیرهای حالت می‌باشد. به علت تزویج متقابل[1] بین حالتها، مجزا کردن آن دسته از پارامترهایی که حرکت را به طور مؤثری تحت تأثیر قرار می‌دهند مشکل است.

به منظور حذف تزویج متقابل بین متغیرهای حالت، بردار حالت جدید $\mathbf{z}$ را در نظر بگیرید که به بردار حالت اولیهٔ $\Delta\mathbf{x}$ به کمک تبدیل زیر رابطه دارد:

$$\Delta\mathbf{x} = \Phi\,\mathbf{z} \qquad (۳۱ - ۱۲)$$

که در آن Φ، ماتریس مُدال $\mathbf{A}$، تعریف شده با معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۴ است. با جایگزینی عبارت بالا به جای $\Delta\mathbf{x}$ در معادلهٔ حرکت ۱۲ ـ ۳۰، داریم:

$$\Phi\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\,\Phi\,\mathbf{z} \qquad (۳۲ - ۱۲)$$

معادلهٔ حالت جدید را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\mathbf{z}} = \Phi^{-1}\,\mathbf{A}\,\Phi\,\mathbf{z} \qquad (۳۳ - ۱۲)$$

با توجه به رابطهٔ ۱۲ ـ ۲۹، معادلهٔ بالا چنین می‌شود:

$$\dot{\mathbf{z}} = \Lambda\,\mathbf{z} \qquad (۳۴ - ۱۲)$$

تفاوت مهم بین معادلات ۱۲ ـ ۳۴ و ۱۲ ـ ۳۰ آن است که Λ یک ماتریس قطری بوده، حال آنکه $\mathbf{A}$، در حالت کلی، غیر قطری است.

معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۴، n معادلهٔ مرتبهٔ اول (اسکالر) بدون تزویج[2] را نشان می‌دهد:

$$\dot{z}_i = \lambda_i z_i \quad i = ۱ \text{ و } ۲, \ldots, n \qquad (۳۵ - ۱۲)$$

بنابراین، تأثیر تبدیل ۱۲ ـ ۳۱، غیر تزویجی کردن معادلات حالت است.

معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۵، یک معادله دیفرانسیل مرتبهٔ اول ساده است که پاسخهایی زمانی به صورت زیر دارد:

$$z_i(t) = z_i(۰)\,e^{\lambda_i t} \qquad (۳۶ - ۱۲)$$

1. Cross - Coupling
2. Uncouple

که در آن $z_i(0)$ مقدار اولیهٔ z_i است.

با بازگشت به معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۱، پاسخ معادله برحسب بردار حالت اولیه به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{aligned}\Delta\mathbf{x}(t) &= \Phi\,\mathbf{z}(t)\\ &= [\phi_1\ \phi_2 \dots \phi_n]\begin{bmatrix} z_1(t)\\ z_2(t)\\ \vdots\\ z_n(t)\end{bmatrix}\end{aligned} \qquad (۳۷ ـ ۱۲)$$

که با توجه به معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۶، لازم است که:

$$\Delta\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^{n} \phi_i\, z_i(0)\, e^{\lambda_i t} \qquad (۳۸ ـ ۱۲)$$

حال از معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۷، داریم:

$$\begin{aligned}\mathbf{z}(t) &= \Phi^{-1}\,\Delta\mathbf{x}(t)\\ &= \Psi\,\Delta\mathbf{x}(t)\end{aligned} \qquad (۳۹ ـ ۱۲)$$

این موضوع ایجاب می‌کند که:

$$z_i(t) = \psi_i\,\Delta\mathbf{x}(t) \qquad (۴۰ ـ ۱۲)$$

از $t = 0$، نتیجه می‌شود:

$$z_i(0) = \psi_i\,\Delta\mathbf{x}(0) \qquad (۴۱ ـ ۱۲)$$

با استفاده از c_i برای نشان دادن حاصل ضرب اسکالر $\psi_i\,\Delta\mathbf{x}(0)$، معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۸ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^{n} \phi_i\, c_i\, e^{\lambda_i t} \qquad (۴۲ ـ ۱۲)$$

به عبارت دیگر، پاسخ زمانی iاُمین متغیر حالت به صورت زیر داده می‌شود:

$$\Delta x_i(t) = \phi_{i1}\, c_1\, e^{\lambda_1 t} + \phi_{i2}\, c_2\, e^{\lambda_2 t} + \dots + \phi_{in}\, c_n\, e^{\lambda_n t} \qquad (۴۳ ـ ۱۲)$$

معادلهٔ بالا عبارتی را برای پاسخ زمانی حرکت آزاد سیستم برحسب مقادیر ویژه و بردارهای ویژهٔ چپ و راست به دست می‌دهد. از این رو، پاسخ آزاد (یا شرط اولیه) به صورت ترکیبی خطی *از n مُد دینامیکی* (متناظر با n مقادیر ویژه ماتریس حالت)، داده می‌شود.

ضرب اسکالر $c_i = \psi_i \Delta \mathbf{x}(0)$ نشان‌دهندهٔ *اندازهٔ تحریک*[1] iاُمین مُد حاصل از شروط اولیه است. اگر شروط اولیه در راستای jاُمین بردار ویژه قرار بگیرد، ضربهای اسکالر $\psi_i \Delta \mathbf{x}(0)$ برای کلیهٔ $i \neq j$، صفر خواهد بود. بنابراین، تنها jاُمین مُد تحریک خواهد شد.

اگر بردارِ نشان‌دهندهٔ شرط اولیه، یک بردار ویژه نباشد، می‌توان آن را به صورت ترکیب خطیِ n بردار ویژه نشان داد. پاسخ سیستم مجموع n پاسخ خواهد بود و اگر مؤلفه‌ای در راستای یک بردار ویژه از شروط اولیه صفر باشد، مُد متناظر تحریک نخواهد شد (به عنوان نمونه مثال ۱۲ ـ ۱ را ببینید).

مقدار ویژه و پایداری

مشخصهٔ وابستگی زمانی هر مُد متناظر با مقدار ویژهٔ λ_i به صورت $e^{\lambda_i t}$ داده می‌شود. بنابراین، می‌توان پایداری سیستم را به کمک مقادیر ویژه به صورت زیر تعیین کرد:

الف) مقدار ویژهٔ حقیقی، متناظر با مُد غیر نوسانی است. مقدار ویژهٔ حقیقیِ منفی، نشان‌دهندهٔ مُد کاهشی است که هر چه اندازهٔ آن بزرگتر باشد، کاهش سریعتر خواهد بود. مقدار ویژهٔ حقیقیِ مثبت، نشان‌دهندهٔ ناپایداریِ غیر نوسانی است.

ب) مقادیر ویژهٔ مختلط، به صورت جفتهای مزدوج رخ می‌دهند، و هر جفت متناظر با یک مُد نوسانی است.

cهای متناظر و بردارهای ویژه، مقادیر مختلط مناسبی خواهند داشت، به گونه‌ای که مُؤلفه‌های $\mathbf{x}(t)$ را در هر لحظه از زمان حقیقی می‌کنند. برای نمونه:

$$(a + jb)\, e^{(\sigma - j\omega)t} + (a - jb)\, e^{(\sigma + j\omega)t}$$

صورت زیر را دارد:

$$e^{\sigma t} \sin(\omega t + \theta)$$

که نشان‌دهندهٔ سینوسی میرا شده برای σ منفی است.

1. Excitation

مؤلفهٔ حقیقی مقادیر ویژه، میرایی، و مؤلفهٔ مختلط آن، فرکانس نوسان را می‌دهد. قسمت حقیقیِ منفی نشان‌دهندهٔ نوسان میرا شده و قسمت حقیقیِ مثبت نشان‌دهندهٔ نوسان با دامنهٔ افزایشی می‌باشد. از این رو، برای یک جفت مختلط مقادیر ویژه:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \qquad (۴۴ - ۱۲)$$

فرکانس نوسان بر حسب HZ به صورت زیر داده می‌شود:

$$f = \frac{\omega}{۲\pi} \qquad (۴۵ - ۱۲)$$

این‌رابطه بیانگر فرکانس واقعی[1] یا میرا شده[2] است. نسبت میرایی[3] به صورت ذیل داده می‌شود:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^۲ + \omega^۲}} \qquad (۴۶ - ۱۲)$$

نسبت میرایی ζ تعیین کنندهٔ نرخ کاهش دامنهٔ نوسان است. ثابت زمانی کاهش دامنه $\frac{۱}{|\sigma|}$ می‌باشد. به عبارت دیگر، دامنه به اندازهٔ $\frac{۱}{e}$ یا ۳۷٪ مقدار دامنهٔ اولیه در $\frac{۱}{|\sigma|}$ ثانیه یا در $\frac{۱}{(۲\pi\zeta)}$ سیکل از نوسان کاهش پیدا می‌کند. شکل ۱۲ ـ ۲ شش ترکیب مختلف مقدار ویژه و رفتار مسیر متناظر با هر یک را، حول نقاط منفرد[4] در حالت دو بعدی نشان می‌دهد.

حالتهای ۱ و ۳ و ۵ پایداری محلی را تضمین می‌کنند، ۱ و ۳ پایدار مجانبی هستند.

۱۲ ـ ۲ ـ ۵ شکل مُد، حساسیت، و عامل مشارکت

الف) شکل مُد و بردارهای ویژه

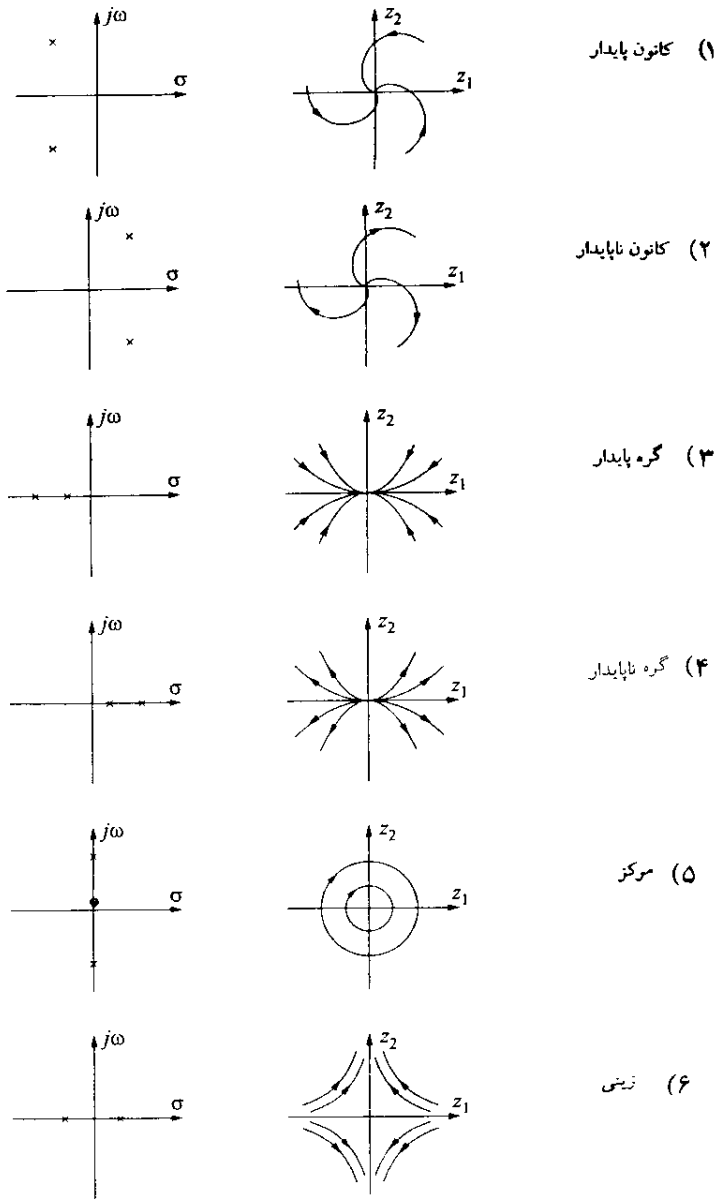
در بخش قبل، پاسخ سیستم را برحسب بردارهای حالت $\Delta\mathbf{x}$ و $\mathbf{z}$، که به صورت زیر به هم وابسته‌اند، مورد بررسی قرار دادیم:

$$\Delta\mathbf{x}(t) = \Phi\,\mathbf{z}(t) = [\phi_۱\ \phi_۲, \dots, \phi_n]\,\mathbf{z}(t) \qquad (\text{۱۲ـ ۴۷ الف})$$

و:

$$\mathbf{z}(t) = \Psi\,\Delta\mathbf{x}(t) = [\psi_۱^T\ \psi_۲^T \dots \psi_n^T]^T\,\Delta\mathbf{x}(t) \qquad (\text{۱۲ـ ۴۷ ب})$$

1. Actual Frequency
2. Damped Frequency
3. Damping Ratio
4. Singular Points



شکل ۱۲ ـ ۲ نقاط منفرد متناظر با شش ترکیب ممکن جفتهای مقدار ویژه

متغیرهای Δx_1 , Δx_2 , ... , Δx_n، متغیرهای حالت اصلی هستند که برای نمایش عملکرد دینامیکی سیستم انتخاب شده‌اند. متغیرهای z_1 , z_2 , ... , z_n، متغیرهای حالت تبدیل شده به گونه‌ای هستند که هر متغیر فقط متناظر با یک مُد است. به عبارت دیگر، متغیرهای تبدیل شدهٔ z مستقیماً به مُدها وابسته هستند.

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۴۷ «الف» مشاهده می‌کنیم که *بردار ویژه راست*، شکل مُد[1] یا به عبارت دیگر، فعالیت متغیرهای حالت را هنگامی که مُد خاصی تحریک شود را می‌دهد. برای نمونه، درجهٔ فعالیت متغیر حالت x_k در iاُمین مُد به وسیلهٔ عنصر ϕ_{ki} از بردار ویژهٔ راست ϕ_i داده می‌شود.

اندازهٔ عناصر ϕ_i، میزان فعالیتهای n متغیر حالت در i امین مُد را می‌دهد، و زاویهٔ عناصر، جابجایی‌های فاز متغیرهای حالت در خصوص مُد را به دست می‌دهد.

همچنان که از معادلهٔ ۱۲ ـ ۴۷ «ب» مشاهده می‌شود، بردار ویژهٔ چپ ψ_i این موضوع را شناسایی می‌کند که کدام ترکیب از متغیرهای حالت اولیه، تنها i امین مُد را نمایش می‌دهند. از این رو kاُمین عنصر بردار ویژهٔ راست ϕ_i فعالیت متغیر x_n را در i امین مُد اندازه‌گیری کرده، kاُمین عنصر بردار ویژهٔ چپ سهم این فعالیت را در iامین مُد وزندهی می‌کند.

ب) حساسیت مقدار ویژه

اکنون حساسیت مقادیر ویژه به عناصر ماتریس حالت را بررسی می‌کنیم. معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۹ که مقادیر ویژه و بردارهای ویژه را تعریف می‌کند، در نظر بگیرید:

$$\mathbf{A}\phi_i = \lambda_i \phi_i$$

با مشتقگیری از رابطهٔ فوق نسبت به a_{kj} (عنصر kاُمین ردیف و jاُمین ستون ماتریس $\mathbf{A}$) نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{kj}}\phi_i + \mathbf{A}\frac{\partial \phi_i}{\partial a_{kj}} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}}\phi_i + \lambda_i \frac{\partial \phi_i}{\partial a_{kj}}$$

با پیش ضرب کردن[2] با ψ_i، و توجه به اینکه $\psi_i\phi_i = 1$ و $\psi_i(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I}) = 0$ است، می‌توان معادلهٔ بالا را به صورت زیر ساده کرد:

$$\psi_i \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{kj}}\phi_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}}$$

1. Mode Shape 2. Premultiplication

کلیهٔ عناصر $\partial \mathbf{A} / \partial a_{kj}$، به جز عنصر kاُمین ردیف و jاُمین ستون (که برابر ۱ است) صفر هستند. از این رو داریم:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} = \psi_{ik}\ \phi_{ji} \qquad (۴۸ - ۱۲)$$

بنابراین حساسیت مقدار ویژهٔ λ_i به عنصر a_{kj} از ماتریس حالت مساوی با حاصل ضرب عنصر بردار ویژهٔ چپ ψ_{ik} و عنصر بردار ویژهٔ راست ϕ_{ji} می‌باشد.

ج) عامل مشارکت

یک مسأله در بکارگیری مجزایِ بردارهای ویژهٔ راست و چپ در شناسایی رابطهٔ بین حالتها و مُدها، آن است که عناصر بردارهای ویژه به واحدها و مقیاس‌بندی متناظر با متغیرهای حالت وابسته هستند. یکی از روشهای حل این مسأله، در مرجع ۲ به کمک ماتریسی به نام *ماتریس مشارکت*[1] (به عنوان اندازه‌ای از رابطهٔ بین متغیرهای حالت و مُدها) پیشنهاد شده است، که بردارهای ویژهٔ راست و چپ را به صورت زیر ترکیب می‌کند:

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_۱\ \mathbf{P}_۲ \dots \mathbf{P}_n] \qquad (۱۲ - ۴۹ \text{ الف})$$

با:

$$\mathbf{P}_i = \begin{pmatrix} P_{۱i} \\ P_{۲i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{۱i}\psi_{i۱} \\ \phi_{۲i}\psi_{i۲} \\ \vdots \\ \phi_{ni}\psi_{in} \end{pmatrix} \qquad (۱۲ - ۴۹ \text{ ب})$$

که در آن:

ϕ_{ki} = عنصر موجود در kاُمین ردیف و iاُمین ستون ماتریس مُدال Φ

= iامین ورودی بردار ویژهٔ راست ϕ_i

و ψ_{ik} = عنصر موجود در iاُمین ردیف و kاُمین ستون ماتریس مُدال Ψ

= kامین ورودی بردار ویژه چپ ψ_i است.

عنصر $P_{ki} = \phi_{ki}\ \psi_{ik}$ ضریب مشارکت نامگذاری شده است [۲] که سنجشی از مشارکت نسبی kاُمین متغیر حالت در iاُمین مُد و بالعکس می‌باشد.

1. Participation Matrix

از آنجا که ϕ_{ki} *فعالیت* x_k در اُمین مُد را اندازه‌گیری کرده، ψ_{ik} سهم این فعالیت را وزندهی می‌کند، حاصل ضرب P_{ki} *مشارکت خالص*[1] را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین تأثیر ضرب کردن عناصر بردارهای ویژهٔ چپ و راست در بدون بُعد کردنِ P_{ki} ظاهر می‌شود (به عبارت دیگر، مستقل از انتخاب واحدها).

نظر به نرمالیزه کردن بردار ویژه، مجموع عوامل مشارکت متناظر با هر مُد (یعنی $\sum_{i=1}^{n} P_{ki}$) یا با هر متغیر حالت (یعنی $\sum_{k=1}^{n} P_{ki}$) برابر با یک است.

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۴۸ مشاهده می‌کنیم که در واقع عامل مشارکت P_{ki} برابر با حساسیت مقدار ویژهٔ λ_i به عنصر قطری a_{kk} از ماتریس حالت **A** می‌باشد؛ یعنی:

$$P_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \qquad (۵۰ - ۱۲)$$

همان‌طور که در چند مثال آینده خواهیم دید، عوامل مشارکت عموماً نشان‌دهندهٔ مشارکتهای نسبی حالتهای مربوط به مُدهای متناظر است.

۱۲ ـ ۲ ـ ۶ کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری

در بخش ۱۲ ـ ۱ ـ ۳ پاسخ سیستم را در حضور ورودی، با معادلات ۱۲ ـ ۸ و ۱۲ ـ ۹ بیان کردیم که در اینجا برای مراجعه، تکرار می‌شود:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\,\Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}\,\Delta \mathbf{u} \qquad (۸ - ۱۲)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}\,\Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}\,\Delta \mathbf{u} \qquad (۹ - ۱۲)$$

که می‌توان آنها را برحسب متغیرهای تبدیل شدهٔ **z**، (تعریف شده با معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۱) به شکل ذیل نوشت:

$$\Phi \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\,\Phi\,\mathbf{z} + \mathbf{B}\,\Delta \mathbf{u}$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}\,\Phi\,\mathbf{z} + \mathbf{D}\,\Delta \mathbf{u}$$

بنابراین معادلات حالت را می‌توان به «صورت نرمال» (غیر تزویجی[2]) به شکل زیر نوشت:

$$\dot{\mathbf{z}} = \Delta \mathbf{z} + \mathbf{B}'\,\Delta \mathbf{u} \qquad (۵۱ - ۱۲)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}'\,\mathbf{z} + \mathbf{D}\,\Delta \mathbf{u} \qquad (۵۲ - ۱۲)$$

1. Net Participation
2. Decoupled

که در آن:

$$\mathbf{B}' = \Phi^{-1}\mathbf{B} \qquad (۵۳ - ۱۲)$$

$$\mathbf{C}' = \mathbf{C}\Phi \qquad (۵۴ - ۱۲)$$

است.

با مراجعه به معادلهٔ ۱۲ ـ ۵۱، اگر اُمین ردیف ماتریس $\mathbf{B}'$ صفر باشد، ورودیها هیچ تأثیری بر اُمین مُد ندارند. در این چنین حالتی، اُمین مُد راکنترل‌ناپذیر[1] می‌گویند.

با توجه به معادلهٔ ۱۲ ـ ۵۲، مشاهده می‌کنیم که اُمین ستون ماتریس $\mathbf{C}'$ تعیین می‌کند که آیا متغیر z_i سهمی در تشکیل خروجیها دارد یا خیر. اگر ستون صفر باشد، مُد متناظر رؤیت‌ناپذیر[2] می‌باشد. این نکته توضیح می‌دهد که چرا در بعضی اوقات، مُدهای بامیرایی کم به کمک مشاهدهٔ پاسخ گذرای چند کمیتِ اندازه‌گیری شده، آشکار نمی‌شوند.

ماتریس $\mathbf{B}' = \Phi^{-1}\mathbf{B}$ $n \times r$، *ماتریس کنترل‌پذیری مُد*[3]، و ماتریس $\mathbf{C}' = \mathbf{C}\Phi$ $m \times n$ *ماتریس رؤیت‌پذیری مُد*[4] نامیده می‌شوند.

با بررسی $\mathbf{B}'$ و $\mathbf{C}'$ می‌توانیم مُدها را به چهار دستهٔ کنترل‌پذیر و رؤیت پذیر؛ کنترل‌پذیر و رؤیت ناپذیر؛ کنترل ناپذیر و رؤیت پذیر؛ کنترل ناپذیر و رؤیت ناپذیر تقسیم کنیم[5].

۱۲ ـ ۲ ـ ۷ مفهوم فرکانس مختلط

موج سینوسی میراشدهٔ زیر را در نظر بگیرید:

$$v = V_m e^{\sigma t}\cos(\omega t + \theta) \qquad (۵۵ - ۱۲)$$

واحد ω رادیان بر ثانیه و واحد θ رادیان می‌باشد. معمولاً از واحد بدون بُعد نِپر[6] (Np) (به افتخار ریاضی‌دان جان نِپِر[7] ۱۵۵۰ ـ ۱۶۱۷ م. که لگاریتم را اختراع کرد) برای σt استفاده می‌شود. از این رو واحد σ نِپِر بر ثانیه (Np/s) است.

---

1. Uncontrollable 2. Unobservable 3. Mode Controllability Matrix
4. Mode Observability Matrix
۵. این موضوع به نام قضیهٔ *ساختار کانونیکال* کالمن خوانده می‌شود، زیرا اولین بار آر.ای. کالمن در ۱۹۶۰ میلادی آن را پیشنهاد کرده است.
6. Neper 7. John Napier

در مدارهایی که در آنها تحریک و توابع ورودی، به شکل موجهای سینوسی میرا شده هستند (همانند سینوسی میرا شدهٔ معادلهٔ ۱۲ ـ ۵۵)، می‌توان از نمایشهای فازوری سینوسهای میرا شده، استفاده کرد. این نماد بخوبیِ فازور سینوسی‌هایی (میرا نشده) که معمولاً در تحلیل مدار جریان متناوب به کار گرفته می‌شود، کار می‌کند، زیرا خواص سینوسی‌ها که استفاده از فازورها را امکان‌پذیر می‌سازد در سینوسی‌های میرا شده نیز مشترک است. یعنی آنکه، مجموع یا تفاضل دو عدد یا بیشتر، از سینوسی‌های میرا شده و مشتق یا انتگرال نامعین آنها نیز باز یک سینوسی میرا شده است. در تمامی این موارد، V_m و θ ممکن است تغییر کنند اما ω و σ ثابت هستند.

شبیه به نمادهای علامتگذاری فازوری به کار رفته در سینوسی‌ها، در مورد سینوسی‌های میرا شده نیز می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} v &= V_m e^{\sigma t} \cos(\omega t + \theta) \\ &= \mathrm{Re}\left[V_m e^{\sigma t} e^{j(\omega t + \theta)}\right] \\ &= \mathrm{Re}\left[V_m e^{j\theta} e^{(\sigma + j\omega)t}\right] \end{aligned}$$

با $s = \sigma + j\omega$، داریم:

$$v = \mathrm{Re}\left[\tilde{V} e^{st}\right] \qquad (۵۶ - ۱۲)$$

که در آن $\tilde{V}$ فازور $(V_m \angle \theta)$ بوده، برای هر دو سینوسی‌های میراشده و میرانشده یکسان است. بدیهی است که می‌توانیم به همان طریقی که با سینوسی‌های میرا نشده برخورد می‌کنیم، با استفاده از s به جای $j\omega$، با سینوسی‌های میرا شده نیز برخورد کنیم.

از آن جا که s، عددی مختلط است، آن را *فرکانس مختلط*[1] و $V(s)$ را *فازور تعمیم یافته*[2] می‌نامیم.

تمامی مفاهیم از قبیل امپدانس، ادمیتانس، قضایای تونن و نورتن، جمع آثار و غیره در حالت سینوسی میرا شده نیز صادق هستند.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حوزهٔ s، جریان فازوری $I(s)$ و ولتاژ $V(s)$، مربوط به شبکه‌ای دو پایانه‌ای به صورت زیر به هم مربوطند:

$$V(s) = Z(s)\,I(s)$$

1. Complex Frequency
2. Generalized Phaser

که در آن $Z(s)$، امپدانس تعمیم یافته است.

به‌طور مشابهی، روابط ورودی و خروجی دستگاههای دینامیکی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

و یا به صورت تجزیه شده

$$G(s) = \frac{b_m (s - z_1)(s - z_2)\dots(z - z_m)}{a_n (s - p_1)(s - p_2)\dots(s - p_n)}$$

مقادیر z_1 تا z_m را صفر[1] می‌نامند زیرا مقادیری از s هستند که به ازای آنها، $G(s)$ صفر می‌شود. مقادیر p_1 تا p_n را قطب[2] $G(s)$ می‌نامند. مقادیر قطبها و صفرها، همراه با a_n و b_m به طور منحصربفردی تابع تبدیل سیستم $G(s)$ را تعیین می‌کند. قطبها و صفرها در بررسی خواص حوزهٔ فرکانسی سیستمهای دینامیکی سودمند هستند.

۱۲ ـ ۲ ـ ۸ روابط بین خواص ویژه و توابع تبدیل

نمایش فضای حالت نه تنها خواص ورودی و خروجی سیستم بلکه رفتار کامل داخلی آن را نیز موردنظر دارد. برخلاف آن، نمایش تابع تبدیل تنها رفتار ورودی ـ خروجی سیستم را مشخص‌می‌کند. از این رو، می‌توان هر انتخاب دلخواهی از متغیرهای حالت داشت حال آنکه دستگاه فقط با یک تابع تبدیل مشخص می‌شود. از طرف دیگر، اگر یکی از نمایشهای فضای حالتِ سیستم معلوم باشد، تابع تبدیل آن به طور منحصربفردی به دست می‌آید. بنابراین نمایش فضای حالت توصیف کاملی از سیستم است. نمایش فضای حالت به صورت ایده‌الی برای تحلیل سیستمهای چند متغیرهٔ چند ورودی ـ چند خروجی مناسب است.

در تحلیل پایداری سیگنال کوچک سیستمهای قدرت، اصولاً به تحلیل مقدار ویژهٔ ماتریس حالت سیستم وابسته‌ایم. لیکن، در طراحی کنترل به تابع تبدیل حلقه ـ باز بین متغیرهای معین علاقه‌مند هستیم. برای اینکه مشاهده شود که چگونه این موضوع به ماتریس حالت و خواص‌ویژهٔ آن ارتباط دارد، تابع تبدیل بین متغیرهای u و y را در نظر می‌گیریم. از معادلات ۱۲ ـ ۸ و ۱۲ ـ ۹، می‌توان نوشت:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\,\Delta\mathbf{x} + \mathbf{b}\,\Delta u \qquad (۵۷ ـ ۱۲)$$

$$\Delta y = \mathbf{c}\,\Delta\mathbf{x} \qquad (۵۸ ـ ۱۲)$$

1. Zero 2. Pole

که در آن $\mathbf{A}$ ماتریس حالت، $\Delta\mathbf{x}$ بردار حالت، Δu ورودی، Δy خروجی، $\mathbf{c}$ بردار سطری و $\mathbf{b}$ بردار ستونی است. فرض می‌کنیم که y به طور مستقیم به u وابسته نیست (به عبارت دیگر، $\mathbf{D} = 0$ است). در این صورت تابع تبدیل خواسته شده عبارت است از:

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \mathbf{c}\,(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\,\mathbf{b} \qquad (۵۹ - ۱۲)$$

این عبارت، صورت کلی زیر را دارد:

$$G(s) = K\frac{N(s)}{D(s)} \qquad (۶۰ - ۱۲)$$

اگر بتوان $D(s)$ و $N(s)$ را تجزیه کرد، نتیجه می‌شود:

$$G(s) = K\frac{(s - Z_1)(s - Z_2)\dots(s - Z_l)}{(s - P_1)(s - P_2)\dots(s - P_n)} \qquad (۶۱ - ۱۲)$$

همان طور که در بخش ۱۲ ـ ۲ ـ ۷ بحث شد، n مقدار s، یعنی، $P_1, P_2, \dots, P_n$، که چند جمله‌ای مخرج $D(s)$ را صفر می‌کنند، *قطبهای* $G(s)$ و l مقدار s، یعنی، $Z_1, Z_2, \dots, Z_l$ صفرهای $G(s)$ هستند.

اکنون، $G(s)$ را می‌توان به صورت کسرهای جزئی زیر بسط داد:

$$G(s) = \frac{R_1}{s - P_1} + \frac{R_2}{s - P_2} + \dots + \frac{R_n}{s - P_n} \qquad (۶۲ - ۱۲)$$

که R_i به نام *مانده*[1] $G(s)$ در قطب P_i نامیده می‌شود.

برای بیان تابع تبدیل برحسب مقادیر ویژه و بردارهای ویژه، متغیرهای حالت $\Delta\mathbf{x}$ را برحسب متغیرهای تبدیل شدهٔ $\mathbf{z}$ تعریف شده با معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۱ بیان می‌کنیم. به دنبال مراحل به کار گرفته شده در بخش ۱۲ ـ ۲ ـ ۴، معادلات ۱۲ ـ ۵۷ و ۱۲ ـ ۵۸ را می‌توان برحسب متغیرهای تبدیل شده به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\mathbf{z}} = \Phi^{-1}\mathbf{A}\,\Phi\,\mathbf{z} + \Phi^{-1}\mathbf{b}\,\Delta u = \Lambda\,\mathbf{z} + \Phi^{-1}\mathbf{b}\,\Delta u \qquad (۶۳ - ۱۲)$$

و:

$$\Delta y = \mathbf{c}\,\Phi\,\mathbf{z} \qquad (۶۴ - ۱۲)$$

1 Residue

پس:

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)}$$
$$= \mathbf{c}\,\Phi\,[s\mathbf{I} - \Lambda]^{-1}\,\Psi\,\mathbf{b} \qquad (۶۵ - ۱۲)$$

چون Λ ماتریسی قطری است، نتیجه می‌شود:

$$G(s) = \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{s - \lambda_i} \qquad (۶۶ - ۱۲)$$

که در آن:

$$R_i = \mathbf{c}\,\phi_i\,\psi_i\,\mathbf{b} \qquad (۶۷ - ۱۲)$$

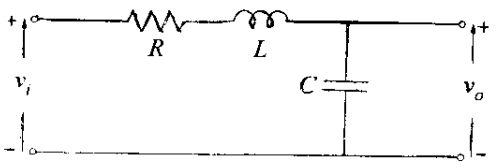
مشاهده می‌کنیم که قطبهای $G(s)$ با مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}$ داده می‌شوند. معادلهٔ ۱۲ ـ ۶۷ مانده‌ها را برحسب بردارهای ویژه به دست می‌دهد. صفرهای $G(s)$ از حل معادلهٔ زیر داده می‌شوند:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{s - \lambda_i} = 0 \qquad (۶۸ - ۱۲)$$

مثال ۱۲ ـ ۱

در این مثال یک سیستم خطی مرتبه دوم را مطالعه می‌کنیم. تحلیل چنین سیستمی ساده بوده و برای درک رفتار سیستمهای مرتبهٔ بالاتر سودمند است. عملکرد سیستمهای مرتبهٔ بالا معمولاً در قالب مجموعه‌ای غالب از قطبها یا مقادیر ویژهٔ مرتبه دوم بررسی می‌شود. بنابراین، قبل از مطالعهٔ سیستمهای پیچیده درک دقیق مشخصه‌های سیستم مرتبه دوم مهم است.

شکل ۱۲ ـ ۱، مدار RLC را که نشان‌دهندهٔ یک سیستم مرتبه دوم است، نشان می‌دهد. خواص‌ویژهٔ ماتریس حالت سیستم را مطالعه کرده و مشخصه‌های مُدال آن را بررسی کنید.



شکل ۱۲ ـ ۱ م

حل

معادلهٔ دیفرانسیل بین متغیرهای v_o و v_i عبارت است از:

$$LC\frac{d^2 v_o}{dt^2} + RC\frac{dv_o}{dt} + v_o = v_i \qquad (۱۲ - ۱م)$$

که می‌توان آن را به صورت استاندارد زیر نوشت:

$$\frac{d^2 v_o}{dt^2} + (2\zeta\omega_n)\frac{dv_o}{dt} + \omega_n^2 v_o = \omega_n^2 v_i \qquad (۱۲ - ۲م)$$

که در آن:

$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$؛ فرکانس طبیعی میرا نشده

و $\zeta = (R/2)/\sqrt{L/C}$؛ نسبت میرایی است.

به منظور تعیین نمایش فضای حالت، متغیرهای حالت، ورودی و خروجی زیر را تعریف می‌کنیم:

$$\begin{aligned} x_1 &= v_o \\ x_2 &= \frac{dv_o}{dt} \\ u &= v_i \\ y &= v_o = x_1 \end{aligned} \qquad (۱۲ - ۳م)$$

با استفاده از کمیتهای بالا، معادلهٔ ۱۲ ـ ۲ م را می‌توان برحسب دو معادلهٔ دیفرانسیل مرتبه اول زیر بیان کرد:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \qquad (۱۲ - ۴م)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\omega_n^2 x_1 - (2\zeta\omega_n)x_2 + \omega_n^2 u \qquad (۱۲ - ۵م)$$

و به شکل ماتریسی:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{pmatrix} u \qquad (۱۲ - ۶م)$$

متغیر خروجی به صورت زیر داده می‌شود:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + 0u \qquad (۱۲ - ۷ م)$$

که به شکل استاندارد فضای حالت هستند:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u$$

$$y = \mathbf{c}\mathbf{x} + du$$

مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}$ از معادلهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{vmatrix} -\lambda & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

بنابراین داریم:

$$\lambda^2 + 2\xi\omega_n\lambda + \omega_n^2 = 0 \qquad (۱۲ - ۸ م)$$

که با حل این معادله، مقادیر ویژه عبارتند از:

$$\lambda_1 = -\xi\omega_n + \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1} \qquad (۱۲ - ۹ م)$$

$$\lambda_2 = -\xi\omega_n - \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$$

بردارهای ویژهٔ راست با معادلهٔ زیر داده می‌شود:

$$(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\phi = 0$$

بنابراین:

$$\begin{pmatrix} -\lambda_i & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n - \lambda_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

که می‌توان آن را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$-\lambda_i\phi_{1i} + \phi_{2i} = 0 \qquad (۱۲ - ۱۰ م)$$

$$-\omega_n^2\phi_{1i} - (2\xi\omega_n + \lambda_i)\phi_{2i} = 0$$

اگر سعی کنیم که معادلات بالا را برای ϕ_{11} و ϕ_{21} حل کنیم، در می‌یابیم که آنها مستقل نیستند. همان طور که قبلاً بررسی شد، این موضوع در حالت کلی برای یک سیستم مرتبهٔ n نیز صادق است، معادلهٔ $(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I})\phi = 0$ تنها $n - 1$ معادلهٔ مستقل برای n مؤلفه بردارهای ویژه خواهد داد. که می‌توان یکی از مؤلفه‌های بردار ویژه را به طور دلخواه انتخاب کرد و آنگاه سایر مؤلفه‌ها را از $n - 1$ معادلهٔ مستقل دیگر تعیین کرد. البته باید یادآوری کرد که اگر مقادیر ویژه متمایز باشند، بردارهای ویژهٔ متناظر، مستقل خواهند بود.

برای سیستم مرتبه دوم، می‌توان $\phi_{11} = 1$ را ثابت فرض کرد و ϕ_{21} را از یکی از دو رابطهٔ معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۰ م، برای هر مقدار ویژه تعیین کرد.

بردار ویژهٔ متناظر با λ_1 عبارت است از:

$$\phi_1 = \begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -\zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \end{pmatrix} \qquad (۱۲ - ۱۱ م)$$

و بردار ویژهٔ متناظر با λ_2 عبارت است از:

$$\phi_2 = \begin{pmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -\zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \end{pmatrix} \qquad (۱۲ - ۱۲ م)$$

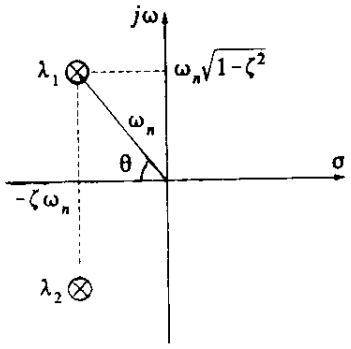
ماهیت پاسخ سیستم تقریباً به طور کامل به نسبت میرایی ζ وابسته است. تأثیر مقدار ω_n فقط در تنظیم مقیاس زمانی ظاهر می‌شود.

اگر ζ بزرگتر از ۱ باشد، هر دو مقدار ویژه، حقیقی و منفی هستند؛ اگر ζ مساوی ۱ باشد، هر دو مقدار ویژه، مساوی $-\omega_n$ و اگر ζ کوچکتر از ۱ باشد، مقادیر ویژه، مختلط مزدوج و به صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} \lambda &= -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \\ &= \sigma \pm j\omega \end{aligned} \qquad (۱۲ ـ ۱۳ م)$$

موقعیت مقادیر ویژه در صفحهٔ مختلط نسبت به ζ و ω_n در شکل ۱۲ ـ ۲ م نشان داده شده است:

نخست ویژگیهای سیستم مرتبه دوم را بررسی کرده، شکل مسیرهای حالت را در نزدیک نقاط منفرد مورد بحث قرار می‌دهیم. سپس حالتی را که در آن هر دو مقدار ویژه، حقیقی و منفی باشند (با λ_2 بزرگتر از λ_1، ولی با λ_1 نه خیلی دور از λ_2) به طور تفصیلی بررسی می‌کنیم:



زاویهٔ مبرایی θ
$= \cos^{-1}\zeta$
$= \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)$

شکل ۱۲ ـ ۲ م

معادلات حالت به صورت نرمال با مغادلات زیر داده می‌شوند:

$$\dot{z}_1 = \lambda_1 z_1 \qquad (۱۲ ـ ۱۴ م)$$

$$\dot{z}_2 = \lambda_2 z_2 \qquad (۱۲ ـ ۱۵ م)$$

از اینرو:

$$\frac{\dot{z}_2}{\dot{z}_1} = \frac{dz_2}{dz_1} = \frac{\lambda_2 z_2}{\lambda_1 z_1} \qquad (۱۲ ـ ۱۶ م)$$

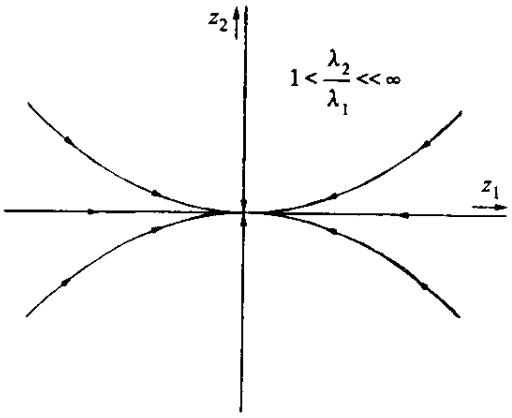
با انتگرالگیری داریم:

$$z_2 = c\, z_1^{\lambda_2/\lambda_1} \qquad (۱۲ ـ ۱۷ م)$$

که در آن c یک ثابت دلخواه وابسته به شروط اولیه است. منحنیهای نشان‌دهندهٔ معادلهٔ بالا در صفحه $z_1 - z_2$ معمولاً سهموی بوده، که صورت دقیق آنها با نسبت λ_2/λ_1 و ثابت c تعیین می‌شود. شیب منحنی به صورت زیر داده می‌شود:

$$\frac{dz_2}{dz_1} = c\,\frac{\lambda_2}{\lambda_1} z_1^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}-1} \qquad (۱۲ ـ ۱۸ م)$$

در نزدیکیِ مبدأ، چون $\lambda_2/\lambda_1 < 1$ است، به ازای $z_1 \longrightarrow 0$، $\frac{dz_2}{dz_1}$ نیز به سمت صفر میل می‌کند. مسیرهای نوعی در صفحه فاز با مختصات «نرمال» به صورت نشان داده شده در شکل ۱۲ ـ ۳ م می‌باشد.



شکل ۱۲ ـ ۳ م

منحنیها مکانهایی از نقاط راکه به وسیلهٔ مقادیر متناظر z_1 و z_2 تعیین می‌شود، نشان می‌دهد. هنگامی که متغیر مستقل t افزایش می‌یابد، نقطهٔ نشان‌دهندهٔ مقادیر لحظه‌ای z_1 و z_2 بر روی منحنی در جهت نوک پیکانها حرکت می‌کند. شروط اولیه، مقدار c و ناحیه‌ای راکه پاسخ خاص در آن قرار دارد، تعیین می‌کند. از آنجاکه ریشه‌ها منفی هستند، هر دو z_1 و z_2 کاهش یافته، در نهایت با افزایش t، به صفر خواهند رسید. این نقطهٔ منفرد یک گره پایدار[1] نامیده می‌شود.

اگر شروط اولیه به‌گونه‌ای باشد که یکی از متغیرهای z_1 و z_2 مساوی صفر شود، این متغیر در صفر باقی خواهد ماند، و منحنی پاسخ بر روی محور z_1 (یا z_2) خواهد بود. در این صورت محورها حالات خاص منحنیهای پاسخ را متناظر با شروط اولیه خاص نشان می‌دهند.

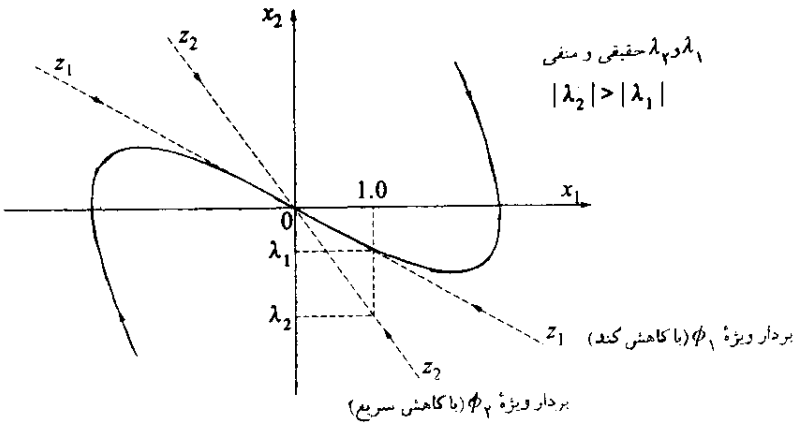
نمودارهای متناظر در صفحه $x_1 - x_2$ در شکل ۱۲ ـ ۴ م نشان داده شده است. خطهای متناظر با z_1 و z_2 بر روی این صفحه بر طبق تبدیل $\mathbf{x} = \Phi \mathbf{z}$ مورب شده‌اند.

اگر ورودی v_1 صفر بوده، و شروط اولیه چنان باشد که (x_1 ، x_2) بر روی یکی از بردارهای ویژه قرار داشته باشد، بردار حالت در همان جهت باقی مانده، ولی اندازهٔ آن با عامل $e^{\lambda_1 t}$ یا $e^{\lambda_2 t}$ (بسته به مورد) تغییر پیدا می‌کند.

اگر بردار نشان‌دهندهٔ شرط اولیه، بردار ویژه نباشد، می‌توان آن را با ترکیب خطی دو بردار ویژه نشان داد. و پاسخ مدار مجموع این دو پاسخ خواهد بود. با افزایش زمان، مؤلفهٔ در جهت بردار

1. Stable Node

ویژه ϕ_2 کم اهمیت‌تر خواهد شد زیرا $e^{\lambda_2 t}$ سریعتر از $e^{\lambda_1 t}$ کاهش می‌یابد. از این رو همواره مسیرها در جهت ϕ_1 به مبدأ نزدیک خواهند شد مگر آنکه مؤلفهٔ این بردار ویژه از اول صفر باشد. اگر بردارهای ویژه، حقیقی نباشند، چنین تعبیر فیزیکی ساده‌ای از بردارهای ویژه امکان‌پذیر نخواهد بود.



شکل ۱۲ ـ ۴ م

۱۲ ـ ۲ ـ ۹ محاسبهٔ مقادیر ویژه

در مثال بالا، مقادیر ویژه را با حل معادلهٔ مشخصهٔ سیستم محاسبه کردیم. از آنجا که یک سیستم ساده مرتبه دوم را تحلیل می‌کردیم این کار امکان‌پذیر بود. اما برای سیستمهای مرتبهٔ بالاتر با مقادیرویژه‌ای بااندازه‌های بسیار متفاوت، این روند به شکست خواهد انجامید. روشی که به‌طور وسیع برای محاسبهٔ مقادیر ویژه ماتریسهای غیر متقارنِ حقیقی به کار گرفته می‌شود روش تبدیل QR است که نخستین بار جی. ج. اف فرانسیس[1] [۳] آن را مطرح کرده است. این روش، از نظر عددی پایدار، مقاوم، و از نظر همگرایی سریع است. این روش در تعدادی از نرم‌افزارهای همه کارهٔ عمومی بسیار خوب استفاده شده است و به طور موفقیت‌آمیزی در تحلیل پایداری سیگنال کوچک سیستمهای قدرت با چند صد حالت به کار رفته است. بردارهای ویژهٔ راست را

1. J.G.F. Francis

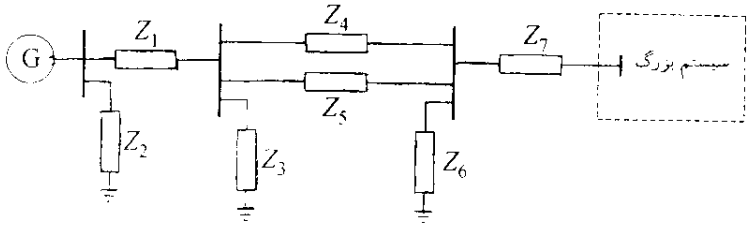
می‌توان با استفاده از روش تکرار معکوس محاسبه کرد. توصیف خوبی از روشهای تبدیل QR و تکرار معکوس در مرجع ۴ آمده است.

برای سیستمهای بزرگ که شامل چند هزار حالت است، روش QR را نمی‌توان برای محاسبهٔ مقادیر ویژه استفاده کرد. دلیل این موضوع و توصیفی از روشهای ویژهٔ تحلیل مقدارهای ویژه در سیستمهای بسیار بزرگ در بخش ۱۲ ـ ۸ خواهد آمد.

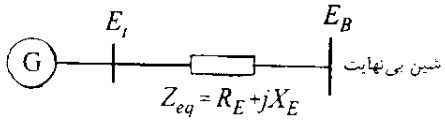
۱۲ ـ ۳ پایداری سیگنال کوچک یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت

در این بخش عملکرد سیگنال کوچک یک سیستم تک ماشینه را که از طریق خطوط انتقال به سیستمی بزرگ متصل شده را مطالعه خواهیم کرد. ترکیب کلی سیستم در شکل ۱۲ ـ ۳ «الف» نشان داده شده است. تحلیل سیستمهایی با چنین ترکیب ساده‌ای در فهم آثار و مفاهیم اولیه بسیار سودمند است. بعد از درک جنبه‌های فیزیکی پدیده و تحصیل تجربه با روشهای تحلیلی، با استفاده از سیستمهای مرتبه پایین، در موقعیت بهتری برای برخورد با سیستمهای پیچیدهٔ بزرگ خواهیم بود.

به منظور تحلیل، سیستم شکل ۱۲ ـ ۳ «الف» را می‌توان با بکارگیری معادل تونن شبکهٔ انتقال خارج از ماشین و شبکهٔ انتقال مجاور به صورت شکل ۱۲ ـ ۳ «ب» تقلیل داد. به علت اندازهٔ نسبیِ سیستمی، که توان آن را ماشین فراهم می‌کند، دینامیکِ ماشین تقریباً هیچ تغییری در



(الف) ترکیب کلی



(ب) سیستم معادل

شکل ۱۲ ـ ۳ تک ماشین متصل به سیستم بزرگ از طریق خطوط انتقال

ولتاژ و فرکانس ولتاژ تونن E_B ایجاد نمی‌کند. چنین منبع ولتاژی با ولتاژ و فرکانس ثابت را شین بینهایت[1] می‌نامند.

برای هر وضعیت داده شده سیستم، هنگامی که ماشین دستخوش اغتشاش می‌شود اندازهٔ ولتاژ شین بینهایت E_B ثابت باقی می‌ماند. لیکن، با تغییر وضعیت حالت ـ ماندگار سیستم ممکن است که اندازه E_B تغییر پیدا کند. این موضوع نشان‌دهندهٔ تغییری در نقطهٔ کار شبکهٔ خارجی است.

در قسمتهای بعد، پایداری سیگنال کوچک سیستم شکل ۱۲ ـ ۳ «ب» را همراه با ماشین سنکرون تعریف شده با مدلهایی از درجه‌های مختلف، تحلیل خواهیم کرد. برای این کار، ابتدا با مدل کلاسیک شروع کرده، درجهٔ جزئیات مدل را بتدریج و با در نظر گرفتن اثر دینامیکهای مدار تحریک، سیستم تحریک، و سیم پیچ میرا کننده، افزایش خواهیم داد. در هر مورد، عباراتی برای عناصر ماتریس حالت به صورت توابع صریحی از پارامترهای سیستم به دست خواهیم آورد. این کار در روشن کردن اثر عوامل مختلف ناشی از ماشین سنکرون بر روی پایداری سیستم کمک خواهد کرد. علاوه بر نمایش فضای حالت و تحلیل مُدال، از نمایش نمودار بلوکی و روابط گشتاور ـ زاویه برای تحلیل مشخصه‌های پایداری سیستم استفاده خواهیم کرد. روش نمودار بلوکی را برای نخستین بار هفرون وفیلیپس [۵] و سپس دِمِلو وکونکوردیا [۶] برای تحلیل پایداری سیگنال کوچک ماشینهای سنکرون به کار گرفتند. گرچه این روش برای مطالعهٔ مشروح سیستمهای بزرگ مناسب نیست، لیکن برای به دست آوردن درکی فیزیکی از تأثیر دینامیکهای مدار تحریک و نیز در به وجود آوردن پایه‌ای برای فهم روشهای بهبود پایداری از طریق کنترل تحریک سودمند است.

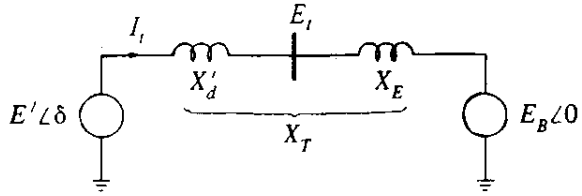
۱۲ ـ ۳ ـ ۱ ژنراتور نمایش داده شده با مدل کلاسیک

با ژنراتور نمایش داده شده با مدل کلاسیک (بخش ۵ ـ ۳ ـ ۱ را ببینید) و نادیده گرفتن از کلیه مقاومتها، نمایش سیستم به صورت نشان داده شده در شکل ۱۲ ـ ۴ در می‌آید. در اینجا E' ولتاژ متصل به X'_d است و فرض می‌شود که اندازهٔ آن در مقدار پیش از بروز اغتشاش ثابت باقی بماند. فرض کنید که δ زاویه‌ای باشد که E' ولتاژ شین بینهایت نسبت به E_B پیش است. در این صورت با نوسان روتور در طی بروز اغتشاش، δ تغییر می‌کند.

با در نظر گرفتن E' به عنوان فازور مرجع، داریم:

1. Infinite Bus

$$\tilde{E}' = E_{to} + jX'_d \tilde{I}_{to}$$
$$X_T = X'_d + X_E$$



شکل ۱۲ ـ ۴

$$\tilde{I}_t = \frac{E'\angle 0^\circ - E_B\angle -\delta}{jX_T} = \frac{E' - E_B(\cos\delta - j\sin\delta)}{jX_T} \qquad (۶۹ - ۱۲)$$

توان مختلط متصل به X'_d به صورت زیر داده می‌شود:

$$S' = P + jQ' = \tilde{E}'\tilde{I}_t^*$$

$$= \frac{E'E_B\sin\delta}{X_T} + j\frac{E'(E' - E_B\cos\delta)}{X_T} \qquad (۷۰ - ۱۲)$$

با درنظر نگرفتن مقاومت استاتور، توان فاصلهٔ هوایی (P_e) با توان پایانهٔ (P) برابر می‌باشد و در مبنای واحد، گشتاور فاصله هوایی با توان فاصلهٔ هوایی برابر است (بخش ۵ ـ ۱ ـ ۲ ر ۱ ببینید). از این رو داریم:

$$T_e = P = \frac{E'E_B}{X_T}\sin\delta \qquad (۷۱ - ۱۲)$$

خطی سازی حول نقطهٔ کار نشان داده شده با $\delta = \delta_0$، نتیجه می‌دهد:

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial\delta}\Delta\delta = \frac{E'E_B}{X_T}\cos\delta_0\,(\Delta\delta) \qquad (۷۲ - ۱۲)$$

معادلات حرکت (معادلات ۳ ـ ۲۰۹ و ۳ ـ ۲۱۰ از فصل ۳) در مبنای واحد عبارت است از:

$$P\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_D\Delta\omega_r) \qquad (۷۳ - ۱۲)$$

$$P\delta = \omega_{\circ}\,\Delta\omega_r \qquad (۷۴ - ۱۲)$$

که در آن $\Delta\omega_r$ انحراف سرعت در مبنای واحد، δ زاویهٔ روتور[1] برحسب رادیان الکتریکی، $\omega_{\circ}$ سرعت مبنای زاویه‌ای روتور برحسب رادیان بر ثانیه، و P عملگر دیفرانسیلی d/dt با زمان t بر ثانیه است.

با خطی‌سازی معادلهٔ ۱۲ ـ ۷۳ و جایگزینیِ ΔT_e داده شده با معادلهٔ ۱۲ ـ ۷۲، بدست می‌آوریم:

$$P\,\Delta\omega_r = \frac{۱}{۲H}\left[\Delta T_m - K_s\,\Delta\delta - K_D\,\Delta\omega_r\right] \qquad (۷۵ - ۱۲)$$

که در آن k_s ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ داده شده با معادله زیر است:

$$K_s = \left[\frac{E'\,E_B}{X_T}\right]\cos\delta_{\circ} \qquad (۷۶ - ۱۲)$$

از خطی‌سازی معادلهٔ ۱۲ ـ ۷۴، داریم:

$$P\,\Delta\delta = \omega_{\circ}\,\Delta\omega_r \qquad (۷۷ - ۱۲)$$

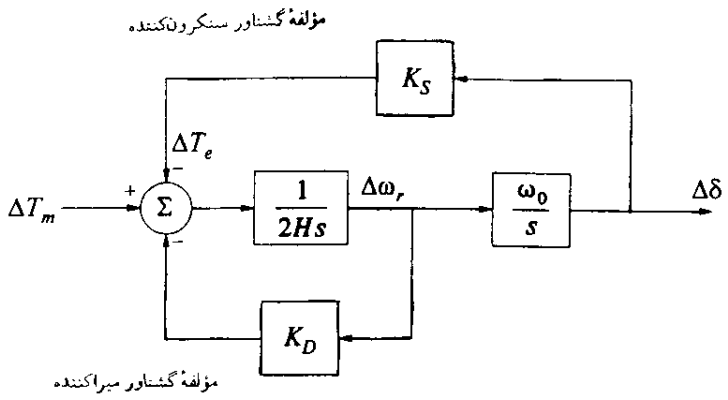
با نوشتن معادلات ۱۲ ـ ۷۵ و ۱۲ ـ ۷۷ به صورت بردار ـ ماتریسی، به دست می‌آوریم:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}\Delta\omega_r\\ \Delta\delta\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}-\frac{K_D}{۲H} & -\frac{K_s}{۲H}\\ \omega_{\circ} & \circ\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\omega_r\\ \Delta\delta\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\frac{۱}{۲H}\\ \circ\end{pmatrix}\Delta T_m \qquad (۷۸ - ۱۲)$$

که به صورت $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{b}u$ است و مشاهده می‌شود که عناصر ماتریس $\mathbf{A}$ به پارامترهای سیستم K_D، H، X_T و شروط اولیهٔ نشان داده شده با مقادیر E' و $\delta_{\circ}$، بستگی دارند. می‌توان از نمایش نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۵ برای توصیف عملکرد سیگنال کوچک استفاده کرد.

---

۱. همان‌طور که در بخش ۵ ـ ۳ ـ ۱ بحث شد، در مدل کلاسیک ژنراتور، می‌توان از زاویهٔ E' نسبت به یک فازور مرجع چرخشی سنکرون به عنوان معیاری از زاویهٔ روتور استفاده شود. در اینجا E_B را به عنوان مرجع انتخاب کرده‌ایم، و زاویهٔ روتور δ به عنوان زاویه‌ای که توسط آن E' به صورت پیش فاز نسبت به E_B است، اندازه‌گیری شده است.



K_s = ضریب گشتاور سنکرون کننده برحسب مبنای واحد گشتاور بر رادیان

K_D = ضریب گشتاور میراکننده برحسب گشتاور مبنای واحد انحراف سرعت مبنای واحد

H = ثابت لختی برحسب MW.S/MVA

$\Delta\omega_r$ = انحراف سرعت برحسب $(\omega_r - \omega_\circ)/\omega_\circ$

$\Delta\delta$ = انحراف زاویهٔ روتور برحسب رادیان الکتریکی

s = عملگر لاپلاس

$\omega_\circ$ = سرعت ناشی برحسب elec. rad/s = $2\pi/f_\circ$

= ۳۷۷ برای یک سیستم ۶۰ هرتز

شکل ۱۲ ـ ۵ نمودار بلوکی سیستم تک ماشینهٔ متصل به شین بینهایت با مدل کلاسیک ژنراتور

از نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۵ داریم:

$$\Delta\delta = \frac{\omega_\circ}{s}\left[\frac{1}{2Hs}(-K_s\Delta\delta - K_D\Delta\omega_r + \Delta T_m)\right]$$

$$= \frac{\omega_\circ}{s}\left[\frac{1}{2Hs}\left(-K_s\Delta\delta - K_D s\frac{\Delta\delta}{\omega_\circ} + \Delta T_m\right)\right] \qquad (۷۹ - ۱۲)$$

از مرتب کردن این رابطه نتیجه می‌شود:

$$s^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H}s(\Delta\delta) + \frac{K_s}{2H}\omega_\circ(\Delta\delta) = \frac{\omega_\circ}{2H}\Delta T_m$$

بنابراین، معادلهٔ مشخصه به صورت زیر داده می‌شود:

$$s^2 + \frac{K_D}{2H}s + \frac{K_s\omega_\circ}{2H} = 0 \qquad (۸۰ - ۱۲)$$

که به صورت کلی زیر است:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

بنابراین، فرکانس طبیعی میرانشده عبارت است از:

$$\omega_n = \sqrt{K_s \frac{\omega_0}{2H}} \quad \text{rad/s} \qquad (۸۱ - ۱۲)$$

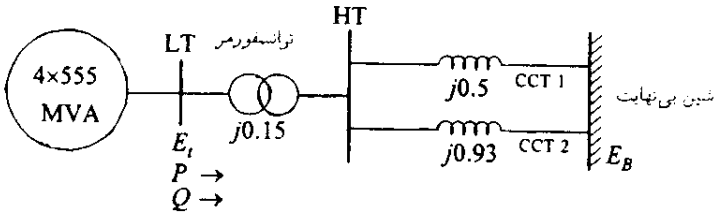
و نسبت میرایی برابر است با:

$$\zeta = \frac{1}{2}\frac{K_D}{2H\omega_n} = \frac{1}{2}\frac{K_D}{\sqrt{K_s 2H\omega_0}} \qquad (۸۲ - ۱۲)$$

با افزایش ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ K_s، فرکانس طبیعی افزایش یافته و نسبت میرایی کاهش می‌یابد. از سویی افزایش ضریب گشتاور میراکنندهٔ K_D نسبت میرایی را افزایش داده، حال آنکه افزایش در ثابت لختی هر دو ω_n و ζ را کاهش می‌دهد.

مثال ۱۲ ـ ۲

شکل ۱۲ ـ ۵ م سیستمی قابل اعمال به نیروگاهی حرارتی (تشکیل شده از چهار واحد ۵۵۵ MVA، ۲۴ KV، ۶۰ Hz) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ ـ ۵ م

راکتانسهای شبکهٔ نشان داده شده در شکل، در مبنای واحد برپایهٔ مقادیر ۲۲۲۰ MVA، ۲۴ KV هستند (به طرف فشار ضعیف ترانسفورمر بالابرنده ارجاع شده است) و فرض شده مقاومتها قابل چشمپوشی باشند. هدف از این مثال، تحلیل مشخصه‌های پایداری سیگنال کوچکِ سیستم، حول

نقطهٔ کار حالت ـ ماندگار به دنبال از دست دادن مدار ۲ می‌باشد. وضعیت پیش از خطای سیستم در مبنای واحد بر پایهٔ مقادیر ۲۲۲۰ MVA، ۲۴ KV به صورت زیر است:

$P = ۰/۹ \quad Q = ۰/۳$ (فوق تحریک) $\quad E_t = ۱/۰ \angle ۳۶^\circ \quad E_B = ۰/۹۹۵ \angle ۰^\circ$

ژنراتورها به صورت یک ژنراتور معادل منفرد توصیف شده در مبنای واحد بر پایهٔ مقادیر ۲۲۲۰ MVA، ۲۴ KV مدل می‌شوند:

$$X'_d = ۰/۳ \quad H = ۳/۵ \quad \text{MWS/MVA}$$

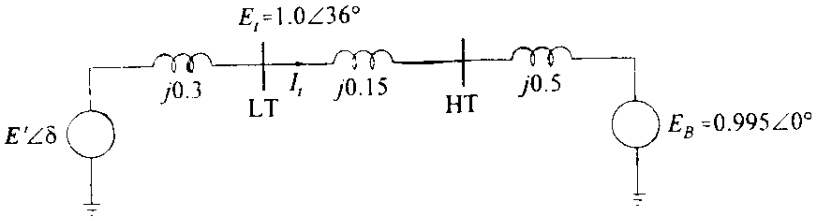
الف) معادلات حالت خطی شدهٔ سیستم را بنویسید. مقادیر ویژه، فرکانس میرا شدهٔ نوسان (برحسب Hz)، نسبت میرایی و فرکانس طبیعی غیر میرا را برای هر یک از مقادیر ضریب میرایی (برحسب سرعت مبنای واحد بر گشتاور مبنای واحد) تعیین کنید:

$$(i)\ K_D = ۰ \qquad (ii)\ K_D = -۱۰/۰ \qquad (iii)\ K_D = ۱۰/۰$$

ب) برای حالتی که $K_D = ۱۰/۰$ باشد، بردارهای ویژهٔ چپ و راست، و ماتریس مشارکت را پیدا کنید. اگر در $t = ۰$، $\Delta\delta = ۵^\circ$ و $\Delta\omega = ۰$ باشد، پاسخ زمانی را تعیین کنید.

حل

الف) شکل ۱۲ ـ ۶ م، مدل مدار نشان‌دهندهٔ نقطهٔ کار حالت ـ ماندگار را پس از بروز خطا با کلیهٔ پارامترهای توصیف شده در مبنای واحد بر پایهٔ ۲۲۲۰ MVA نشان می‌دهد:



شکل ۱۲ ـ ۶ م

با در نظر گرفتن E_t به عنوان فازور مرجع، جریان استاتور ژنراتور به صورت زیر داده می‌شود:

$$\tilde{I}_t = \frac{(P + jQ)^*}{E_t^*} = \frac{۰/۹ - j\,۰/۳}{۱/۰}$$

$$= ۰/۹ - j\,۰/۳ \quad \text{Pu}$$

ولتاژ متصل به راکتانس گذرا عبارت است از:

$$\tilde{E}' = \tilde{E}_t + jX'_d \tilde{I}_t$$
$$= ۱/۰ + j\,۰/۳\,(۰/۹ - j\,۰/۳)$$
$$= ۱/۰۹ + j\,۰/۲۷ = ۱/۱۲۳ \angle ۱۳/۹۲^\circ \quad pu$$

زاویه پیش فاز بودن E'، نسبت به E_B عبارت است از:

$$\delta_\circ = ۱۳/۹۲^\circ + ۳۶^\circ = ۴۹/۹۲^\circ$$

مجموع راکتانس سیستم خواهد شد:

$$X_T = ۰/۳ + ۰/۱۵ + ۰/۵ = ۰/۹۵ \ pu$$

ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ متناظر، از معادلهٔ ۱۲ ـ ۷۶، برابر است با:

$$K_s = \frac{E' E_B}{X_T} \cos \delta_\circ$$
$$= \frac{۱/۱۲۳ \times ۰/۹۹۵}{۰/۹۵} \cos ۴۹/۹۲^\circ$$
$$= ۰/۷۵۷ \quad pu \qquad \text{گشتاور بر رادیان}$$

بنابراین معادلات حالت خطی شده عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{۲H} & -\frac{K_S}{۲H} \\ \omega_\circ & ۰ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{۱}{۲H} \\ ۰ \end{bmatrix} \Delta T_m$$

$$= \begin{bmatrix} -۰/۱۴۳\,K_D & -۰/۱۰۸ \\ ۳۷۷/۰ & ۰ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ۰/۱۴۳ \\ ۰ \end{bmatrix} \Delta T_m$$

مقادیر ویژهٔ ماتریس حالت به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{vmatrix} -۰/۱۴۳\,K_D - \lambda & -۰/۱۰۸ \\ ۳۷۷/۰ & -\lambda \end{vmatrix} = 0$$

یا:

$$\lambda^۲ + ۰/۱۴۳\,K_D \lambda + ۴۰/۷۹ = ۰$$

و با مقایسه با شکل استاندارد ذیل:

$$\lambda^۲ + ۲\xi\omega_n \lambda + \omega_n^۲ = ۰$$

خواهیم داشت:

$$\omega_n = \sqrt{۴۰/۷۹} = ۶/۳۸۷ \text{ rad/s} = ۱/۰۱۶۵ \text{ Hz}$$
$$\xi = ۰/۱۴۳ K_D / (۲ \times ۶/۳۸۷) = ۰/۰۱۱۲ K_D$$

پس مقادیر ویژه عبارتند از:

$$\lambda_۱ \text{ و } \lambda_۲ = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{۱ - \xi^۲}$$

فرکانس میرا شده خواهد شد:

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{۱ - \xi^۲}$$

در زیر نتایج خواسته شده برای مقادیر مختلف K_D آورده شده است:

K_D	۰	۱۰	−۱۰
مقادیر ویژه λ	۰ ± j ۶/۳۹	−۰/۷۱۴ ± j ۶/۳۵	۰/۷۱۴ ± j ۶/۳۶
فرکانس میرا ω_d	۱/۰۱۶۵ Hz	۱/۰۱۰۱ Hz	۱/۰۱۰۱ Hz
نسبت میرایی ξ	۰	۰/۱۱۲	−۰/۱۱۲
فرکانس طبیعی غیر میرا ω_n	۱/۰۱۶۵ Hz	۱/۰۱۶۵ Hz	۱/۰۱۶۵ Hz

ب) بردارهای ویژهٔ راست به صورت زیر داده می‌شود:

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I})\phi = ۰$$

برای سیستم داده شده، با $K_D = ۱۰$، معادلهٔ بالا چنین می‌شود:

$$\begin{bmatrix} -۱/۴۳ - \lambda_۱ & -۰/۱۰۸ \\ ۳۷۷/۰ & -\lambda_۱ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{۱۱} \\ \phi_{۲۱} \end{bmatrix} = ۰$$

برای $\lambda = -۰/۷۱۴ + j\,۶/۳۵$، معادلات متناظر عبارت است از:

$$(۰/۷۱۴ + j\,۶/۳۵)\phi_{۱۱} + ۰/۱۰۸\phi_{۲۱} = ۰$$
$$۳۷۷/۰\,\phi_{۱۱} + (۰/۷۱۴ - j\,۶/۳۵)\phi_{۲۱} = ۰$$

معادلات بالا مستقل خطی نیستند. همان‌طور که در مثال ۱۲ ـ ۱ بحث شد، باید یکی از

عناصر بردار ویژه متناظر با یک مقدار ویژه را به دلخواه انتخاب کرد. بنابراین، با فرض:

$$\phi_{۲۱} = ۱/۰$$

داریم:

$$\phi_{۱۱} = -\ ۰/۰۰۱۹ + j\ ۰/۰۱۶۸$$

به طور مشابهی، بردار ویژهٔ متناظر با $\lambda_۲ = -\ ۰/۷۱۴ - j\ ۶/۳۵$ عبارت است از:

$$\phi_{۲۲} = ۱/۰ \qquad \phi_{۱۲} = -\ ۰/۰۰۱۹ - j\ ۰/۰۱۶۸$$

لذا ماتریس مُدال بردار ویژهٔ راست عبارت است از:

$$\Phi = \begin{pmatrix} -\ ۰/۰۰۱۹ + j\ ۰/۰۱۶۸ & -\ ۰/۰۰۱۹ - j\ ۰/۰۱۶۸ \\ ۱/۰ & ۱/۰ \end{pmatrix}$$

بردارهای ویژهٔ چپ‌نرمالیزه شده به صورت $\psi_۱ \phi_۱ = ۱/۰$ عبارت است از:

$$\Psi = \Phi^{-۱} = \frac{\mathrm{adj}(\Phi)}{|\Phi|}$$

$$= \frac{\begin{pmatrix} ۱/۰ & -\ ۱/۰ \\ ۰/۰۰۱۹ + j\ ۰/۰۱۶۸ & -\ ۰/۰۰۱۹ + j\ ۰/۰۱۶۸ \end{pmatrix}^T}{(-\ ۰/۰۰۱۹ + j\ ۰/۰۱۶۸ + ۰/۰۰۱۹ + j\ ۰/۰۱۶۸)}$$

$$= \begin{pmatrix} -\ j\ ۲۹/۷۶ & ۰/۵ - j\ ۰/۰۵۶ \\ j\ ۲۹/۷۶ & ۰/۵ + j\ ۰/۰۵۶ \end{pmatrix}$$

ماتریس مشارکت برابر می‌شود با:

$$P = \begin{pmatrix} \phi_{۱۱}\psi_{۱۱} & \phi_{۱۲}\psi_{۲۱} \\ \phi_{۲۱}\psi_{۱۲} & \phi_{۲۲}\psi_{۲۲} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} ۰/۵ + j\ ۰/۰۵۶ & ۰/۵ - j\ ۰/۰۵۶ \\ ۰/۵ - j\ ۰/۰۵۶ & ۰/۵ + j\ ۰/۰۵۶ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ۰/۵۰۳\ \angle ۶/۴^\circ & ۰/۵۰۳\ \angle -\ ۶/۴^\circ \\ ۰/۵۰۳\ \angle -\ ۶/۴^\circ & ۰/۵۰۳\ \angle ۶/۴^\circ \end{pmatrix}$$

۱۲ ـ ۳ ـ ۲ اثر دینامیکهای مدار تحریک ماشین سنکرون

اکنون عملکرد سیستم شامل اثر تغییرات شار تحریک را بررسی می‌کنیم. در اینجا از اثر سیم پیچ λ میرا کننده چشمپوشی می‌شود و ولتاژ تحریک ثابت فرض خواهد شد (کنترل تحریک دستی).

اینک مدل فضای حالت سیستم را نخست با کاهش معادلات ماشین سنکرون به شکل مناسب و سپس ترکیب آنها با معادلات شبکه، به دست خواهیم آورد. زمان را بر حسب ثانیه، زوایا را بر حسب رادیان الکتریکی، و سایر متغیرها را در مبنای واحد بیان خواهیم کرد.

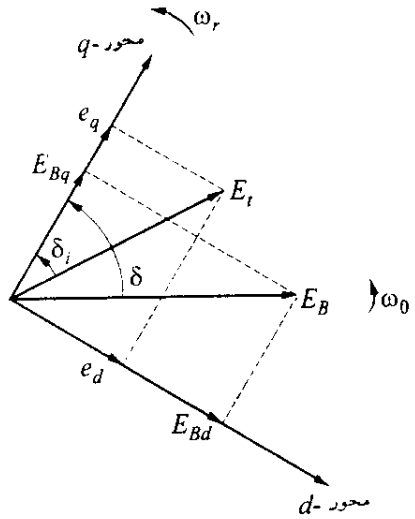
معادلات ماشین سنکرون

همانند حالت مدل کلاسیک ژنراتور، معادلات شتاب عبارتند از:

$$P\,\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}\left(T_m - T_e - K_D\,\Delta\omega_r\right) \qquad (۸۳ ـ ۱۲)$$

$$P\,\delta = \omega_0\,\Delta\omega_r \qquad (۸۴ ـ ۱۲)$$

که در آن $\omega_0 = 2\pi f_0$ رادیان الکتریکی بر ثانیه است. در این حالت، زاویهٔ روتور δ، زاویه‌ای است (برحسب‌رادیان‌الکتریکی) که محور q نسبت به‌مرجع E_B پیش‌است. همان‌طور که در شکل ۱۲ ـ ۶ نشان داده شده است، زاویهٔ روتور δ، مجموع زاویهٔ داخلی δ_i (بخش ۳ ـ ۶ ـ ۳ را ببینید)



شکل ۱۲ ـ ۶

و پاسخ زمانی به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{pmatrix}\Delta\omega_r(t)\\ \Delta\delta(t)\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\phi_{11} & \phi_{12}\\ \phi_{21} & \phi_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}c_1 e^{\lambda_1 t}\\ c_2 e^{\lambda_2 t}\end{pmatrix}$$

که با فرض (رادیان) $\Delta\delta = 5^\circ = 0/0873$ و $\Delta\omega_r = 0$ در $t = 0$، داریم:

$$\begin{pmatrix}c_1\\ c_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\psi_{11} & \psi_{12}\\ \psi_{21} & \psi_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\omega_r(0)\\ \Delta\delta(0)\end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix}-j\,29/76 & 0/5 - j\,0/056\\ j\,29/76 & 0/5 - j\,0/056\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\ 0/0873\end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix}0/0436 - j\,0/0049\\ 0/0436 + j\,0/0049\end{pmatrix}$$

پاسخ زمانی انحراف سرعت عبارت است از:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_r(t) &= \phi_{11} c_1 e^{\lambda_1 t} + \phi_{12} c_2 e^{\lambda_2 t}\\ &= (-0/0019 + j\,0/0168)(0/0436 - j\,0/0049)\,e^{(-0/714 + j\,6/35)t} +\\ &\quad (-0/0019 - j\,0/0168)(0/0436 + j\,0/0049)\,e^{(-0/714 - j\,6/35)t}\\ &= -0/0015\, e^{-0/714 t}\sin(6/35\, t) \quad \text{pu}\end{aligned}$$

به طور مشابه، پاسخ زمانی انحراف زاویهٔ روتور عبارت است از:

$$\Delta\delta(t) = 0/088\, e^{-0/714 t}\cos(6/35\, t - 0/112)$$

پس با سیستمی مرتبه دوم با یک مُد نوسانی پاسخ با فرکانس میرا شدهٔ ۶/۳۵ رادیان بر ثانیه یا ۱/۰۱۰۱ هرتز سر و کار داریم. نوسانها با ثابت زمانیِ $\frac{1}{0/714}$ ثانیه از بین خواهند رفت، (که متناظر با نسبت میرایی ζ، ۰/۱۱۲ است). از آنجا که این، یک مُد زاویهٔ روتور است، $\Delta\omega_r$ و $\Delta\delta$ به‌طور مساوی در آن مشارکت دارند.

شاردورهای استاتور و روتور، به‌صورت زیر داده می‌شوند:

$$\psi_d = -L_l i_d + L_{ads}(-i_d + i_{fd}) = -L_l i_d + \psi_{ad} \qquad (۸۶ - ۱۲)$$

$$\psi_q = -L_l i_q + L_{aqs}(-i_q) = -L_l i_q + \psi_{aq} \qquad (۸۷ - ۱۲)$$

$$\psi_{fd} = L_{ads}(-i_d + i_{fd}) + L_{fd} i_{fd} = \psi_{ad} + L_{fd} i_{fd} \qquad (۸۸ - ۱۲)$$

در معادلات بالا ψ_{ad} و ψ_{aq} شاردور (متقابل) فاصلهٔ هوایی بوده، و L_{ads} و L_{aqs} مقادیر اشباع‌شدهٔ اندوکتانس‌های متقابل است.

به کمک معادلهٔ (۱۲ ـ ۸۸)، می‌توان جریان تحریک را به صورت زیر بیان کرد:

$$i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{ad}}{L_{fd}} \qquad (۸۹ - ۱۲)$$

شاردور متقابل محور d را نیز می‌توان برحسب ψ_{fd} و i_d به صورت زیر نوشت:

$$\psi_{ad} = -L_{ads} i_d + L_{ads} i_{fd}$$

$$= -L_{ads} i_d + \frac{L_{ads}}{L_{fd}}(\psi_{fd} - \psi_{ad}) \qquad (۹۰ - ۱۲)$$

$$= L'_{ads}\left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}}\right)$$

که در آن:

$$L'_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}}} \qquad (۹۱ - ۱۲)$$

ازآنجاکه‌مدارهای‌روتوردرمحور q درنظرگرفته‌نشده‌اند، شاردورمتقابل‌به‌صورت‌ذیل‌داده‌می‌شود:

$$\psi_{ad} = -L_{aqs} i_q \qquad (۹۲ - ۱۲)$$

و زاویه‌ای است که E_t نسبت به E_B پیش است. برای شناسایی موقعیت روتور نسبت به یک مرجع مناسب و دنبال کردن آن به هنگام بروز نوسانهای روتور، به یک راه حل مناسب نیازمندیم. همان‌طور که در فصل ۳ (بخش ۳ ـ ۶) بحث شد، هنگامی که دینامیکهای مدارهای روتور در مدل ماشین نشان داده شوند، محور q این مناسبت را خواهد داد. انتخاب E_B به عنوان مرجع اندازه‌گیریِ زاویهٔ روتور نیز از نظر پاسخ معادلات شکبه مناسب است.

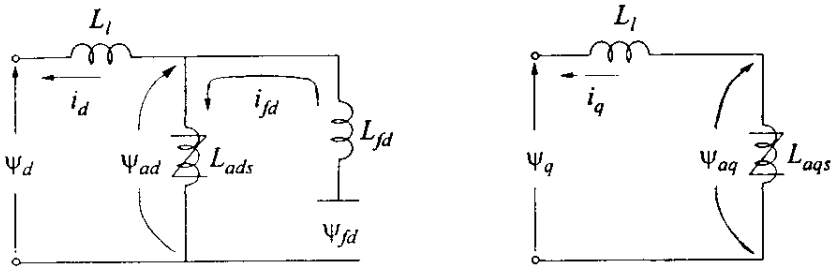
معادلات در مبنای واحد ماشین سنکرون در بخش ۳ ـ ۴ ـ ۹ خلاصه شد و ساده‌سازیهای اصلی برای مطالعات پایداری مقیاس بزرگ در بخش ۵ ـ ۱ مورد بحث قرار گرفتند. از معادله ۵ ـ ۱۰، با زمان t برحسب ثانیه به جای منبای واحد، معادلهٔ دینامیک مدار تحریک عبارت است از:

$$P\psi_{fd} = \omega_\circ (e_{fd} - R_{fd} i_{fd})$$

$$= \frac{\omega_\circ R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} - \omega_\circ R_{fd} i_{fd} \qquad (۸۵ ـ ۱۲)$$

که در آن E_{fd} ولتاژ خروجی تحریک کننده است که در بخش ۸ ـ ۶ ـ ۱ تعریف شده است. معادلات ۱۲ ـ ۸۳ تا ۱۲ ـ ۸۵ دینامیک ماشین سنکرون را با $\Delta\omega_r$، δ، و ψ_{fd} به عنوان متغیرهای حالت، توصیف می‌کند. لیکن، مشتقات متغیرهای حالت در این معادلات به صورت توابعی از T_e و i_{fd} ظاهر شده است، که نه متغیر حالت و نه متغیر ورودی هستند. به منظور به دست آوردن معادلات کامل سیستم به صورت فضای حالت، لازم است i_{fd} و T_e را برحسب متغیرهای حالت تعیین شده توسط معادلات شار دور ماشین و معادلات شبکه، بیان کنیم.

با نادیده گرفتن سیم‌پیچهای میراکننده، مدارهای معادل ارتباطی بین شار دور ماشین و جریانها در شکل ۱۲ ـ ۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ ـ ۷

از تجزیهٔ مؤلفه‌های d و q نتیجه می‌شود:

$$e_d = R_E i_d - X_E i_q + E_{Bd} \qquad (۹۹ - ۱۲)$$

$$e_q = R_E i_q + X_E i_d + E_{Bq} \qquad (۱۰۰ - ۱۲)$$

که در آن

$$E_{Bd} = E_B \sin\delta \qquad (۱۰۱ - ۱۲)$$

$$E_{Bq} = E_B \cos\delta \qquad (۱۰۲ - ۱۲)$$

با بکارگیری معادله‌های ۱۲ ـ ۹۴ و ۱۲ ـ ۹۵ برای حذف e_d، e_q در معادله‌های ۱۲ ـ ۹۹ و ۱۲ ـ ۱۰۰ و بکارگیری عبارات داده شده با معادله‌های ۱۲ ـ ۹۰ و ۱۲ ـ ۹۲ برای ψ_{ad} و ψ'_{aq}، عبارات زیر را برای i_d و i_q برحسب متغیرهای حالت ψ_{fd} و δ به دست می‌آوریم:

$$i_d = \frac{X_{Tq}\left[\psi_{fd}\left(\frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}}\right) - E_B \cos\delta\right] - R_T E_B \sin\delta}{D} \qquad (۱۰۳ - ۱۲)$$

$$i_q = \frac{R_T\left[\psi_{fd}\left(\frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}}\right) - E_B \cos\delta\right] + X_{Td} E_B \sin\delta}{D} \qquad (۱۰۴ - ۱۲)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} R_T &= R_a + R_E \\ X_{Tq} &= X_E + (L_{aqs} + L_l) = X_E + X_{qs} \\ X_{Td} &= X_E + (L'_{aqs} + L_l) = X_E + X'_{ds} \\ D &= R_T^2 + X_{Tq} X_{Td} \end{aligned} \qquad (۱۰۵ - ۱۲)$$

راکتانس‌های X_{qs} و X'_{ds} مقادیر اشباع شده هستند که در مبنای واحد برابر با اندوکتانسهای متناظر می‌باشند.

از معادلات ۱۲ ـ ۱۰۳ و ۱۲ ـ ۱۰۴، همراه با معادلات ۱۲ ـ ۸۹، ۱۲ ـ ۹۰ و ۱۲ ـ ۹۲، می‌توان برای حذف i_{fd} و T_e از معادلات دیفرانسیل ۱۲ ـ ۸۳ تا ۱۲ ـ ۸۵ و بیان آنها برحسب متغیرها استفاده کرد. این معادلات، غیرخطی هستند و باید برای تحلیل سیگنال کوچک، خطی سازی شوند.

گشتاور فاصلهٔ هوایی برابر است با:

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d$$
$$= \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d \qquad (۹۳ - ۱۲)$$

با صرف‌نظر کردن از عبارات $P\psi$ و تغییرات سرعت همان‌طور که در بخش ۵ ـ ۱ بحث شد، معادلات ولتاژ استاتور عبارتند از:

$$e_d = -R_a i_d - \psi_q$$
$$= -R_a i_d + (L_l i_q - \psi_{aq}) \qquad (۹۴ - ۱۲)$$
$$e_q = -R_a i_q + \psi_d$$
$$= -R_a i_q - (L_l i_d - \psi_{ad}) \qquad (۹۵ - ۱۲)$$

به عنوان اولین گام، i_{fd} و T_e را برحسب ψ_{fd}، i_d، i_q، ψ_{ad} و ψ_{ad} بیان کردیم. علاوه بر این، e_d و e_q برحسب این متغیرها بیان شده است که همراه با معادلات شبکه برای به دست آوردن عباراتی برای i_d و i_q برحسب متغیرهای حالت به کار خواهند رفت.

مزایای بکارگیری ψ_{ad} و ψ_{aq} به عنوان متغیرهای واسطه در فرایند حذف، هنگامی که اثر مدارهای سیم پیچ میراکننده را درنظر بگیریم واضحتر خواهد شد.

معادلات شبکه

از آنجا که فقط یک ماشین وجود دارد، می‌توان معادلات ماشین و همینطور معادلات شبکه را برحسب چارچوب مرجعی توصیف کرد، به عبارت دیگر، چارچوب مرجع d - q ماشین.

با مراجعه به شکل ۱۲ ـ ۶، ولتاژهای پایانهٔ ماشین و شین بینهایت برحسب مؤلفه‌های d و q عبارت است از:

$$\tilde{E}_t = e_d + je_q \qquad (۹۶ - ۱۲)$$
$$\tilde{E}_B = E_{Bd} + jE_{Bq} \qquad (۹۷ - ۱۲)$$

معادلهٔ قید شبکه برای سیستم شکل ۱۲ ـ ۳ «ب» عبارت است از:

$$\tilde{E}_t = \tilde{E}_B + (R_E + jX_E)\tilde{I}_t \qquad (۹۸ - ۱۲)$$
$$(e_d + je_q) = (E_{Bd} + jE_{Bq}) + (R_E + jX_E)(i_d + ji_q)$$

با جایگزینی از معادلات ۱۲ ـ ۱۰۶ تا ۱۲ ـ ۱۱۰ برای Δi_d، Δi_q، $\Delta\psi_{ad}$، و $\Delta\psi_{aq}$، به دست می‌آوریم

$$\Delta T_e = K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta\psi_{fd} \qquad (۱۲ - ۱۱۲)$$

که در آن

$$K_1 = n_1 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_1 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) \qquad (۱۲ - ۱۱۳)$$

$$K_2 = n_2 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_2 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) + \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} i_{q0} \qquad (۱۲ - ۱۱۴)$$

با خطی‌سازی معادلات ۱۲ ـ ۸۳ تا ۱۲ ـ ۸۵ و جایگزینی عبارات برای Δi_{fd} و ΔT_e داده شده با معادلات ۱۲ ـ ۱۱۱ و ۱۲ ـ ۱۱۲، معادلات سیستم را به صورت مطلوب نهایی، به شکل ذیل به دست می‌آوریم:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\psi}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \qquad (۱۲ - ۱۱۵)$$

که در آن داریم:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= -\frac{K_D}{2H} \\
a_{12} &= -\frac{K_1}{2H} \\
a_{13} &= -\frac{K_2}{2H} \\
a_{21} &= \omega_0 = 2\pi f_0 \\
a_{32} &= -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} \\
a_{33} &= -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[1 - \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads} \right] \\
b_{11} &= \frac{1}{2H} \\
b_{32} &= \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}}
\end{aligned} \qquad (۱۲ - ۱۱۶)$$

معادلات خطی شده سیستم

با توصیف معادلات ۱۲ ـ ۱۰۳ و ۱۲ ـ ۱۰۴ برحسب مقادیر منحرف شده، می‌توان نوشت:

$$\Delta i_d = m_1 \Delta\delta + m_2 \Delta\psi_{fd} \qquad (۱۲ ـ ۱۰۶)$$

$$\Delta i_q = n_1 \Delta\delta + n_2 \Delta\psi_{fd} \qquad (۱۲ ـ ۱۰۷)$$

که در آن:

$$m_1 = \frac{E_B (X_{Tq} \sin\delta_\circ - R_T \cos\delta_\circ)}{D}$$

$$n_1 = \frac{E_B (R_T \sin\delta_\circ + X_{Td} \cos\delta_\circ)}{D}$$

$$m_2 = \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})} \qquad (۱۲ ـ ۱۰۸)$$

$$n_2 = \frac{R_T}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})}$$

با خطی سازی معادلات ۱۲ ـ ۹۰ و ۱۲ ـ ۹۲، و جایگزینی عبارات بالا به جای Δi_d و Δi_q، نتیجه می‌شود:

$$\Delta\psi_{ad} = L'_{ads}\left(-\Delta i_d + \frac{\Delta\psi_{fd}}{L_{fd}}\right)$$

$$= \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2\right) L'_{ads} \Delta\psi_{fd} - m_1 L'_{ads} \Delta\delta \qquad (۱۲ ـ ۱۰۹)$$

$$\Delta\psi_{aq} = -L_{aqs} \Delta i_q$$

$$= -n_2 L_{aqs} \Delta\psi_{fd} - n_1 L_{aqs} \Delta\delta \qquad (۱۲ ـ ۱۱۰)$$

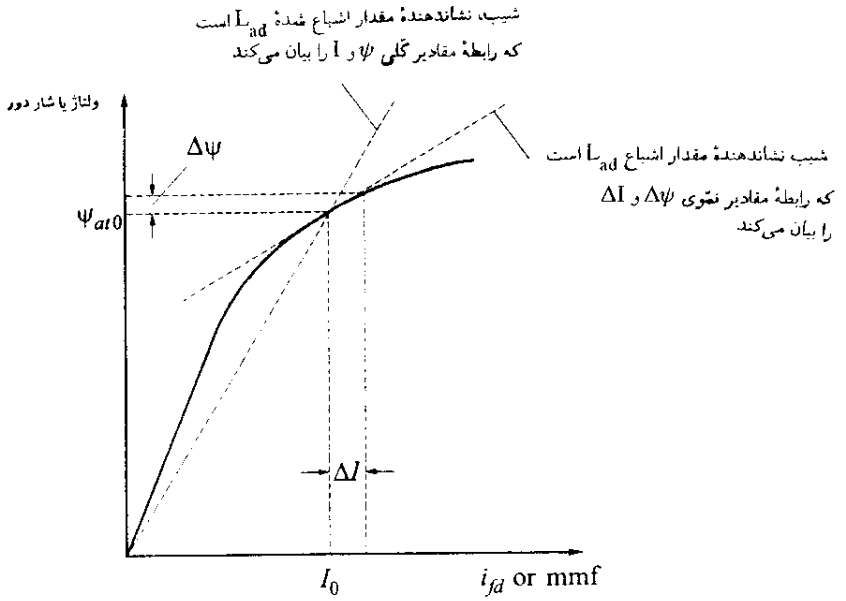
با خطی‌سازی معادلهٔ ۱۲ ـ ۸۹ و جایگزینی برای $\Delta\psi_{ad}$ از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۰۹ داریم:

$$\Delta i_{fd} = \frac{\Delta\psi_{fd} - \Delta\psi_{ad}}{L_{fd}}$$

$$= \frac{1}{L_{fd}}\left(1 - \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads}\right)\Delta\psi_{fd} + \frac{1}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} \Delta\delta \qquad (۱۲ ـ ۱۱۱)$$

صورت خطی شدهٔ معادله ۱۲ ـ ۹۳ عبارت است از:

$$\Delta T_e = \psi_{ad\circ} \Delta i_q + i_{q\circ} \Delta\psi_{ad} - \psi_{aq\circ} \Delta i_d - i_{d\circ} \Delta\psi_{aq}$$



شکل ۱۲ ـ ۸ فرق بین اشباع نموی و کلی

خلاصهٔ روش فرموله‌سازی ماتریس حالت

الف) نقطهٔ کار حالت ماندگار، پارامترهای ماشین و پارامترهای شبکه، در زیر داده شده است:

$P_t \quad Q_t \quad E_t \quad R_E \quad X_E$

$L_d \quad L_q \quad L_l \quad R_a \quad L_{fd} \quad R_{fd} \quad A_{sat} \quad B_{sat} \quad \psi_{Tl}$

به طور مشابهی ممکن است بجای Q_t یا E_t، E_B مشخص شود.

ب) اولین گام، محاسبهٔ مقادیر حالت ماندگار اولیهٔ متغیرهای سیستم است:

I_t زاویهٔ ضریب توان ϕ

عوامل اشباع کلی K_{sd} و K_{sq} (بخش ۳ ـ ۸ را ببینید)

$$X_{ds} = L_{ds} = K_{sd} L_{adu} + L_l$$

$$X_{qs} = L_{qs} = K_{sq} L_{aqu} + L_l$$

$$\delta_i = \tan^{-1}\left(\frac{I_t X_{qs}\cos\phi - I_t R_a \sin\phi}{E_t + I_t R_a \cos\phi + I_t X_{qs}\sin\phi}\right)$$

و ΔT_m و ΔE_{fd} به محرکه (توربین) و کنترل‌های تحریک بستگی خواهند داشت. با گشتاور ورودی مکانیکی ثابت، $\Delta T_m = 0$ و با ولتاژ خروجی تحریک ثابت، $\Delta E_{fd} = 0$ است.

مقایسهٔ معادلات فضای حالت بالا با معادلات به دست آمده در بخش ۱۲-۳-۱ و با فرض مدل کلاسیک ژنراتور (که با فرض $R_{fd} = 0$، $R_a = 0$ و $X_a = X'_d$ معادل است)، قابل تأمل است.

اندوکتانس‌های متقابل L_{ads} و L_{aqs} در معادلات بالا، مقادیر اشباع شده هستند. روش در نظر گرفتن اشباع برای تحلیل سیگنال کوچک در زیر توضیح داده می‌شود.

نمایش اشباع در مطالعات سیگنال کوچک

از آنجا که عملکرد سیگنال کوچک را برحسب مقادیر منحرف‌شدهٔ شاردور و جریانها بیان می‌کنیم، باید تمایزی بین اشباع کلی[1] و اشباع نموی[2] قائل شد.

اشباع کلی مربوط به مجموع مقادیر شاردورها و جریانهاست. نحوه محاسبهٔ اشباع کلی در بخش ۳ ـ ۸ مورد بحث قرار گرفت.

اشباع نموی مربوط به مقادیر منحرف شدهٔ شاردورها و جریانهاست. بنابراین، از شیب نموی منحنی اشباع همان طور که در شکل ۱۲ ـ ۸ نشان داده شده، برای محاسبهٔ اشباع نموی ، استفاده می‌شود. با نشان دادن ضریب اشباع نموی با $K_{sd(incr)}$ داریم:

$$L_{ads\,(incr)} = K_{sd\,(incr)}\, L_{adu} \qquad (۱۱۷ - ۱۲)$$

براساس تعاریف A_{sat}، B_{sat} و ψ_{TI} در بخش ۳-۸-۲، می‌توان نشان داد:

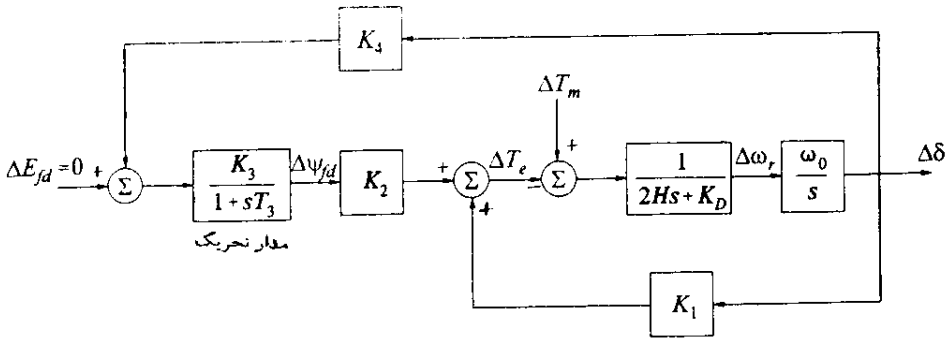
$$K_{sd\,(incr)} = \frac{1}{1 + B_{sat} A_{sat} e^{B_{sat}(\psi_{at0} - \psi_{TI})}} \qquad (۱۱۸ - ۱۲)$$

نحوهٔ برخورد با اشباع محور q نیز به شکل مشابه است.

اشباع کلی برای محاسبهٔ مقادیر اولیهٔ متغیرهای مستقیم (نشان داده شده با زیر نویس ۰)، به کار گرفته می‌شود. برای مربوط کردن مقادیر منحرف شده، یعنی در معادله‌های ۱۲ ـ ۱۰۵، ۱۲ ـ ۱۰۸، ۱۲ ـ ۱۱۳، ۱۲ ـ ۱۱۴ و ۱۲ ـ ۱۱۶ از ضریب اشباع نموی استفاده می‌گردد.

روش محاسبهٔ مقادیر حالت ماندگار اولیهٔ پارامترهای ماشین در بخش ۳-۶-۵ توضیح داده شد.

1. Total Saturation 2. Incremental Saturation



شکل ۱۲ ـ ۹ نمودار بلوکی با E_{fd} ثابت

که در آن:

$$K_1 = \Delta T_e / \Delta\delta \quad \text{با } \psi_{fd} \text{ ثابت}$$

$$K_2 = \Delta T_e / \Delta\psi_{fd} \quad \text{با زاویهٔ روتور } \delta \text{ ثابت}$$

عبارات K_1 و K_2 با معادلات ۱۲ ـ ۱۱۳ و ۱۲ ـ ۱۱۴ داده شده است.

مؤلفهٔ گشتاورِ داده شده با $K_1\,\Delta\delta$، با $\Delta\delta$ همفاز است و از این رو یکی از مؤلفه‌های گشتاور سنکرون‌کننده را نشان می‌دهد.

مؤلفهٔ گشتاور حاصل از تغییرات در شاردور تحریک، با $K_2\,\Delta\psi_{fd}$ داده شده است.

تغییرات ψ_{fd} به کمک معادلهٔ دینامیکی مدار تحریک تعیین می‌شود:

$$P\,\Delta\psi_{fd} = a_{32}\,\Delta\delta + a_{33}\,\Delta\psi_{fd} + b_{32}\,\Delta E_{fd}$$

با دسته‌بندی عبارات شامل $\Delta\psi_{fd}$ و مرتب کردن آنها، نتیجه می‌شود:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{K_3}{1 + PT_3}\left[\Delta E_{fd} - K_4\,\Delta\delta\right] \qquad (۱۱۹ ـ ۱۲)$$

که در آن:

$$K_3 = -\frac{b_{32}}{a_{33}}$$

$$K_4 = -\frac{a_{32}}{b_{32}} \qquad (۱۲۰ ـ ۱۲)$$

$$T_3 = -\frac{1}{a_{33}} = K_3\,T'_{d0}\,\frac{L_{adu}}{L_{ffd}}$$

$$e_{d\circ} = E_t \sin\delta_i$$
$$e_{q\circ} = E_t \cos\delta_i$$
$$i_{d\circ} = I_t \sin(\delta_i + \phi)$$
$$i_{q\circ} = I_t \cos(\delta_i + \phi)$$
$$E_{Bd\circ} = e_{d\circ} - R_E i_{d\circ} + X_E i_{q\circ}$$
$$E_{Bq\circ} = e_{q\circ} - R_E i_{q\circ} - X_E i_{d\circ}$$
$$\delta_\circ = \tan^{-1}\left(\frac{E_{Bd\circ}}{E_{Bq\circ}}\right)$$
$$E_B = (E_{Bd\circ}^2 + E_{Bq\circ}^2)^{1/2}$$
$$i_{fd\circ} = \frac{e_{q\circ} + R_a i_{q\circ} + L_{ds} i_{d\circ}}{L_{ads}} \quad , \quad E_{fd\circ} = L_{adu}\, i_{fd\circ}$$
$$\psi_{ad\circ} = L_{ads}(-i_{d\circ} + i_{fd\circ}) \quad , \quad \psi_{aq\circ} = -L_{aqs}\, i_{q\circ}$$

ج) گام بعد محاسبهٔ ضرایب اشباع نموی و مقادیر اشباع شدهٔ متناظر با L_{ads}، L_{aqs}، L'_{ads} و سپس:

R_T ، X_{Tq} ، X_{Td} ، D از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۰۵

m_1 ، m_2 ، n_1 ، n_2 از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۰۸

K_1 ، K_2 از معادله‌های ۱۲ ـ ۱۱۳ و ۱۲ ـ ۱۱۴

می‌باشد.

د) سرانجام، محاسبهٔ عناصر ماتریس **A** از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۱۶ آخرین بند عملیات است.

نمایش نمودار بلوکی

شکل ۱۲ ـ ۹ نمودار بلوکی عملکرد سیگنال کوچک سیستم را نشان می‌دهد. در این نمایش، مشخصه‌های دینامیکی سیستم برحسب ثابتهایی موسوم به K [۵] بیان می‌شود. اصول نمودار بلوکی و عبارتهای ثابتهای مربوطه در زیر بیان شده است:

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۱۲، می‌توان تغییرِ گشتاور فاصلهٔ هوایی را به صورت تابعی از $\Delta\delta$ و $\Delta\psi_{fd}$ به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta\psi_{fd}$$

از معادله‌های ۱۲ ـ ۹۱، ۱۲ ـ ۱۰۸ و ۱۲ ـ ۱۱۶، می‌توان نوشت:

$$a_{33} = -\omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{fd}} \left[1 - \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} + \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})} \frac{L_{ads} L_{fd}}{(L_{ads} + L_{fd})} \right]$$

$$= -\omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{ads} + L_{fd}} \left[1 + \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}^2}{(L_{ads} + L_{fd})} \right] \qquad (۱۲ ـ ۱۲۵)$$

$$= -\omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{ads} + L_{fd}} \left[1 + \frac{X_{Tq}}{D} (X_d - X'_d) \right]$$

با جایگزینی از رابطه فوق در عبارتهای K_3 و T_3 در معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۲۰ داریم:

$$K_3 = \frac{L_{ads} + L_{fd}}{L_{adu}} \frac{1}{1 + \frac{X_{Tq}}{D} (X_d - X'_d)} \qquad (۱۲ ـ ۱۲۶)$$

$$T_3 = \frac{L_{ads} + L_{fd}}{\omega_0 R_{fd}} \frac{1}{1 + \frac{X_{Tq}}{D} (X_d - X'_d)}$$

$$= \frac{T'_{d0s}}{1 + \frac{X_{Tq}}{D} (X_d - X'_d)} \qquad (۱۲ ـ ۱۲۷)$$

که در آن T'_{d0s} مقدار اشباع شدهٔ T'_{d0} است. به‌طور مشابهی، از معادله‌های ۱۲ ـ ۹۱، ۱۲ ـ ۱۰۸ و ۱۲ ـ ۱۱۶ می‌توان نوشت:

$$a_{32} = -\omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{fd}} \frac{E_B}{D} (X_{Tq} \sin\delta_0 - R_T \cos\delta_0) \frac{L_{ads} L_{fd}}{L_{ads} + L_{fd}}$$

که از جایگزینی عبارت بالا در رابطهٔ K_4 در معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۲۰ داریم:

$$K_4 = L_{adu} \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \frac{E_B}{D} (X_{Tq} \sin\delta_0 - R_T \cos\delta_0) \qquad (۱۲ ـ ۱۲۸)$$

و اگر تأثیر اشباع نادیده گرفته شود، می‌توان آن را به شکل ساده‌تر ذیل نوشت:

$$K_4 = \frac{E_B}{D} (X_d - X'_d) (X_{Tq} \sin\delta_0 - R_T \cos\delta_0) \qquad (۱۲ ـ ۱۲۹)$$

اگر عناصر ماتریس **A** در دست باشد، می‌توان عناصر **K** را مستقیماً از آن محاسبه کرد. در اینجا

معادله ۱۲ ـ ۱۱۹، با جایگزینی کردن s به جای P، معادلهٔ حاکم بر بلوک مدار تحریک در شکل ۱۲ ـ ۹ است.

عبارات ثابتهای K در صورت بسط داده شده

ثابتهای K را برحسب عناصر ماتریس A بیان کرده‌ایم. اما معمولاً در مراجع [۵ و ۶]، آنها را به‌طور صریح و برحسب پارامترهای مختلف سیستم، همان طور که در زیر خلاصه شده است، بیان می‌کنند.

ثابت K_1 در معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۱۳ به صورت زیر بیان شد:

$$K_1 = n_1 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_1 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0})$$

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۹۵، اولین عبارت داخل پرانتز در معادلهٔ بالا برای K_1 را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0} = e_{q0} + R_a i_{q0} + X_{qs} i_{d0} = E_{q0} \qquad (۱۲۱ ـ ۱۲)$$

که در آن E_{q0} مقدار پیش از بروز اغتشاش ولتاژ متصل به $R_a + j X_q$ است. عبارت دوم در داخل پرانتزِ عبارت K_1 را می‌توان به صورت زیر بازنوشت:

$$\begin{aligned} \psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0} &= -L_{aqs} i_{q0} + L'_{ads} i_{q0} \\ &= -(X_q - X'_d) i_{q0} \end{aligned} \qquad (۱۲۲ ـ ۱۲)$$

با جایگزینی برای n_1، m_1 از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۰۸ و برای عبارت داده شده با معادله‌های ۱۲ ـ ۱۲۱ و ۱۲ ـ ۱۲۲ در معادلهٔ K_1 نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} K_1 = {} & \frac{E_B E_{q0}}{D} (R_T \sin\delta_0 + X_{Td} \cos\delta_0) + \\ & \frac{E_B i_{q0}}{D} (X_q - X'_d)(X_{Tq} \sin\delta_0 - R_T \cos\delta_0) \end{aligned} \qquad (۱۲۳ ـ ۱۲)$$

به طور مشابهی، شکل بسط داده شدهٔ معادلهٔ ثابت K_2 عبارت است از:

$$K_2 = \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \left[\frac{R_T}{D} E_{q0} + \left(\frac{X_{Tq} (X_q - X'_d)}{D} + 1 \right) i_{q0} \right] \qquad (۱۲۴ ـ ۱۲)$$

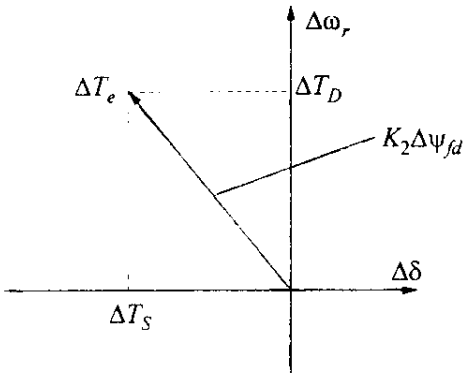
ب) در فرکانسهای نوسانیِ بسیار بالاتر از $\frac{1}{T_3}$ داریم:

$$\Delta T_e \approx -\frac{K_2 K_3 K_4}{j\omega T_3}\Delta\delta$$

$$= \frac{K_2 K_3 K_4}{\omega T_3} j\Delta\delta$$

بنابراین، مؤلفهٔ گشتاور فاصله هوایی ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ یا 90° نسبت به $\Delta\delta$ پیش فاز است و یا با $\Delta\omega$ همفاز است از این رو، $\Delta\psi_{fd}$ به یک مؤلفهٔ گشتاور میراکنندهٔ مثبت منجر می‌شود.

ج) در فرکانسهای نوعی نوسانیِ ماشین در حدود ۱ هرتز (2π رادیان بر ثانیه)، $\Delta\psi_{fd}$ به یک‌مؤلفهٔ گشتاور میراکنندهٔ‌مثبت و یک‌مؤلفهٔ گشتاورسنکرون‌کنندهٔ‌منفی منجر می‌شود. تأثیر خالص، کاهش مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کننده و افزایش گشتاور میراکننده می‌باشد.



شکل ۱۲ ـ ۱۰ گشتاور میراکنندهٔ مثبت و گشتاور سنکرون کنندهٔ منفی ناشی از $K_2\Delta\psi_{fd}$

حالتهای خاص با K_4 منفی. ضریب K_4 معمولاً مثبت است. مادامی که این پارامتر مثبت باشد، اثر تغییر شار تحریک ناشی از عکس‌العمل آرمیچر ($\Delta\psi_{fd}$ با E_{fd} ثابت) به شکل ایجاد مؤلفهٔ گشتاور میراکنندهٔ مثبت ظاهر می‌شود. لیکن، ممکن است حالتهایی وجود داشته که در آنها K_4، منفی باشد. باتوجه به معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۲۸، ملاحظه می‌شود که اگر $(X_E + X_q)\sin\delta_\circ - (R_a + R_E)\cos\delta_\circ$ منفی باشد آنگاه K_4 نیز منفی است. این حالتی است که در آن ژنراتور نیروگاه آبی بدون سیم‌پیچهای میراکننده در بار سبک کار می‌کند و به وسیلهٔ یک

برای نشان دادن شکل عبارتهایی که در منابع استفاده می‌شود، شکل بسط داده شدهٔ آنها را به دست می‌آوریم. یکی از مزایای این شکل آن است که وابستگی ثابتهای K به پارامترهای مختلف سیستم بسهولت آشکار می‌شود. لیکن عیب آن این است که ناسازگاریهایی در نمایش اثر اشباع ظاهر می‌گردد.

در مراجع مختلف به جای ψ_{fd}، اغلب از $E'_q = (L_{ad} / L_{ffd})\psi_{fd}$ به عنوان متغیر حالت استفاده می‌شود (بخش ۵ ـ ۲ را ببینید). بدین ترتیب عبارت $L_{ad} / (L_{ad} + L_{fd})$ از روابط K_2 و K_3 حذف می‌شود. اما حاصل‌ضرب $K_2 K_3$ همچنان باقی خواهند ماند.

تأثیر تغییر شاردور تحریک بر پایداری سیستم

از نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۹ مشاهده می‌کنیم که اگر ولتاژ تحریک ثابت باشد ($\Delta E_{fd} = 0$)، تغییرات شار تحریک فقط به وسیلهٔ فیدبک $\Delta\delta$ (و از طریق ضریب K_4) ایجاد می‌شود. این موضوع نشان‌دهندهٔ تأثیر مغناطیس زدایی عکس‌العمل آرمیچر است.

تغییر در گشتاور فاصله هوایی، ناشی از تغییرات شار تحریک ایجاد شده به وسیلهٔ تغییرات زاویهٔ روتور به صورت زیر داده می‌شود:

$$\left.\frac{\Delta T_e}{\Delta\delta}\right|_{\text{ناشی از } \Delta\psi_{fd}} = -\frac{K_2 K_3 K_4}{1 + sT_3} \qquad (۱۳۰ ـ ۱۲)$$

ثابتهای K_2، K_3 و K_4 معمولاً مثبت هستند. همان‌طورکه بحث‌خواهد شد، میزان مشارکت $\Delta\psi_{fd}$ در مؤلفه‌های گشتاور سنکرون کننده و میراکننده به فرکانس نوسانی بستگی دارد.

الف) در حالت ماندگار و در فرکانس‌های خیلی پایین نوسانی ($s = j\omega \longrightarrow 0$)، می‌توان نوشت:

$$\Delta\psi_{fd} \text{ ناشی از } \Delta T_e = -K_2 K_3 K_4 \Delta\delta$$

تغییر شار میدان، ناشی از $\Delta\delta$ فیدبک (یعنی، ناشی از عکس‌العمل آرمیچر)، موجب ایجاد مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کنندهٔ منفی می‌شود. و هنگامی که این گشتاور از $K_1 \Delta\delta$ تجاوز کند، سیستم به‌طور یکنوا ناپایدار[1] می‌شود. حد پایداری حالت ماندگار هنگامی فرا می‌رسد که داشته باشیم:

$$K_2 K_3 K_4 = K_1$$

1. Monotonically Unstable

ب) مقدار حدی P (در ۰/۰۲۵ pu ±) و مقدار متناظر زاویهٔ روتور δ را که بعد از آن سیستم ناپایدار است تعیین کنید، با فرض:

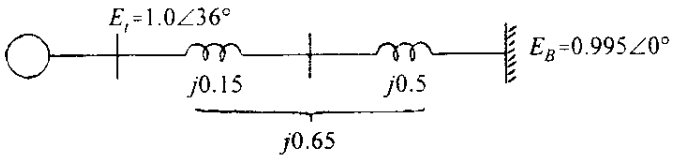
۱. نادیده گرفتن اثر اشباع؛

۲. درنظر گرفتن اثر اشباع.

فرض کنید که Q = P/۳ و P متغیر است و E_t = ۱/۰ می‌باشد. در این صورت دربارهٔ مُد ناپایداری و اثر نمایش اشباع، نظر خود را بیان کنید.

حل

چهار واحد نیروگاه را می‌توان به وسیلهٔ یک ژنراتور معادل نمایش داد که پارامترهای ژنراتور بر پایهٔ MVA ۲۲۲۰ همانند پارامترهای هر واحد بروی مقادیر نامی‌اش است. مدل مداری سیستم در مبنای واحد بر پایهٔ MVA ۲۲۲۰ در شکل ۱۲ ـ ۷ م نشان داده شده است.



شکل ۱۲ ـ ۷ م

ژنراتورهای این مثال به جز برای L_l، همان مشخصه‌های ژنراتور درنظر گرفته شده در مثالهای فصلهای ۳ و ۴ را دارند. پارامترهای اساسی در مبنای واحد (عناصر محور q و d مدارهای معادل) ژنراتور معادل با دنبال کردن مراحل به کار رفته در مثال ۴ ـ ۱ عبارت است از:

L_{adu} = ۱/۶۵ L_{aqu} = ۱/۶۰ L_l = ۰/۱۶

R_a = ۰/۰۰۳ R_{fd} = ۰/۰۰۰۶ L_{fd} = ۰/۱۵۳

الف) ۱. مقادیر اولیهٔ حالت ماندگار متغیرهای سیستم با استفاده از مراحلی که در ابتدای این بخش خلاصه شد، محاسبه می‌گردند.

$K_{sd} = K_{sq}$ = ۰/۸۴۹۱ δ_1 = ۴۳/۱۳°

e_{d0} = ۰/۶۸۳۶ e_{q0} = ۰/۷۲۹۸ i_{d0} = ۰/۸۳۴۲ i_{q0} = ۰/۴۵۱۸

δ_0 = ۷۹/۱۳° E_{fd0} = ۲/۳۹۵ $K_{sd\,(incr)} = K_{sq\,(incr)}$ = ۰/۴۳۴

خط مقاومت‌دار (که مقاومت آن نسبت به راکتانس خط زیاد است) به سیستمی بزرگ متصل است. چنین حالتی در مرجع ۷ گزارش شده است.

هم‌چنین K_4 هنگامی که یک ماشین به بار محلی بزرگی متصل است، که بخشی توسط ژنراتور و قسمتی توسط سیستم بزرگ دور، تغذیه می‌شود، می‌تواند منفی گردد. تحت چنین وضعیتی، گشتاورهای تولید شده به وسیلهٔ جریانهای القا شده در تحریک ناشی از عکس‌العمل آرمیچر، مؤلفه‌هایی غیرهمفاز با $\Delta\omega$ داشته، موجب تولید میرایی منفی می‌شود.

مثال ۱۲ ـ ۳

در این مثال پایداری سیگنال کوچک سیستم شکل ۱۲ ـ ۵ م (مثال ۱۲ ـ ۲) را با درنظر گرفتن اثر دینامیک مدار تحریک ژنراتور تحلیل می‌کنیم. پارامترهای هر کدام از چهار ژنراتورهای نیروگاه در مبنای واحد و بر پایهٔ مقادیر نهایی به صورت زیر است:

$X_d = ۱/۸۱$ $\quad X_q = ۱/۷۶$ $\quad X'_d = ۰/۳$ $\quad X_l = ۰/۱۶$

$R_a = ۰/۰۰۳$ $\quad T'_{d0} = ۸/۰$ ثانیه $\quad H = ۳/۵$ $\quad K_D = ۰$

پارامترهای بالا مقادیر اشباع نشده هستند. اثر اشباع با فرض آنکه محورهای d و q مشخصه‌های اشباع یکسانی به صورت زیر دارند، نشان داده خواهد شد:

$A_{sat} = ۰/۰۳۱$ $\quad B_{sat} = ۶/۹۳$ $\quad \psi_{t1} = ۰/۸$

می‌توان از اثر سیم‌پیچهای میراکننده صرفنظر کرد. سیستم تحریک بر روی «کنترل دستی» (E_{fd} ثابت)، و مدار انتقال ۲ «خارج از سرویس» است.

الف) اگر خروجی نیروگاه درمبنای واحد برپایهٔ مقادیر ۲۲۲۰ MVA و ۲۴ KV به‌شکل زیر باشد:

$P = ۰/۹$ $\quad Q = ۰/۳$ (فوق تحریک) $\quad E_t = ۱/۰$

مطلوب است:

۱. عناصر ماتریس حالت A نشان‌دهندهٔ عملکرد سیگنال کوچک سیستم؛

۲. ثابتهای K_1 تا K_4 و T_3 مربوط به نمایش نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۹؛

۳. مقادیر ویژهٔ A و بردارهای ویژهٔ متناظر و ماتریس مشارکت و نیز فرکانس و نسبت میرایی مُد نوسانی؛

۴. ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ حالت ماندگار و ضرایب گشتاور میراکننده و سنکرون کننده در فرکانس نوسانی روتور؛

از این ماتریس، مشاهده می‌شود که $\Delta\omega_r$ و $\Delta\delta$ مشارکت زیادی در مُد نوسانی (متناظر با مقادیر ویژهٔ λ_1 و λ_2) دارند؛ شاردور تحریک سهم زیادی در مُد غیرنوسانی دارد، این مُد با مقدار ویژهٔ λ_3 نشان داده شده است.

۴. ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ حالت ماندگار ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ عبارت است از:

$$-K_2 K_3 K_4 = -0/8649 \times 1/4187 \times 0/323$$
$$= -0/3963$$

ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ حالت ماندگار کلی برابر است با:

$$K_s = K_1 - K_2 K_3 K_4$$
$$= 0/7643 - 0/3963 = 0/3679 \text{ pu گشتاور بر رادیان}$$

از نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۹ داریم:

$$\left.\frac{\Delta T_e(s)}{\Delta\delta(s)}\right|_{\Delta\psi_{fd}\ \text{ناشی از}} = \frac{-K_2 K_3 K_4}{1 + sT_3} = \frac{-K_2 K_3 K_4 (1 - sT_3)}{1 - s^2 T_3^2}$$

بنابراین، ΔT_e ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ عبارت است از:

$$\Delta T_e\Big|_{\Delta\psi_{fd}} = \frac{-K_2 K_3 K_4}{1 - s^2 T_3^2}\Delta\delta + \frac{K_2 K_3 K_4 T_3}{1 - s^2 T_3^2} s\,\Delta\delta$$
$$= K_s(\Delta\psi_{fd})\Delta\delta + K_D(\Delta\psi_{fd})\Delta\omega_r\omega_0$$

از مقادیر ویژه، فرکانس مختلط نوسان روتور برابر با $-0/11 + j\,6/41$ می‌باشد. از آنجا که قسمت حقیقی از قسمت موهومی بسیار کوچکتر است، می‌توان با قرار دادن $s = j\,6/41$، K_s و K_D را در فرکانس نوسانی بدون از دست دادن دقت زیادی محاسبه کرد:

$$K_s(\Delta\psi_{fd}) = \frac{-K_2 K_3 K_4}{1 - s^2 T_3^2} = \frac{-0/3963}{1 - (j\,6/41 \times 2/365)^2}$$
$$= -0/00172 \text{ pu گشتاور بر رادیان}$$

$$K_s(\Delta\psi_{fd}) = \frac{K_2 K_3 K_4 T_3 \omega_0}{1 - s^2 T_3^2} = \frac{0/3963 \times 2/365 \times 377}{1 - (j\,6/41 \times 2/365)^2}$$
$$= 1/53 \text{ pu گشتاور / pu تغییر سرعت}$$

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۰۸ داریم:

$$m_1 = ۱/۰۴۳۷ \qquad m_2 = ۰/۸۸۰۲ \qquad n_1 = ۰/۱۲۶۸ \qquad n_2 = ۰/۰۰۱۸$$

و از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۱۶، نتیجه می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} ۰ & -۰/۱۰۹۲ & -۰/۱۲۳۶ \\ ۳۷۶/۹۹۱ & ۰ & ۰ \\ ۰ & -۰/۱۹۳۸ & -۰/۴۲۲۹ \end{bmatrix}$$

۲. از معادله‌های ۱۲ ـ ۱۱۳، ۱۲ ـ ۱۱۴ و ۱۲ ـ ۱۲۰، ثابتهای نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۹ عبارتند از:

$$K_1 = ۰/۷۶۴۳ \qquad K_2 = ۰/۸۶۴۹$$

$$K_3 = ۰/۳۲۳۰ \qquad K_4 = ۱/۴۱۸۷ \qquad T_3 = ۲/۳۶۵$$

۳. مقادیر ویژهٔ محاسبه شده با یک برنامهٔ استاندارد، براساس روش تبدیل QR، عبارت است از:

$$\lambda_1 , \lambda_2 = -۰/۱۱ \pm j\,۶/۴۱ \qquad (\omega_d = ۱/۰۲\ \text{Hz}\ ,\ \zeta = ۰/۰۱۷)$$

$$\lambda_3 = -۰/۲۰۴$$

بنابراین ماتریس بردار ویژهٔ راست خواهد شد:

$$\Phi = \begin{bmatrix} ۰/۰۱۶۹ - j\,۰/۰۰۱۴ & ۰/۰۱۶۹ + j\,۰/۰۰۱۴ & ۰/۰۰۰۴ \\ -۰/۰۹۸۸ - j\,۰/۹۹۴۵ & -۰/۰۹۸۸ + j\,۰/۹۹۴۵ & -۰/۷۴۹۰ \\ ۰/۰۳۰۱ - j\,۰/۰۰۱۵ & ۰/۰۳۰۱ + j\,۰/۰۰۱۵ & ۰/۶۶۲۵ \end{bmatrix}$$

و ماتریس بردار ویژهٔ چپ نرمالیزه شده به گونه‌ای که $\Psi\,\Phi = I$ باشد، برابر است با:

$$\Psi = \begin{bmatrix} ۲۹/۳۸۸۴ + j\,۱/۹۰۹۷ & -۰/۰۴۱۰ + j\,۰/۴۹۹۲ & -۰/۰۶۴۳ + j\,۰/۵۶۳۲ \\ ۲۹/۳۸۸۴ - j\,۱/۹۰۹۷ & -۰/۰۴۱۰ - j\,۰/۴۹۹۲ & -۰/۰۶۴۳ - j\,۰/۵۶۳۲ \\ -۲/۶۸۲۰ & ۰/۰۰۱۴ & ۱/۵۱۲۶ \end{bmatrix}$$

از این‌رو ماتریس مشارکت عبارت است از:

$$\begin{array}{cc} \begin{bmatrix} ۰/۵۰۱ \angle -۱/۰^\circ & ۰/۵۰۱ \angle ۱/۰^\circ & ۰/۰۰۱ \angle ۱۸۰^\circ \\ ۰/۵۰۱ \angle -۱/۰^\circ & ۰/۵۰۱ \angle ۱/۰^\circ & ۰/۰۰۱ \angle ۱۸۰^\circ \\ ۰/۰۱۷ \angle ۹۴^\circ & ۰/۰۱۷ \angle -۹۴^\circ & ۱/۰۰۲ \angle ۰^\circ \end{bmatrix} & \begin{array}{c} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \end{array} \\ \begin{array}{ccc} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \end{array} & \end{array}$$

ثابتهای متناظر K برابر است با:

$$K_1 = ۰/۴۵۶۶ \quad K_2 = ۰/۹۶۰ \quad K_3 = ۰/۳۰۲۸ \quad K_4 = ۱/۵۷۴۹$$

از این‌رو، ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ حالت ماندگار عبارتست از:

$$K_s = K_1 - K_2 K_3 K_4 = -۰/۰۰۱۴ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

مقادیر ویژهٔ ماتریس حالت سیستم عبارت است از:

$$\lambda_1, \lambda_2 = -۰/۲۲۶ \pm j\,۴/۹۵ \qquad (\omega_d = ۰/۷۹\ \text{Hz}\ ,\ \zeta = ۰/۰۴۶)$$
$$\lambda_3 = +۰/۰۰۱۴۲$$

نتایج بالا نشان‌دهندهٔ حالتی است که بلافاصله پس از عبور از مُد پایداری به دست آمده است. ناپایداری سیستم ناشی از فقدان گشتاور سنکرون کننده است. این نکته در مثبت شدنِ تدریجیِ مقدار ویژهٔ حقیقی، منعکس شده است، که نشان‌دهندهٔ یک مُد ناپایداری از طریق یک مُد غیرنوسانی است.

۲. بدون درنظر گرفتن اثر اشباع:

مقدار حدی P و وضعیت متناظر سیستم در این حالت عبارت است از:

$$P = ۱/۰۳۷۵ \qquad Q = ۰/۳۴۵۸ \qquad E_t = ۱/۰$$
$$E_B = ۱/۰۲۷۵ \qquad \delta = ۸۹/۶^\circ \qquad E_{fd} = ۲/۴۹$$

و ثابتهای K برابر است با:

$$K_1 = ۰/۶۸۶۲ \quad K_2 = ۰/۹۹۵۶ \quad K_3 = ۰/۴۲۲ \quad K_4 = ۱/۶۳۳$$

بنابراین ضریب گشتاور سنکرون کننده حالت ماندگار خواهد شد:

$$K_s = K_1 - K_2 K_3 K_4 = -۰/۰۰۰۱ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

مقادیر ویژه برابر است با:

$$\lambda_1, \lambda_2 = -۰/۱۶۲ \pm j\,۶/۰۸ \quad (\omega_d = ۰/۹۷\ \text{Hz}\ ,\ \zeta = ۰/۰۲۷$$
$$\lambda_3 = -۰/۰۰۰۰۶$$

بنابراین تأثیر تغییر شار تحریک (به عبارت دیگر، عکس‌العمل آرمیچر) کاهش اندک گشتاور سنکرون کننده و افزودن یک مؤلفهٔ گشتاور میراکننده می‌باشد.

مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کنندهٔ کلی برابر است با:

$$K_s = K_1 + K_s(\Delta\psi_{fd}) = ۰/۷۶۴۳ - ۰/۰۰۱۷۲$$

$$= ۰/۷۶۲۶ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

تنها منبع میرایی تغییر شار تحریک است. از این‌رو، ضریب گشتاور میراکنندهٔ کلی عبارت است از:

$$K_D = K_D(\Delta\psi_{fd}) = ۱/۵۳ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر تغییر سرعت مبنای واحد}$$

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۸۱، فرکانس طبیعی میرانشده خواهد شد:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_s\omega_o}{۲H}} = \sqrt{\frac{۰/۷۶۲۶ \times ۳۷۷}{۲ \times ۳/۵}}$$

$$= ۶/۴۱ \quad \text{رادیان بر ثانیه}$$

و از معادلهٔ ۱۲ ـ ۸۲، نسبت میرایی برابر است با:

$$\zeta = \frac{۱}{۲}\frac{K_D}{\sqrt{K_s ۲H\omega_o}} = \frac{۱}{۲}\frac{۱/۵۳}{\sqrt{۰/۷۶۲۶ \times ۲ \times ۳/۵ \times ۳۷۷}}$$

$$= ۰/۰۱۷۱$$

مقادیر بالای ω_n و ζ با مقادیر محاسبه شده از مقادیر ویژه مطابقت دارند.

ب) حد پایداری با افزایش P (با $Q = P/۳$ و $E_t = ۱/۰$ pu) تعیین می‌شود (اجازه داده می‌شود تا E_B مقادیر مناسبی اتخاذ کند به گونه‌ای که معادلات مدار برآورده شود). نتایج با و بدون درنظر گرفتن اثر اشباع در زیر آورده شده است:

۱. با درنظر گرفتن اثر اشباع:

P ی حدی (در محدودهٔ ۰/۰۲۵ pu ±) و وضعیت متناظر سیستم در مبنای واحد عبارت است از:

$$P = ۱/۳۸۷۵ \qquad Q = ۰/۴۶۲۵ \qquad E_t = ۱/۰$$

$$E_B = ۱/۱۴۱۳ \qquad \delta = ۱۰۲/۶^\circ \qquad E_{fd} = ۳/۳$$

برحسب مقادیر منحرف شده، معادلات ۱۲ ـ ۹۴ و ۱۲ ـ ۹۵ را می‌توان به صورت زیر بازنوشت:

$$\Delta e_d = -R_a \Delta i_d + L_l \Delta i_q - \Delta\psi_{aq}$$
$$\Delta e_q = -R_a \Delta i_q - L_l \Delta i_d + \Delta\psi_{ad}$$

با به کارگیری معادلات ۱۲ ـ ۱۰۶، ۱۲ ـ ۱۰۷، ۱۲ ـ ۱۰۹ و ۱۲ ـ ۱۱۰ برای حذف Δi_d، Δi_q، $\Delta\psi_{ad}$ و $\Delta\psi_{aq}$ از معادلات بالا برحسب متغیرهای حالت و جایگزینی از عبارات حاصل برای Δe_d و Δe_q در معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۳۱، نتیجه می‌شود:

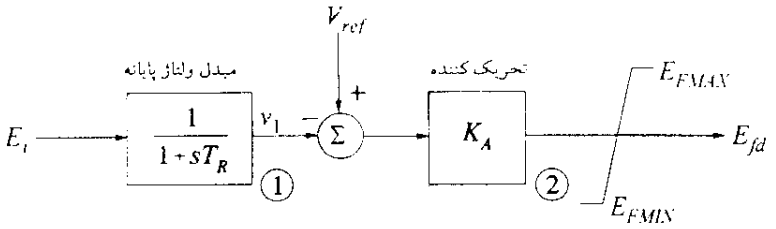
$$\Delta E_t = K_\delta \Delta\delta + K_f \Delta\psi_{fd} \qquad (۱۳۲ ـ ۱۲)$$

که در آن:

$$K_\delta = \frac{e_{d\circ}}{E_{t\circ}}[-R_a m_1 + L_l n_1 + L_{aqs} n_1] + \frac{e_{q\circ}}{E_{t\circ}}[-R_a n_1 - L_l m_1 - L'_{ads} m_1] \qquad (۱۳۳ ـ ۱۲)$$

$$K_f = \frac{e_{d\circ}}{E_{t\circ}}[-R_a m_2 + L_l n_2 + L_{aqs} n_2] + \frac{e_{q\circ}}{E_{t\circ}}[-R_a n_2 + L_l m_2 + L'_{ads}(\frac{1}{L_{fd}} - m_2)] \qquad (۱۳۴ ـ ۱۲)$$

به منظور نمایش و آزمون اثر پایداری سیگنال کوچک، مدل سیستم تحریکِ شکل ۱۲ ـ ۱۱ را درنظر می‌گیریم، که نمونه‌ای از سیستمهای تحریک تریستوری نوع ST1A در فصل هشتم است. لیکن این مدل چنان ساده شده که فقط آن عناصری را شامل می‌شود که برای نمایش یک سیستم مشخص، لازم است. از یک بهرهٔ بالای تحریک کننده، بدون کاهش بهرهٔ گذرا یا فیدبک مشتق، استفاده شده است. پارامترهای T_R نشان‌دهندهٔ ثابت زمانی مبدل ولتاژ پایانه است.



شکل ۱۲ ـ ۱۱ سیستم تحریک تریستوری با AVR

ملاحظه می‌شود سیستم در آستانهٔ ناپایداری است. زاویهٔ حدی روتور δ بسیار نزدیک به 95° است. با E_{fd} ثابت و چشمپوشی از برجستگی قطب، اگر مقادیر L_{ad} و L_{aq} که برای محاسبهٔ نقطهٔ کار اولیه به کار رفته‌اند با مقادیر به کار گرفته شده برای ارتباط شاردور نموی و جریانها یکسان باشد، زاویهٔ حدی روتور برابر با 90° خواهد بود.

در حالت ۱، هنگامی که اشباع را نمایش دادیم، تفاوتی را میان اشباع کلی و اشباع نموی قائل شدیم. از این‌رو، زاویهٔ حدی روتور تقریباً 102° بود که بسیار بیشتر از 90° است.

۱۲ ـ ۴ اثر سیستم تحریک

در این بخش، مدل فضای حالت و نمودار بلوکی را تعمیم می‌دهیم تا سیستم تحریک را نیز شامل شوند. سپس اثر سیستم تحریک را بر روی عملکرد پایداری سیگنال کوچک سیستم شین بینهایت تک ماشینهٔ تحت مطالعه را بررسی می‌کنیم.

اغلب، سیگنال کنترل ورودی به سیستم تحریک، ولتاژ پایانهٔ ژنراتور E_t است. در مدل ژنراتور اعمال شده در بخش قبل، E_t متغیر حالت نمی‌باشد. بنابراین، باید آن را برحسب متغیرهای حالتِ $\Delta\omega_r$، $\Delta\delta$ و $\Delta\psi_{fd}$ بیان کرد.

در بخش ۳ ـ ۶ ـ ۲، نشان دادیم که $\tilde{E}$ را می‌توان به صورت مختلط زیر بیان کرد:

$$\tilde{E}_t = e_d + je_q$$

از این رو:

$$\tilde{E}_t^2 = e_d^2 + e_q^2$$

حال با اعمال انحراف کوچکی، می‌توان نوشت:

$$(E_{t\circ} + \Delta E_t)^2 = (e_{d\circ} + \Delta e_d)^2 + (e_{q\circ} + \Delta e_q)^2$$

با نادیده گرفتن عبارات مرتبه دومِ مقادیر منحرف شده، معادلهٔ بالا به صورت زیر درمی‌آید:

$$E_{t\circ}\,\Delta E_t = e_{d\circ}\,\Delta e_d + e_{q\circ}\,\Delta e_q$$

بنابراین:

$$\Delta E_t = \frac{e_{d\circ}}{E_{t\circ}}\,\Delta e_d + \frac{e_{q\circ}}{E_{t\circ}}\,\Delta e_q \qquad (۱۲ ـ ۱۳۱)$$

از آنجاکه با مدلی مرتبه اول برای تحریک کننده سر و کار داریم، مرتبهٔ کل سیستم یک واحد افزایش خواهد یافت که متغیر حالت جدید افزوده شده Δv_1 می‌باشد.

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۳۵ نتیجه می‌شود:

$$P\,\Delta v_1 = a_{41}\,\Delta\omega_r + a_{42}\,\Delta\delta + a_{43}\,\Delta\psi_{fd} + a_{44}\,\Delta v_1 \qquad (۱۳۹ - ۱۲)$$

که در آن:

$$a_{41} = 0 \qquad (۱۴۰ - ۱۲)$$

$$a_{42} = \frac{K_5}{T_R}$$

$$a_{43} = \frac{K_6}{T_R}$$

$$a_{44} = \frac{1}{T_R}$$

و K_5 و K_6 با معادلات ۱۲ ـ ۱۳۳ و ۱۲ ـ ۱۳۴ داده می‌شوند.

از آنجاکه $P\,\Delta\omega_r$ و $P\,\Delta\delta$ مستقیماً از تحریک‌کننده تأثیر نمی‌پذیرند، داریم:

$$a_{14} = a_{24} = 0$$

بنابراین مدل فضای حالت کامل سیستم قدرت، شامل سیستم تحریک شکل ۱۲ ـ ۱۱ به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\psi}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \qquad (۱۴۱ - ۱۲)$$

با فرض اینکه ورودی گشتاور مکانیکی، ثابت باشد، داریم:

$$\Delta T_m = 0$$

نمودار بلوکی شامل سیستم تحریک

شکل ۱۲ ـ ۱۲ نمودار بلوکی حاصل از تعمیم شکل ۱۲ ـ ۹ را با ملحوظ کردن مبدل ولتاژ و بلوکهای AVR و تحریک کننده نشان می‌دهد. این نمایش به هر نوع تحریک کننده، با این فرض که

تنها عنصر غیرخطیِ مدل ناشی از سقف موجود بر ولتاژ خروجی تحریک کننده است که با E_{FMAX} و E_{FMIN} نشان داده شده است. که در مطالعات سیگنال کوچک، این حدها نادیده گرفته می‌شود، زیرا به یک مدل خطی شده حول نقطهٔ کار علاقه‌مندیم به گونه‌ای که E_{fd} در داخل حدها باشد. چون محدودکننده‌ها و مدارهای حفاظتی (V / HZ , OXL , UEL) بر پایداری سیگنال کوچک تأثیری ندارند، مدل نشده‌اند.

از بلوک ۱ شکل ۱۲ ـ ۱۱، با بکارگیری مقادیر منحرف شده، داریم:

$$\Delta\nu_1 = \frac{1}{1 + PT_R}\Delta E_t$$

از این‌رو:

$$P\,\Delta\nu_1 = \frac{1}{T_R}(\Delta E_t - \Delta\nu_1)$$

با جایگزینی از معادلهٔ ۱۲ ـ ۳۲ به جای ΔE_t نتیجه می‌شود:

$$P\,\Delta\nu_1 = \frac{K_5}{T_R}\Delta\delta + \frac{K_6}{T_R}\Delta\psi_{fd} - \frac{1}{T_R}\Delta\nu_1 \qquad (۱۳۵ ـ ۱۲)$$

از بلوک ۲ شکل ۱۲ ـ ۱۱، داریم:

$$E_{fd} = K_A(V_{ref} - \nu_1)$$

و برحسب مقادیر منحرف شده نتیجه می‌شود:

$$\Delta E_{fd} = K_A(-\Delta\nu_1) \qquad (۱۳۶ ـ ۱۲)$$

معادلهٔ دینامیکی مدار تحریک که در بخش قبلی به دست آمد، با درنظر گرفتن اثر سیستم تحریک، چنین می‌شود:

$$P\,\Delta\psi_{fd} = a_{31}\Delta\omega_r + a_{32}\Delta\delta + a_{33}\Delta\psi_{fd} + a_{34}\Delta\nu_1 \qquad (۱۳۷ ـ ۱۲)$$

که در آن:

$$a_{34} = -b_{32}K_A = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}}K_A \qquad (۱۳۸ ـ ۱۲)$$

روابط مربوط به a_{31}، a_{32} و a_{33} بدون تغییر باقی خواهند ماند و با معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۱۶ داده می‌شوند.

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{K_3}{1 + sT_3}\left[-K_4\,\Delta\delta - \frac{G_{ex}(s)}{1 + sT_R}(K_5\,\Delta\delta + K_6\,\Delta\psi_{fd})\right] \quad (۱۴۲ - ۱۲)$$

با دسته‌بندی عبارات شامل $\Delta\psi_{fd}$ و مرتب کردن مجدد، داریم:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{-K_3\,[K_4\,(1 + sT_R) + K_5\,G_{ex}(s)]}{s^2\,T_3\,T_R + s(T_3 + T_R) + 1 + K_3\,K_6\,G_{ex}(s)}\,\Delta\delta \quad (۱۴۳ - ۱۲)$$

تغییر در گشتاور فاصله هوایی ناشی از تغییر در شاردور تحریک عبارت است از:

$$\Delta T_e\Big|_{\Delta\psi_{fd}} = K_2\,\Delta\psi_{fd} \quad (۱۴۴ - ۱۲)$$

همچنان که قبلاً ذکر شده، ثابتهای K_2، K_3، K_4 و K_6 معمولاً مثبتند، لیکن، K_5 ممکن است مثبت یا منفی باشد. بنابراین تأثیر AVR بر روی مؤلفه‌های گشتاور میراکننده و سنکرون کننده به طور عمده ناشی از K_5 و $G_{ex}(s)$ است. این مطلب را با درنظر گرفتن یک حالت مشخص با پارامترهای زیر نشان می‌دهیم:

$K_1 = ۱/۵۹۱$ $\quad K_2 = ۱/۵$ $\quad K_3 = ۰/۳۳۳$ $\quad K_4 = ۱/۸$ $\quad T_3 = ۱/۹۱$

$K_5 = -۰/۱۲$ $\quad K_6 = ۰/۳$ $\quad T_R = ۰/۰۲$ $\quad G_{ex}(s) = K_A$

$H = ۳/۰$ $\quad K_D = ۰/۰$

که سیستمی را با یک تحریک کنندهٔ تریستوری نشان می‌دهد و وضع سیستم به گونه‌ای است که K_5 منفی است.

الف) ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ حالت ماندگار. از معادلات ۱۲ ـ ۱۴۳ و ۱۲ ـ ۱۴۴ با فرض $s = j\omega = ۰$، ΔT_e ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ عبارتست از:

$$\Delta T_e\Big|_{\Delta\psi_{fd}} = \frac{-K_2\,K_3\,(K_4 + K_5\,K_A)}{1 + K_3\,K_6\,K_A}\,\Delta\delta$$

$$= \frac{-۱/۵ \times ۰/۳۳۳\,(۱/۸ - ۰/۱۲\,K_A)}{1 + ۰/۳۳۳ \times ۰/۳\,K_A}\,\Delta\delta$$

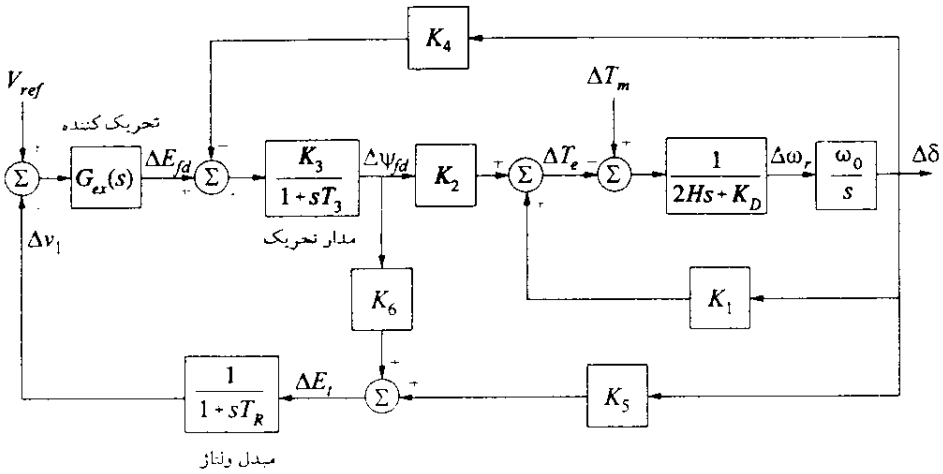
$$= \frac{۰/۰۶\,K_A - ۰/۹}{1 + ۰/۱\,K_A}\,\Delta\delta$$

$G_{ex}(s)$، نشان‌دهندهٔ تابع تبدیل AVR تحریک کننده باشد، قابل اعمال است. برای تحریک کنندهٔ تریستوری داریم:

$$G_{ex}(s) = K_A$$

و سیگنال خطای ولتاژ پایانه که ورودی بلوک مبدل ولتاژ را تشکیل می‌دهد، با معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۳۲ داده می‌شود:

$$\Delta E_t = K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta\psi_{fd}$$



شکل ۱۲ ـ ۱۲ نمایش نمودار بلوکی با تحریک کننده و AVR

ضریب K_6 همواره مثبت است، در حالی که K_5 می‌تواند بسته به وضع کاری و امپدانس شبکهٔ خارجی $R_E + j X_E$، مثبت یا منفی باشد. همان طور که در پایین نشان داده شده است مقدار K_5 نقش مهمی در تأثیر AVR بر میرایی نوسانها دارد.

تأثیر AVR بر روی مؤلفه‌های گشتاور سنکرون کننده و میراکننده

با عمل تنظیم‌کنندهٔ خودکار ولتاژ، تغییرات شار تحریک، علاوه بر عکس‌العمل آرمیچر، به وسیلهٔ تغییرات ولتاژ تحریک نیز ایجاد می‌شود. باتوجه به نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۱۲، مشاهده می‌شود که:

با $K_5 = -۰/۱۲$ و $K_A = ۲۰۰$، خواهیم داشت:

$$\Delta T_e \Big|_{\Delta\psi_{fd}} = \frac{۱۱/۱ - j\,۰/۱۸}{۱۷/۱۸ + j\,۱۹/۳}\,\Delta\delta$$
$$= ۰/۲۸۰۴\,\Delta\delta - ۰/۳۲۵۵\,(j\,\Delta\delta)$$

بنابراین تأثیر AVR، هنگامی که K_5 منفی است، افزایش مؤلفه گشتاور سنکرون کننده و کاهش مؤلفه گشتاور میراکننده می‌باشد.

ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ کلی عبارت است از:

$$K_s = K_1 + K_{s(\Delta\psi_{fd})} = ۱/۵۹۱ + ۰/۲۸۰۴$$
$$= ۱/۸۷۱۴ \text{ گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

مؤلفهٔ گشتاور میراکنندهٔ ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ برابر است با:

$$K_{D\,(\Delta\psi_{fd})} = -۰/۳۲۵۵\,(j\,\Delta\delta)$$

از آنجا که $\Delta\omega_r = s\,\Delta\delta / \omega_\circ = j\,\omega\,\Delta\delta / \omega_\circ$ است، داریم:

$$K_{D\,(\Delta\psi_{fd})} = -\frac{۰/۳۲۵۵\,\omega_\circ}{\omega}\,\Delta\,\omega_r$$

با (رادیان بر ثانیه) $\omega = ۱۰$، ضریب گشتاور میراکننده خواهد شد:

$$K_{D\,(\Delta\psi_{fd})} = -۱۲/۲۷ \text{ گشتاور مبنای واحد بر تغییر سرعت مبنای واحد}$$

درصورت عدم حضور هر منبع میراکنندهٔ دیگر، K_D کل برابر با $K_{D\,(\Delta\psi_{fd})}$ است.

بسادگی ملاحظه می‌شود که با K_5 مثبت، مؤلفه‌های گشتاور میراکننده و سنکرون کننده ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ برخلاف بالا خواهند بود.

برای سیستم تحت مطالعه، جدول ۱۲ ـ ۱ تأثیر AVR را بر روی K_s و K_D در (رادیان بر ثانیه) $\omega = ۱۰$ و برای مقادیر مختلف K_A، خلاصه می‌کند.

از این‌رو، ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ برابر است با:

$$K_{s(\Delta\psi_{fd})} = \frac{۰/۰۶\,K_A - ۰/۹}{۱ + ۰/۱\,K_A}$$

مشاهده می‌شود که تأثیر AVR، افزایشِ مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کنندهٔ حالت ماندگار است. با $K_A = ۰$ (به عبارت دیگر، E_{fd} ثابت)، $K_{s(\Delta\psi_{fd})} = -۰/۹$ است. هنگامی که $K_A = ۱۵$، AVR دقیقاً تأثیر مغناطیس‌زدایی عکس‌العمل آرمیچر را جبرانسازی می‌کند. $K_A = ۲۰۰$، $K_{s(\Delta\psi_{fd})} = ۰/۵۲۹$ است و ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ کلی عبارت است از:

$$K_s = K_۱ + K_{s(\Delta\psi_{fd})} = ۱/۵۹۱ + ۰/۵۲۹$$
$$= ۲/۱۲ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

در اینجا، $K_۵$ را منفی درنظر گرفتیم. با $K_۵$ مثبت AVR عکس تأثیر بالا را خواهد داشت؛ یعنی آنکه، تأثیر AVR کاهش مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کنندهٔ حالت ماندگار خواهد بود.

گرچه در این مثال یک تحریک کنندهٔ تریستوری خاصی را در نظر گرفته‌ایم، اما مشاهدات فوق به هر نوع تحریک کننده‌ای که بهرهٔ حالت ماندگار مربوط به تحریک کننده (یا AVR)اش برابر با K_A است قابل اعمال می‌باشد.

ب) **مؤلفه‌های گشتاور سنکرون کننده میراکننده در فرکانس نوسانی روتور:** جایگزینی مقادیر عددی به حالت خاص تحت مطالعه در معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۴۳، نتیجه می‌دهد:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{-۰/۶ - ۰/۳۳۳\,K_۵\,K_A - ۰/۰۱۲\,s}{۰/۰۳۸۲\,s^۲ + ۱/۹۳\,s + ۱ + ۰/۱\,K_A}\,\Delta\delta$$

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۴۴ داریم:

$$\Delta T_e\Big|_{\Delta\psi_{fd}} = K_۲\,\Delta\psi_{fd} = \frac{۱/۵\,(-۰/۶ - ۰/۳۳۳\,K_۵\,K_A - ۰/۰۱۲\,s)}{۰/۰۳۸۲\,s^۲ + ۱/۹۳\,s + ۱ + ۰/۱\,K_A}\,\Delta\delta$$

فرض می‌کنیم که فرکانس نوسان روتور ۱۰ رادیان بر ثانیه (۱/۶ هرتز) باشد. پس با $s = j\omega = j\,۱۰$، داریم:

$$\Delta T_e\Big|_{\Delta\psi_{fd}} = \frac{-۰/۹ - ۰/۵\,K_۵\,K_A - j\,۰/۱۸}{-۲/۸۲ + ۰/۱\,K_A + j\,۱۹/۳}\,\Delta\delta$$

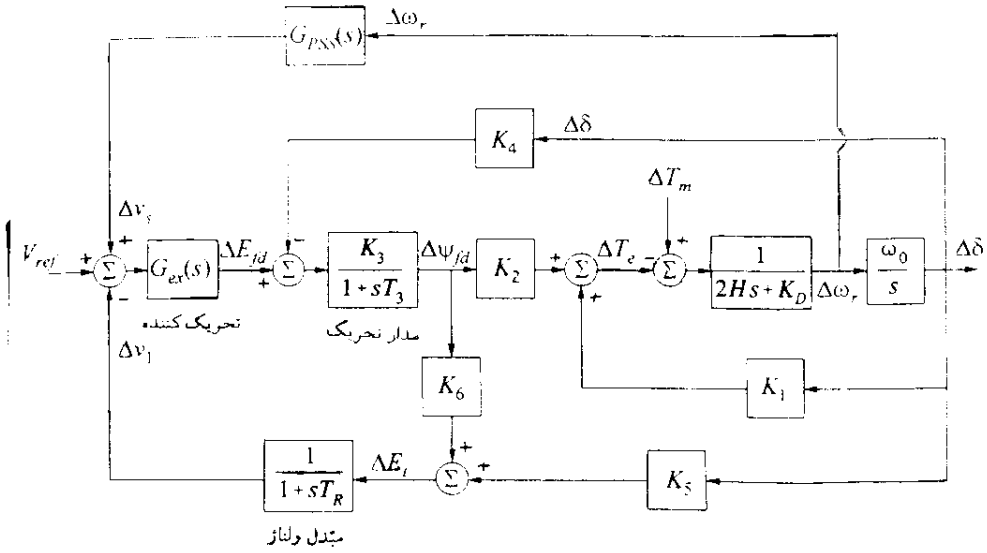
عمل، معمولاً موقعیتی رخ می‌دهد که در آن K_5 منفی است. برای چنین حالاتی، داشتن پاسخ بالای تحریک کننده برای افزایش گشتاور سنکرون کننده، سودمند است. لیکن، چنین عملی میرایی منفی ایجاد می‌کند. یک راه‌حل ممکن دیگر، رسیدن به مصالحه و تنظیم پاسخ تحریک‌کننده به گونه‌ای است که برای محدودهٔ معینی از حالتهای کار سیستم مؤلفه‌های گشتاور سنکرون‌کننده و میراکننده را، به اندازهٔ کافی فراهم آورد. البته ممکن است رسیدن به این حالت همواره ممکن نباشد و ممکن‌است لازم باشد برای فراهم آوردن گشتاور سنکرون کننده و عملکرد پایداری گذرای موردنیاز از پاسخ بالای تحریک کننده استفاده شود. اگر راکتانس سیستم خارجی زیاد باشد، ممکن است حتی با پاسخ پایین تحریک کننده، ضریب کلی گشتاور میراکننده منفی باشد.

یک راه مؤثر برای برخورد با ملاحظات متضاد عملکرد تحریک کننده در خصوص پایداری سیستم، کاربرد پایدارساز سیستم قدرت است که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد.

۱۲ ـ ۵ پایدارساز سیستم قدرت

نقش اصلی یک *پایدارساز سیستم قدرت* (PSS)، افزودن میرایی به نوسانهای روتور ژنراتور به‌وسیلهٔ کنترل تحریک آن با استفاده از سیگنال(های) پایدارساز کمکی است. برای فراهم آوردن میرایی، باید پایدارساز یک مؤلفهٔ گشتاور الکتریکی را همفاز با انحرافهای سرعت روتور ایجاد کند.

پایه‌های نظری PSS را می‌توان به کمک نمودار بلوکی نشان داده شده در شکل ۱۲ ـ ۱۳ نشان



شکل ۱۲ ـ ۱۳ نمودار بلوکی با AVR و PSS

جدول ۱۲ ـ ۱

K_A	$K_{s(\Delta\psi_{fd})}$	$K_s = K_1 + K_{s(\Delta\psi_{fd})}$	$K_{D(\Delta\psi_{fd})}$
۰/۰	−۰/۰۰۲۵	۱/۵۸۸۵	۱/۷۷۲
۱۰/۰	−۰/۰۰۷۹	۱/۵۸۳۱	۰/۶۱۴
۱۵/۰	−۰/۰۰۹۳	۱/۵۸۱۷	۰/۰۲۴
۲۵/۰	−۰/۰۰۹۸	۱/۵۸۱۲	−۱/۱۶۶
۵۰/۰	۰/۰۰۲۹	۱/۵۹۳۹	−۴/۰۹۰
۱۰۰/۰	۰/۰۷۸۲	۱/۶۶۹۲	−۸/۸۶۶
۲۰۰/۰	۰/۲۸۰۴	۱/۸۷۱۴	−۱۲/۲۷۲
۴۰۰/۰	۰/۴۸۷۴	۲/۰۷۸۴	−۹/۷۲۲
۱۰۰۰/۰	۰/۵۸۴۷	۲/۱۷۵۷	−۴/۴۴۸
بینهایت	۰/۶۰۰۰	۲/۱۹۱۰	۰/۰۰۰

با فرض $K_A = 0$، $\Delta\psi_{fd}$ به طور کامل از عکس‌العمل آرمیچر ناشی است. تأثیر AVR، کاهش K_D برای کلیهٔ مقادیر مثبت K_A می‌باشد. میرایی کلی برای $K_A = 200$، حداقل (منفی‌تری)، و برای $K_A = \infty$ صفر است. برای مقادیر کم K_A، تأثیر AVR، کاهش K_s به مقدار بسیار کم است. K_s کلی در K_Aی تقریباً برابر با ۴۶ حداقل است. با افزایش K_A بیش از این مقدار، K_s به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. برای مقدار بینهایت K_A، گشتاور ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ با $\Delta\delta$ همفاز است، و از این‌رو مؤلفهٔ میراکننده ندارد.

ما معمولاً به عملکرد سیستمهای تحریک با پاسخ سریع یا متوسط علاقه‌مندیم. برای چنین سیستمهای تحریکی، می‌توان موارد کلی زیر را در خصوص اثر AVR بیان کرد:

- با K_D مثبت، تأثیر AVR به شکل ایجاد یک گشتاور سنکرون کننده منفی و یک مؤلفهٔ گشتاور میراکنندهٔ مثبت ظاهر می‌شود،
- برای مقادیر کم راکتانس سیستم خارجی و خروجیهای کم ژنراتور، ثابت K_D مثبت است،
- معمولاً در چنین حالتهایی، کاهش K_s ناشی از عمل AVR، چندان مهم نیست، زیرا K_1 آنقدر زیاد است که K_s کلی به میزان زیادی بزرگتر از صفر است.
- با K_D منفی، عمل AVR یک مؤلفهٔ گشتاور سنکرون‌کنندهٔ مثبت و یک مؤلفهٔ گشتاور میراکنندهٔ منفی ایجاد می‌کند. این تأثیر با افزایش پاسخ تحریک کننده، بیشتر ملموس می‌شود.

برای مقادیر زیاد راکتانس سیستم خارجی و خروجیهای زیاد ژنراتور، K_D منفی است. در

اکنون جبرانسازی فاز PSS را، که برای تولید گشتاور میراکننده در فرکانس نوسان روتور (۱۰ رادیان بر ثانیه) لازم است، بررسی می‌کنیم. با $s = j\omega = j\,۱۰$، داریم:

$$\frac{\Delta\psi_{fd}}{\Delta\nu_s} = \frac{۶۶/۶۶}{۲۱ + j\,۱۹/۱}$$

$$\Delta T_{PSS} = \text{PSS ناشی از } \Delta T_e = K_۲\,(\text{PSS ناشی از } \Delta\psi_{fd})$$

بنابراین، در فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه، خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta T_{PSS}}{\Delta\nu_s} = K_۲\left(\frac{۶۶/۶۶}{۲۱ + j\,۱۹/۱}\right)$$

$$= \frac{۱/۵ \times ۶۶/۶۶}{۲۱ + j\,۱۹/۱}$$

$$= ۳/۵۲۲ \angle -۴۲/۳^\circ$$

ΔT_{PSS} باید همفاز با $\Delta\omega_r$ باشد (به عبارت دیگر، گشتاور میراکنندهٔ خالص)، سیگنال $\Delta\omega_r$ باید از طریق یک *مدار پیش‌فاز* به گونه‌ای پردازش شود که سیگنال به اندازهٔ $\theta = ۴۲/۳^\circ$ در فرکانس نوسانِ ۱۰ رادیان بر ثانیه پیش افتد. مقدار میراییِ اعمال شده، به بهرهٔ تابع تبدیلِ PSS در آن فرکانس، بستگی خواهد داشت. بنابراین:

$$\Delta T_{PSS} = (\text{بهرهٔ PSS در } \omega = ۱۰)\,(۳/۵۲۲)\,(\Delta\omega_r)$$

با جبرانسازی دقیق مدار پیش‌فاز برای پس‌فاز بین ΔT_e و $\Delta\nu_s$، جبرانسازی بالا، میراکنندهٔ خالص است.

ضریب گشتاور میراکنندهٔ ناشی از PSS در (رادیان بر ثانیه) $\omega = ۱۰$ برابر است با:

$$K_D\,(\text{PSS}) = (\text{بهرهٔ PSS})\,(۳/۵۲۲)$$

در بخش قبل، K_D ناشی از AVR برابر با ۱۲/۲۷− تعیین گردید. بنابراین، K_D کلی دربر گیرندهٔ اثر AVR و PSS عبارت است از:

$$K_D = -۱۲/۲۷ + (\text{بهرهٔ PSS در } \omega = ۱۰)\,(۳/۵۲۲)$$

با بهرهٔ $\frac{۱۲/۲۷}{۳/۵۲۲} = ۳/۴۸$، PSS فقط به اندازهٔ کافی برای جبرانسازی میرایی منفی ناشی از

داد. که تعمیمی از نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۱۲ است که تأثیر PSS را نیز شامل می‌شود.

از آنجا که هدف PSS اِعمال مؤلفهٔ گشتاور میراکننده است، یکی از سیگنالهای مناسب برای کنترل تحریک ژنراتور، انحراف سرعت $\Delta\omega_r$، می‌باشد.

اگر تابع تبدیل تحریک کننده $G_{ex}(s)$ و تابع تبدیل ژنراتور بین ΔE_{fd} و ΔT_e بهره‌های خالص بودند، هر فیدبک مستقیمی از $\Delta\omega_r$ به یک مؤلفهٔ گشتاور میراکننده منجر می‌شد. لیکن در عمل، هم ژنراتور و هم تحریک‌کننده (بسته به نوع آن) مشخصه‌های بهره و فازی وابسته به فرکانس از خود نشان خواهند داد. از این‌رو، تابع تبدیل PSS، $G_{PSS}(s)$، باید مدارهای جبرانساز فاز مناسبی داشته باشد تا برای پس‌فاز بین ورودی تحریک کننده و گشتاور خروجی، جبرانسازی را انجام دهد. در حالت ایده‌ال، با تعیین مشخصهٔ فاز $G_{PSS}(s)$ به صورت معکوسِ دقیقِ مشخصه‌های فازِ ژنراتور و تحریک کننده‌ای که باید جبران شوند، PSS در تمامی فرکانسهای نوسان به یک گشتاور میراکنندهٔ خالص منجر خواهد شد.

شایان‌ذکراینکه برای‌ساده‌شدن مدل‌سیستم‌ونمایش آن به‌صورت نمودار بلوکی، مدل ژنراتور شکل ۱۲ ـ ۱۳ از سیم‌پیچ میراکننده چشمپوشی می‌کند. لیکن، ممکن است سیم‌پیچ میراکننده، تأثیر بسزایی بر روی مشخصه‌های فاز ژنراتور داشته باشد و لذا باید در به دست آوردن پارامترهای PSS درنظر گرفته شود. سیم‌پیچ میراکننده در بخش ۱۲ ـ ۶ درنظر گرفته خواهد شد.

در اینجا به منظور بررسی اثر سیستم تحریک، اصول کاربرد PSS را با درنظر گرفتن سیستم کاربردی در بخش قبل نشان خواهیم داد. همانند قبل‌پارامترهای سیستم عبارت است از:

$$K_1 = ۱/۵۹۱ \qquad K_2 = ۱/۵ \qquad K_3 = ۰/۳۳۳ \qquad K_D = ۰/۰ \qquad H = ۳/۰$$

$$T_3 = ۱/۹۱ \qquad K_5 = -۰/۱۲ \qquad K_6 = ۰/۳ \qquad G_{ex}(s) = K_A = ۲۰۰$$

از آنجا که T_R در مقایسه با T_3 خیلی کوچک است، می‌توان از تأثیر آن در بررسی عملکرد PSS صرف‌نظر کرد. این موضوع تحلیل را بدون از دست دادن دقت، ساده می‌کند.

ازنمودار‌بلوکی‌شکل ۱۲ ـ ۱۳، باچشمپوشی‌از T_R، $\Delta\psi_{fd}$ ناشی‌از PSS به‌صورت‌زیرداده‌می‌شود:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{K_3 K_A}{1 + sT_3}\left(-K_6\,\Delta\psi_{fd} + \Delta v_s\right)$$

بنابراین:

$$\frac{\Delta\psi_{fd}}{\Delta v_s} = \frac{K_3 K_A}{sT_3 + 1 + K_3 K_6 K_A}$$

$$= \frac{۰/۳۳۳ \times ۲۰۰}{۱/۹۱\,s + ۱ + ۰/۳۳۳ \times ۰/۳ \times ۲۰۰}$$

$$= \frac{۶۶/۶۶}{۱۹/۱\,s + ۲۱}$$

معمولاً، گستره فرکانسی موردعلاقه ۰/۱ تا ۰/۲ هرتز می‌باشد، و مدار پیش‌فاز باید جبرانسازی را بر روی تمامی این گستره فرکانسی فراهم آورد. مشخصه فازی که باید جبران گردد، با تغییر وضعیت سیستم تغییر می‌کند، از این‌رو، مصالحه‌ای صورت می‌گیرد و مشخصهٔ قابل قبولی برای وضعیتهای مختلف سیستم انتخاب می‌شود. معمولاً مقداری نیز زیرجبرانسازی لازم است تا PSS، علاوه بر افزایش چشمگیری در گشتاور میراکننده، به افزایش اندکی در گشتاور سنکرون کننده منجر گردد.

بلوک *حذف کننده اثر حالت ماندگار* به صورت فیلتری بالاگذر، با ثابت زمانی T_W به اندازهٔ کافی بزرگ عمل می‌کند و اجازه می‌دهد تا سیگنالهای متناظر با نوسانهای ω_r، بدون تغییر عبور کنند. بدون آن، تغییرات ماندگار در سرعت، ولتاژ پایانه را تغییر می‌دهد. این بلوک اجازه می‌دهد تا PSS فقط به تغییراتِ سرعت پاسخ دهد. از نظر تابع این بلوک، مقدار T_W حساس نبوده و می‌تواند در گستره ۱ تا ۲۰ ثانیه باشد. نکتهٔ اصلی آن است که باید مقدار T_W به اندازهٔ کافی زیاد باشد تا سیگنالهای پایدارساز را در فرکانسهای موردعلاقه بدون تغییر عبور دهد، ولی آنقدر بزرگ نباشد که به هنگام پارگی سیستم، به انحراف نامطلوب ژنراتور منجر شود.

بهرهٔ پایدارساز K_{STAB} مقدار میراییِ ایجاد شده از PSS را تعیین می‌کند. به طور ایده‌ال، باید بهره در مقداری متناظر با حداکثر میرایی تنظیم گردد؛ لیکن، معمولاً مقدار آن به واسطهٔ ملاحظات دیگری محدود می‌شود.

در کاربرد PSS، باید دقت نمود که پایداری کلیِ سیستم، و نه فقط پایداری سیگنال کوچک، تقویت شود [۹]. اهداف عملکرد PSS، سیگنالهای ورودیِ جایگزین و توصیفی تفصیلی از نحوهٔ انتخاب پارامترهای PSS (به منظور تقویت پایداری کلی سیستم) در فصل هفدهم آورده شده است.

ماتریس حالتِ سیستم شامل PSS

از بلوک ۴ شکل ۱۲ ـ ۱۴ و با بکارگیری مقادیر منحرف شده، داریم:

$$\Delta v_2 = \frac{PT_W}{1 + PT_W}(K_{STAB}\,\Delta\omega_r)$$

بنابراین:

$$P\,\Delta v_2 = K_{STAB}\,P\,\Delta\omega_r - \frac{1}{T_W}\Delta v_2$$

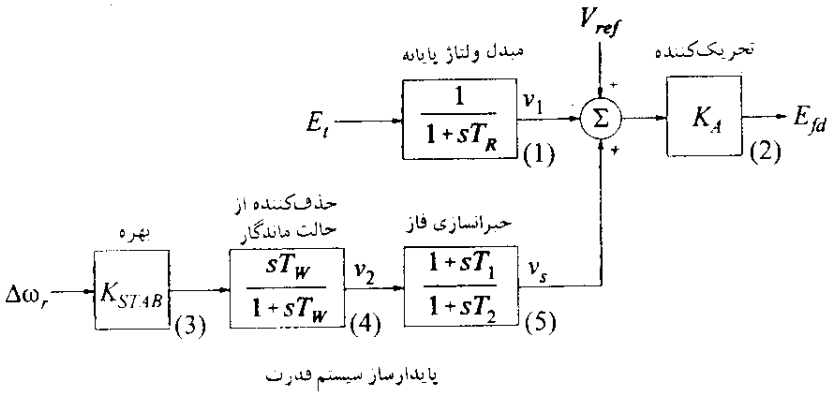
از جایگزینی $P\,\Delta\omega_r$ داده شده با معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۱۵، عبارت زیر را برحسب متغیرهای حالت

عمل AVR، میرایی ایجاد می‌کند. با افزایش بهرهٔ PSS، مقدار میرایی نیز افزایش می‌یابد.

اگر مدار پیش‌فاز، جبرانسازی بیشتری از پس‌فازِ بین ΔT_e و Δv_s فراهم آورد، PSS علاوه بر مؤلفهٔ گشتاور میراکننده، یک مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کننده منفی نیز ایجاد می‌کند. برعکس، با زیر ـ جبرانسازی، به یک مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کنندهٔ مثبت دست خواهیم یافت. معمولاً، PSS لازم است که در میرایی نوسانهای روتور نه در یک فرکانس تک، بلکه در محدوده‌ای از فرکانسها، نقش داشته باشد.

اینک ساختار کلی مدلسازی، و عملکرد پایدارسازهای قدرت را با درنظر گرفتن سیستم تحریک تریستوری نشان خواهیم داد. شکل ۱۲ ـ ۱۴ نمودار بلوکی سیستم تحریک را همراه با AVR و PSS نشان می‌دهد. از آنجا که عملکرد سیگنال کوچک در نظر گرفته خواهد شد، حدهای خروجی پایدارساز و خروجی تحریک‌کننده در شکل نشان داده نشده است. در زیر، توصیف مختصری از اصول ترکیب PSS و ملاحظاتی دربارهٔ انتخاب پارامترها آورده شده است.

نمایش PSS در شکل ۱۲ ـ ۱۴ شامل سه بلوک است: بلوک جبرانسازی فاز، بلوک حذف کنندهٔ اثر سیگنال حالت ماندگار و بلوک بهره.



شکل ۱۲ ـ ۱۴ سیستم تحریک تریستوری با AVR و PSS

بلوک *جبرانسازی فاز*، مشخصهٔ پیش‌فاز مناسب را برای جبرانسازی پس‌فاز بین ورودی تحریک کننده و گشتاورِ الکتریکی ژنراتور (فاصله هوایی) فراهم می‌آورد. شکل، بلوکی از مرتبهٔ اول را نشان می‌دهد. اما در عمل ممکن است از دو یا چند بلوک مرتبه اول برای دستیابی به جبرانسازی مطلوب فاز استفاده شود. در برخی از نمونه‌ها از بلوکهای مرتبه دوم با ریشه‌های مختلط، بهره برده شده است.

معادلهٔ مدار تحریک، با درنظر گرفتن PSS، چنین است:

$$p\,\Delta\psi_{fd} = a_{۳۲}\,\Delta\delta + a_{۳۳}\,\Delta\psi_{fd} + a_{۳۴}\,\Delta v_{۱} + a_{۳۶}\,\Delta v_{s} \qquad (۱۴۹ - ۱۲)$$

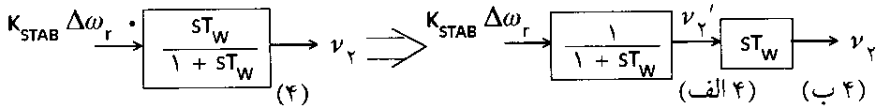
که در آن داریم:

$$a_{۳۶} = \frac{\omega_{\circ} R_{fd}}{L_{adu}} K_A \qquad (۱۵۰ - ۱۲)$$

مدل فضای حالت کامل با فرض $\Delta T_m = \circ$ و دربرگیرندهٔ PSS، به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\psi}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_{۱} \\ \Delta\dot{v}_{۲} \\ \Delta\dot{v}_{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{۱۱} & a_{۱۲} & a_{۱۳} & \circ & \circ & \circ \\ a_{۲۱} & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & a_{۳۲} & a_{۳۳} & a_{۳۴} & \circ & a_{۳۶} \\ \circ & a_{۴۲} & a_{۴۳} & a_{۴۴} & \circ & \circ \\ a_{۵۱} & a_{۵۲} & a_{۵۳} & \circ & a_{۵۵} & \circ \\ a_{۶۱} & a_{۶۲} & a_{۶۳} & \circ & a_{۶۵} & a_{۶۶} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \\ \Delta v_{۱} \\ \Delta v_{۲} \\ \Delta v_{s} \end{bmatrix} \qquad (۱۵۱ - ۱۲)$$

روشهای دیگر برخورد با بلوکهای ۴ و ۵. می‌توان بلوک ۴ را به صورت ترکیبی از دو بلوک درنظر گرفت:



در این صورت، $\Delta v'_۲$ متغیر حالت خواهد شد و:

$$p\,\Delta v'_۲ = \frac{1}{T_W}\left(K_{STAB}\,\Delta\omega_r - \Delta v'_۲\right)$$

و خروجی بلوک $\Delta v_۲$ نیز به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{aligned} \Delta v_۲ &= T_W\,p\,\Delta v'_۲ \\ &= K_{STAB}\,\Delta\omega_r - \Delta v'_۲ \end{aligned}$$

مزیت این روش، آن است که لازم نیست عبارتی برای مشتق متغیر ورودی به بلوک بیان کنیم. این موضوع در مواقعی مهم است که ورودی جزء متغیرهای حالت نیست، در چنین حالتی عبارتِ مشتق ورودی بسادگی در دسترس نمی‌باشد. به طور مشابه، می‌توان با بلوک ۵

برای $\Delta\nu_2$ به دست می‌آوریم:

$$P\,\Delta\nu_2 = K_{STAB}\left[a_{11}\Delta\omega_r + a_{12}\Delta\delta + a_{13}\Delta\psi_{fd} + \frac{1}{2H}\Delta T_m\right] - \frac{1}{T_W}\Delta\nu_2$$

$$= a_{51}\Delta\omega_r + a_{52}\Delta\delta + a_{53}\Delta\psi_{fd} + a_{55}\Delta\nu_2 + \frac{K_{STAB}}{2H}\Delta T_m \qquad (۱۴۵-۱۲)$$

که در آن:

$$a_{51} = K_{STAB}\,a_{11} \qquad a_{52} = K_{STAB}\,a_{12}$$

$$a_{53} = K_{STAB}\,a_{13} \qquad a_{55} = -\frac{1}{T_W} \qquad (۱۴۶-۱۲)$$

از آنجا که $P\,\Delta\nu_2$ تابعی از $\Delta\nu_1$ و $\Delta\nu_3$ نیست، بنابراین $a_{54} = a_{56} = 0$ است.

از بلوک ۵، نتیجه می‌شود:

$$\Delta\nu_s = \Delta\nu_2\left(\frac{1 + PT_1}{1 + PT_2}\right)$$

پس:

$$P\,\Delta\nu_s = \frac{T_1}{T_2}P\,\Delta\nu_2 + \frac{1}{T_2}\Delta\nu_2 - \frac{1}{T_2}\Delta\nu_s$$

با جایگزینیِ $P\,\Delta\nu_2$، با معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۴۵، نتیجه می‌شود:

$$P\,\Delta\nu_s = a_{61}\Delta\omega_r + a_{62}\Delta\delta + a_{63}\Delta\psi_{fd} +$$

$$a_{64}\Delta\nu_1 + a_{65}\Delta\nu_2 + a_{66}\Delta\nu_s + \frac{T_1}{T_2}\,\frac{K_{STAB}}{2H}\Delta T_m \qquad (۱۴۷-۱۲)$$

که در آن داریم:

$$a_{61} = \frac{T_1}{T_2}a_{51} \qquad a_{62} = \frac{T_1}{T_2}a_{52}$$

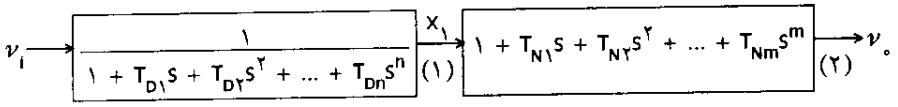
$$a_{63} = \frac{T_1}{T_2}a_{53} \qquad a_{65} = \frac{T_1}{T_2}a_{55} + \frac{1}{T_2} \qquad (۱۴۸-۱۲)$$

$$a_{66} = -\frac{1}{T_2}$$

از بلوک ۲ شکل ۱۲ ـ ۱۴، می‌توان نوشت:

$$\Delta E_{fd} = K_A(\Delta\nu_s - \Delta\nu_1)$$

بنابراین تابع تبدیل مرتبهٔ n را می‌توان برحسب دو بلوک (به صورت شکل ۱۲ ـ ۱۶) نمایش داد.



شکل ۱۲ ـ ۱۶

باتوجه به بلوک ۱ در شکل ۱۲ ـ ۱۶ می‌توان نوشت:

$$x_1 (1 + T_{D1}s + T_{D2}s^2 + \dots + T_{Dn}s^n) = \nu_i \qquad (۱۵۳ - ۱۲)$$

فرض کنید:

$$\begin{aligned} x_2 &= \dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt} \\ x_3 &= \dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} \\ &\dots\dots\dots\dots\dots \\ x_n &= \dot{x}_{n-1} = \frac{dx_{n-1}}{dt} \end{aligned} \qquad (۱۵۴ - ۱۲)$$

با توجه به معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۵۳، در حوزه زمان، می‌توان نوشت:

$$x_1 + T_{D1}x_2 + T_{D2}x_3 + \dots + T_{D(n-1)}x_n + T_{Dn}\dot{x}_n = \nu_i$$

بنابراین:

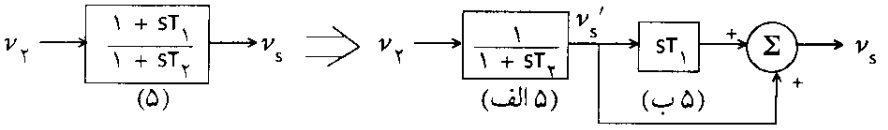
$$\dot{x}_n = \frac{1}{T_{Dn}}[\nu_i - x_1 - T_{D1}x_2 - \dots - T_{D(n-1)}x_n] \qquad (۱۵۵ - ۱۲)$$

از ترکیب معادلات ۱۲ ـ ۱۵۴ و ۱۲ ـ ۱۵۵، داریم:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\frac{1}{T_{Dn}} & -\frac{T_{D1}}{T_{Dn}} & -\frac{T_{D2}}{T_{Dn}} & \dots & -\frac{T_{D(n-1)}}{T_{Dn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \frac{1}{T_{Dn}} \end{bmatrix} \nu_i$$

(۱۵۶ ـ ۱۲)

به‌صورت زیر برخورد نمود:



در این حالت، v_s'، متغیر حالت است و:

$$p\,\Delta v_s' = \frac{1}{T_2}(\Delta v_2 - \Delta v_s')$$

و خروجی Δv_s به صورت زیر داده می‌شود:

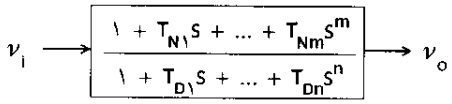
$$\begin{aligned}\Delta v_s &= T_1\, p\, \Delta v_s' + \Delta v_s' \\ &= \frac{T_1}{T_2}\Delta v_2 + \left(1 - \frac{1}{T_2}\right)\Delta v_s'\end{aligned}$$

عیب این روش آن است که خروجی بلوک جزء متغیرهای حالت نیست و بنابراین نمی‌توان مستقیماً با محاسبهٔ متغیر حالت بر آن نظارت کرد.

برای مدلهای سیستم تحریکی با بلوکهای تابع تبدیل درجهٔ بالاتر می‌توان از روش کلی زیر استفاده کرد.

بلوکهای تابع تبدیل درجهٔ بالاتر

یک تابع تبدیل مرتبهٔ n را با نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۱۵ درنظر بگیرید:



شکل ۱۲ ـ ۱۵

سیستم بالا n قطب و m صفر $(m < n)$ دارد. تابع تبدیل شکل ۱۲ ـ ۱۵ را می‌توان به دو قسمت زیر تقسیم کرد:

$$G(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{x_1(s)}{v_i(s)}\,\frac{v_o(s)}{x_1(s)} \qquad (۱۵۲ ـ ۱۲)$$

پایداری سیگنال کوچک سیستم را با هر دو نوع کنترل تحریک، با تعیین موارد زیر تحلیل کنید:

۱. عناصر ماتریس حالت؛

۲. ثابتهای نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۱۲؛

۳. مقادیر ویژهٔ ماتریس حالت، ماتریس مشارکت، و فرکانس و نسبت میرایی هر مُد نوسانی؛

۴. ضرایب گشتاور سنکرون‌کننده و میراکننده در فرکانس نوسان روتور؛

نتایج را با نتایج مثالهای ۱۲ ـ ۲ و ۱۳ ـ ۲ مقایسه کنید.

حل

۱. از معادلات حاصل از بخش ۱۲ ـ ۳ ـ ۳ ماتریس حالت سیستم شامل AVR و PSS عبارت است از:

حالتها

$$A = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{cc} \begin{bmatrix} ۰ & -۰/۱۰۹۲ & -۰/۱۲۳۶ & ۰ & ۰ & ۰ \\ ۳۷۶/۹۹ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ \\ ۰ & -۰/۱۹۳۸ & -۰/۴۲۲۹ & -۲۷/۳۱۷۲ & ۰ & ۲۷/۳۱۷۲ \\ ۰ & -۷/۳۱۲۵ & ۲۰/۸۳۹۱ & -۵۰/۰ & ۰ & ۰ \\ ۰ & -۱/۰۳۷۲ & -۱/۱۷۳۸ & ۰ & -۰/۷۱۴۳ & ۰ \\ ۰ & -۴/۸۴۰۴ & -۵/۴۷۷۷ & ۰ & ۲۶/۹۶۹۷ & -۳۰/۳۰۳۰ \end{bmatrix} & \begin{array}{c} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_s \end{array} \end{array}$$

با درنظر گرفتن فقط AVR (یعنی بدون PSS)، دو ردیف و ستون آخر وجود نخواهند داشت.

۲. ثابتهای نمودار بلوکی عبارتند از:

$$K_1 = ۰/۷۶۴۳ \qquad K_2 = ۰/۸۶۴۹ \qquad K_3 = ۰/۳۲۳۰$$
$$K_4 = ۱/۴۱۸۷ \qquad K_5 = -۰/۱۴۶۳ \qquad K_6 = ۰/۴۱۶۸$$
$$T_3 = ۲/۳۶۵ \qquad T_R = ۰/۰۲ \qquad G_{ex}(s) = ۲۰۰/۰$$

۳. الف) فقط با AVR، مقادیر ویژه عبارت است از:

$$\lambda_1, \lambda_2 = +۰/۵۰۴ \pm j\,۷/۲۳ \qquad (\omega_d = ۱/۱۵\ \text{Hz}, \zeta = -۰/۰۷)$$
$$\lambda_3 = -۲۰/۲۰۲$$
$$\lambda_4 = -۳۱/۲۳۰$$

از بلوک ۲ شکل ۱۲ ـ ۱۶، معادلهٔ خروجی عبارت است از:

$$\begin{aligned} v_{\circ} &= x_{۱} + T_{N۱} x_{۲} + T_{N۲} x_{۳} + \dots + T_{Nm} x_{m+۱} \\ &= [\, ۱ \; T_{N۱} \; T_{N۲} \dots T_{Nm} \; \circ \dots \circ \,] \, \mathbf{x} + \circ \, v_{i} \end{aligned} \qquad (۱۵۷ - ۱۲)$$

معادلات ۱۲ ـ ۱۵۶ و ۱۲ ـ ۱۵۷ به شکل فضای حالت زیر هستند:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u$$

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x} + du$$

متغیرهای $x_{۱}$ ، $x_{۲}$ ، ... ، x_{n} تعریف شده در بالا متغیرهای *فاز*[1] نامیده می‌شوند. که مجموعه‌ای خاص از متغیرهای حالت، شامل یک متغیر و $n - ۱$ مشتق آن هستند.

مثال ۱۲ ـ ۴

این مثال تعمیمی از دو مثال قبلی است که پایداری سیگنال کوچک سیستم شکل ۱۲ ـ ۵ را تحلیل کردند. در اینجا اثر دو نوع دیگر از کنترل تحریک را درنظر می‌گیریم:

الف) تحریک کنندهٔ تریستوری با AVR، که مطابق شکل ۱۲ ـ ۱۱ پارامترهای آن به شکل مقابل است:

$$K_{A} = ۲۰۰ \qquad T_{R} = \circ/\circ۲$$

ب) سیستم تحریک بالا همراه با PSS که مطابق شکل ۱۲ ـ ۱۳ پارامترهای آن عبارت است از:

$$K_{STAB} = ۹/۵ \qquad T_{W} = ۱/۴ \text{ (ثانیه)} \qquad T_{۱} = \circ/۱۵۴ \text{ (ثانیه)} \quad T_{۲} = \circ/\circ۳۳ \text{ (ثانیه)}$$

پارامترهای ژنراتور و داده‌های اشباع، همان مقادیر مثالِ ۱۲ ـ ۳ هستند. با مدار انتقال ۲ در حالت عدم سرویس‌دهی، خروجی نیروگاه در مبنای واحد بر پایهٔ ۲۲۲۰ MVA و ۲۴ KV به صورت زیر است:

$$P = \circ/۹ \qquad Q = \circ/۳ \text{ (فوق تحریک)}$$

$$E_{t} = ۱/\circ \angle ۳۶^{\circ} \qquad E_{B} = \circ/۹۹۵ \angle \circ^{\circ}$$

1. Phase Variables

مدار تحریک است. دو مُد غیرنوسانی نیز به سیستم تحریک مربوط هستند.

۴. الف) ضرایب گشتاور سنکرون کننده و میراکننده فقط با AVR. از نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۱۲، تغییر شاردور تحریک ناشی از AVR و عکس‌العمل آرمیچر (AR) عبارت است از:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{-K_3\left[K_4\left(1 + sT_R\right) + K_A K_5\right]}{s^2 T_3 T_R + s\left(T_3 + T_R\right) + \left(1 + K_3 K_6 K_A\right)}\ \Delta\delta$$

با جایگزینی مقادیر ثابتهای خلاصه شده در بالا (۱) و ساده سازی، نتیجه می‌شود:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{۸/۹۹۳ - ۰/۰۰۹۲\, s}{۰/۰۴۷۳\, s^2 + ۲/۳۸۵\, s + ۲۷/۹۲۵}\ \Delta\delta$$

با محاسبهٔ مقدار ویژه، فرکانس مختلط نوسان روتور ۷/۲۳ j + ۰/۵۰۴ می‌باشد. با مساوی قرار دادن s با این فرکانس مختلط، عبارت بالا برای $\Delta\psi_{fd}$ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{۸/۹۸۸ - j\ ۰/۰۶۷}{۲۶/۶۷ + j\ ۱۷/۵۹}\ \Delta\delta$$

از این رو ΔT_e ناشی از $\Delta\psi_{fd}$ عبارت است از:

$$\Delta T_e \Big|_{(AVR + AR)} = K_2\, \Delta\psi_{fd} = ۰/۸۶۴۹\, \Delta\psi_{fd}$$

$$= \frac{۷/۷۷۴ - j\ ۰/۰۵۷۳}{۲۶/۶۷ + j\ ۱۷/۵۹}\ \Delta\delta$$

$$= ۰/۲۰۲\, \Delta\delta - ۰/۱۳۵۴\, (j\, \Delta\delta)$$

اکنون می‌توان نوشت:

$$pu\ \Delta\omega_r = \frac{s\, \Delta\delta}{\omega_0}$$

$$= \frac{(۰/۵۰۴ + j\ ۷/۲۳)\, \Delta\delta}{۳۷۷}$$

پس داریم

$$j\, \Delta\delta = \frac{۳۷۷}{۷/۲۳}\, \Delta\omega_r - \frac{۰/۵۰۴}{۷/۲۳}\, \Delta\delta$$

$$= ۵۲/۱۴\, \Delta\omega_r - ۰/۰۷\, \Delta\delta$$

ماتریس مشارکت برابر می‌شود با:

$$\begin{array}{c} \begin{bmatrix} ۰/۴۷۴ & ۰/۴۷۴ & ۰/۰۷۷ & ۰/۰۲۴ \\ ۰/۴۷۴ & ۰/۴۷۴ & ۰/۰۷۷ & ۰/۰۲۴ \\ ۰/۰۶۵ & ۰/۰۶۵ & ۲/۵۲۴ & ۱/۶۳۳ \\ ۰/۰۱۰ & ۰/۰۱۰ & ۱/۶۷۷ & ۲/۶۸۱ \end{bmatrix} \\ \begin{array}{cccc} \lambda_۱ & \lambda_۲ & \lambda_۳ & \lambda_۴ \end{array} \end{array} \begin{array}{c} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \\ \Delta v_۱ \\ \\ \end{array}$$

در بالا فقط دامنه‌های ضرایب مشارکت نشان داده شده است زیرا زوایا اطلاعات سودمندی را به دست نمی‌دهند.

فقط با AVR، سیستم از طریق یک مُد نوسانی ۱/۱۵ هرتز ناپایدار می‌شود. باتوجه به ضرایب مشارکت، مشاهده می‌شود که این مُد به طور عمده به زاویهٔ روتور و سرعت مربوط است. هر دو مُد غیرنوسانی، که سریعاً محو می‌شوند، مربوط به AVR و مدار تحریک هستند.

ب) با درنظر گرفتن هر دو AVR و PSS، مقادیر ویژه عبارتند از:

$$\lambda_۱ = -۳۹/۰۹۷$$

$$\lambda_۲, \lambda_۳ = -۱/۰۰۵ \pm j\,۶/۶۰۷ \qquad (\omega_d = ۱/۰۵\ \text{Hz}, \zeta = ۰/۱۵)$$

$$\lambda_۴ = -۰/۷۳۹$$

$$\lambda_۵, \lambda_۶ = -۱۹/۷۹۷ \pm j\,۱۲/۸۲۲ \qquad (\omega_d = ۲/۰۴\ \text{Hz}, \zeta = ۰/۸۴)$$

و ماتریس مشارکت (فقط دامنه‌ها) برابر می‌شود با:

$$\begin{array}{c} \begin{bmatrix} ۰/۰۰۴ & ۰/۵۲۸ & ۰/۵۲۵ & ۰/۰۳۵ & ۰/۰۱۳ & ۰/۰۱۳ \\ ۰/۰۰۴ & ۰/۵۲۸ & ۰/۵۲۸ & ۰/۰۳۵ & ۰/۰۱۳ & ۰/۰۱۳ \\ ۰/۱۸۸ & ۰/۰۷۳ & ۰/۰۷۳ & ۰/۰۰۲ & ۰/۹۸۴ & ۰/۹۸۴ \\ ۰/۹۰۸ & ۰/۰۲۵ & ۰/۰۲۵ & ۰/۰۰۰ & ۰/۵۲۷ & ۰/۵۲۷ \\ ۰/۰۱۲ & ۰/۱۶۰ & ۰/۱۶۰ & ۱/۰۷۲ & ۰/۰۹۴ & ۰/۰۹۴ \\ ۰/۳۰۰ & ۰/۰۵۲ & ۰/۰۵۲ & ۰/۰۰۱ & ۰/۴۱۷ & ۰/۴۱۷ \end{bmatrix} \\ \begin{array}{cccccc} \lambda_۱ & \lambda_۲ & \lambda_۳ & \lambda_۴ & \lambda_۵ & \lambda_۶ \end{array} \end{array} \begin{array}{c} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \\ \Delta v_۱ \\ \Delta v_۲ \\ \Delta v_s \\ \\ \end{array}$$

با افزودن PSS، سیستم خیلی پایدار می‌شود. در این حالت دو مُد نوسانی وجود دارد: یکی مُد زاویهٔ روتور با فرکانس ۱/۰۵ هرتز و دیگری فرکانس ۲/۰۴ هرتز که متناظر با سیستم تحریک و

با:

$$\Delta v_s = K_{STAB} \frac{sT_W}{1 + sT_W} \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \Delta\omega_r$$

بنابراین:

$$\Delta T_e \big|_{PSS} = K_2 \, \Delta\psi_{fd} \big|_{PSS}$$

$$= \frac{K_{STAB} K_2 K_3 K_A (1 + sT_R)(1 + sT_1) sT_W}{[(1 + sT_3)(1 + sT_R) + K_3 K_6 K_A](1 + sT_2)(1 + sT_W)} \Delta\omega_r$$

با جایگزین کردن مقادیر عددی پارامترها، قراردادن $s = -1/005 + j\,6/607$ و ساده سازی، به دست می‌آوریم:

$$\Delta T_e \big|_{PSS} = (24/0 + j\,8/089)\,\Delta\omega_r$$

اکنون:

$$j\,\Delta\omega_r = j\,\frac{s}{\omega_0}\,\Delta\delta = j\,\frac{-1/005 + j\,6/607}{377}\,\Delta\delta$$

$$= -0/01752\,\Delta\delta - \frac{1/005}{377}\,(j\,\Delta\delta)$$

$$= -0/01752\,\Delta\delta - \frac{1/005}{377}\left(\frac{377}{6/607}\,\Delta\omega_r + \frac{1/005}{6/607}\,\Delta\delta\right)$$

$$= -0/0179\,\Delta\delta - 0/1521\,\Delta\omega_r$$

از این رو:

$$\Delta T_e \big|_{PSS} = 24/0\,\Delta\omega_r + 8/089\,(-0/0179\,\Delta\delta - 0/1521\,\Delta\omega_r)$$
$$= -0/145\,\Delta\delta + 22/77\,\Delta\omega_r$$

ضرایب گشتاور سنکرون کننده و میراکننده ناشی از PSS عبارت است از:

$K_{S(PSS)} = -0/145$ گشتاور مبنای واحد بر رادیان

$K_{D(PSS)} = 22/77$ گشتاور مبنای واحد بر تغییر سرعت مبنای واحد

با جایگزینی $j\,\Delta\delta$ در عبارت برای ΔT_e، به دست می‌آوریم:

$$\Delta T_e \,|_{(AVR+AR)} = ۰/۲۰۲\,\Delta\delta - ۰/۱۳۵۴\,(۵۲/۱۴\,\Delta\omega_r - ۰/۰۷\,\Delta\delta)$$
$$= ۰/۲۱۱۵\,\Delta\delta - ۷/۰۶\,\Delta\omega_r$$

بنابراین:

$K_{S(AVR+AR)} = ۰/۲۱۱۵$ گشتاور مبنای واحد بر رادیان

$K_{D(AVR+AR)} = -۷/۰۶$ گشتاور مبنای واحد بر تغییر سرعت مبنای واحد

تغییر شاردور تحریک، ناشی از عکس‌العمل آرمیچر و AVR است. در مثال ۱۲ ـ ۳، دیدیم که تأثیر عکس‌العمل آرمیچر بتنهایی به کاهش K_S به اندازهٔ ۰/۰۰۱۷۲ و افزایش K_D به اندازهٔ ۱/۵۳ در فرکانس ۶/۴۱ رادیان بر ثانیهٔ نوسان روتور می‌انجامد. بنابراین تأثیر AVR بتنهایی، افزایش K_S تقریباً به اندازهٔ ۱/۵۳ و کاهش K_D تقریباً به اندازهٔ ۸/۵ است.

ضرایب گشتاور سنکرون کننده و میراکنندهٔ کلی عبارت است از:

$$K_S = K_1 + K_{S(AVR+AR)} = ۰/۷۶۴۳ + ۰/۲۱۱۵$$
$$= ۰/۹۷۵۸ \text{ گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

و:

$K_D = K_{D(AVR+AR)} = -۷/۰۶$ گشتاور مبنای واحد بر تغییر سرعت مبنای واحد

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۸۲، نسبت میرایی متناظر عبارت است از:

$$\zeta = \frac{۱}{۲}\cdot\frac{K_D}{\sqrt{K_S\,۲\,H\,\omega_o}} = \frac{۱}{۲}\,\frac{-۷/۰۶}{۲\sqrt{۰/۹۷۵۸\times ۲\times ۳/۵\times ۳۷۷}}$$
$$= -۰/۰۷$$

که با ζ محاسبه شده از مقادیر ویژه مطابقت دارد.

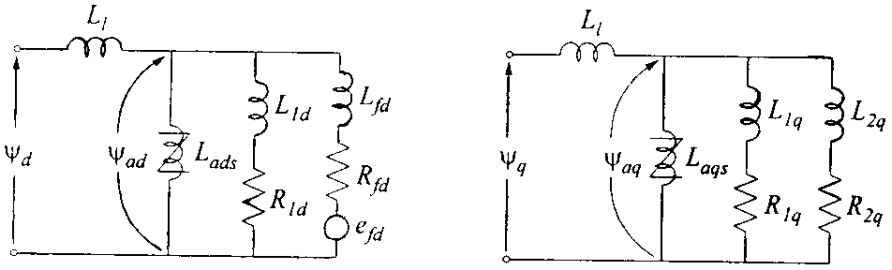
ب) ضرایب گشتاور سنکرون کننده و میراکننده با PSS. در این حالت فرکانس مختلط نوسان روتور برابر با $-۱/۰۰۵ + j\,۶/۶۰۷$ است. از نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۱۳، $\Delta\psi_{fd}$ی ناشی از PSS عبارت است از:

$$\Delta\psi_{fd}\,|_{PSS} = \frac{K_۳ K_A}{۱ + sT_۳}\left(\Delta\nu_s - \frac{K_۴}{۱ + sT_R}\,\Delta\psi_{fd}\right)$$

مدل	مدل کلاسیک ($K_D = ۰$)	E_{fd} ثابت	فقط AVR	PSS و AVR
ω_n	۱/۰۲ Hz	۱/۰۷ Hz	۱/۱۵ Hz	۱/۰۵ Hz
ζ	۰	۰/۰۱۷	−۰/۰۷	۰/۱۵
K_s	۰/۷۵۷	۰/۷۶۳	۰/۹۷۶	۰/۸۲۹
K_D	۰	۱/۵۳	−۷/۰۶	۱۴/۰۸

۱۲ ـ ۶ ماتریس حالت سیستم با سیم‌پیچ میراکننده

هنگامی که سیم‌پیچهای میراکنندهٔ ژنراتور نیز درنظر گرفته شود، معادلات سیستم که در بخش ۱۲ ـ ۳ ـ ۱۲ به دست آمد، به صورت زیر تغییر پیدا می‌کنند. فرض می‌کنیم مدل، شامل یک سیم‌پیچ میراکنندهٔ محورِ d و دو سیم‌پیچ میراکنندهٔ محورِ q (مطابق شکل ۱۲ ـ ۱۷) باشد.



شکل ۱۲ ـ ۱۷ مدارهای معادل ماشین سنکرون

معادلات مدار روتور

$$P\psi_{fd} = \frac{\omega_\circ R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} - \omega_\circ R_{fd} i_{fd}$$

$$P\psi_{1d} = -\omega_\circ R_{1d} i_{1d} \qquad (۱۵۸ ـ ۱۲)$$

$$P\psi_{1q} = -\omega_\circ R_{1q} i_{1q}$$

$$P\psi_{2q} = -\omega_\circ R_{2q} i_{2q}$$

جریانهای روتور به صورت زیر داده می‌شوند:

$$i_{fd} = \frac{1}{L_{fd}} (\psi_{fd} - \psi_{ad}) \qquad (۱۵۹ ـ ۱۲)$$

و اکنون باید K_S و K_D ناشی از AVR و عکس‌العمل آرمیچر (AR) را در $s = -۱/۰۰۵ + j\,۶/۶۰۷$ محاسبه کرد. با بکارگیری همان روش قبلی، داریم:

$$K_{S\,(AVR+AR)} = ۰/۲۱ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

$$K_{D\,(AVR+AR)} = -۸/۶۹ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر تغییر سرعت مبنای واحد}$$

ضرایب گشتاور سنکرون کننده و میراکنندهٔ کلی عبارت است از:

$$K_S = K_۱ + K_{S\,(AVR+AR)} + K_{S\,(PSS)}$$
$$= ۰/۷۶۴۳ + ۰/۲۱ - ۰/۱۴۵$$
$$= ۰/۸۲۹۳ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

$$K_D = K_{D\,(AVR+AR)} + K_{D\,(PSS)}$$
$$= -۸/۶۹ + ۲۲/۷۷$$
$$= ۱۴/۰۸ \quad \text{گشتاور مبنای واحد بر تغییر سرعت مبنای واحد}$$

از معادلات ۱۲ ـ ۸۱، فرکانس طبیعی میرانشده برابر است با:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_S \omega_۰}{۲H}} = \sqrt{\frac{۰/۸۲۹۳ \times ۳۷۷}{۲ \times ۳/۵}} = ۶/۶۸۲ \quad \text{رادیان بر ثانیه}$$

$$\zeta = \frac{۱}{۲}\,\frac{K_D}{\sqrt{K_S\, ۲H\, \omega_۰}} = \frac{۱}{۲}\,\frac{۱۴/۰۸}{\sqrt{۰/۸۲۹۳ \times ۷/۰ \times ۳۷۷}} = ۰/۱۵$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{۱ - \zeta^۲} = ۶/۶۸۳ \sqrt{۱ - ۰/۱۵^۲} = ۶/۶۰۷ \quad \text{رادیان بر ثانیه}$$

نتایج بالا با ζ و ω_dی محاسبه شده از مقادیر ویژه، مطابقت دارد.

مشاهده می‌کنیم که PSS، K_D را به اندازهٔ ۲۲/۷۷ افزایش و K_S را به اندازهٔ ۰/۱۴۵ کاهش داده است. کاهش K_S نشان می‌دهد که جبرانسازِ پیش‌فاز کاربردی به اندکی فوق جبرانسازی در فرکانس نوسان روتور در ۶/۶۱ رادیان بر ثانیه منجر می‌شود. با تنظیم $T_۱$ و یا $T_۲$، می‌توان جبرانسازی را تغییر داد تا مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کنندهٔ صفر و یا حتی مثبت را به دست دهد.

در زیر براساس نتایج این مثال و دو مثال قبل خلاصه‌ای از فرکانس نوسان روتور، نسبت میرایی، K_S و K_D با انواع مختلف کنترل تحریک و با مدل کلاسیک، آورده شده است.

$$X_{Td} = X_E + \bar{\omega}\,(L''_{ads} + L_l) = X_E + X''_{ds} \qquad X_{Tq} = X_E + \bar{\omega}\,(L''_{aqs} + L_l) = X_E + X''_{qs}$$

$$R_T = R_a + R_E \qquad D = R_T^2 + X_{Td} X_{Tq}$$

همان‌طور که در فصل پنجم بحث شد، $\bar{\omega}$ برابر با ۱/۰ pu فرض می‌شود تا اثر ناشی از نادیده گرفتن گذراهای استاتور را خنثی کند.

با بیان معادلات ۱۲ ـ ۱۶۴ و ۱۲ ـ ۱۶۵ برحسب مقادیر منحرف شده، نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \Delta i_d &= m_1 \Delta\delta + m_2 \Delta\psi_{fd} + m_3 \Delta\psi_{1d} + m_4 \Delta\psi_{1q} + m_5 \Delta\psi_{2q} \\ \Delta i_q &= n_1 \Delta\delta + n_2 \Delta\psi_{fd} + n_3 \Delta\psi_{1d} + n_4 \Delta\psi_{1q} + n_5 \Delta\psi_{2q} \end{aligned} \qquad (۱۶۶ ـ ۱۲)$$

$$m_1 = \frac{E_B}{D}\,(X_{Tq} \sin\delta_\circ - R_T \cos\delta_\circ)$$

$$m_2 = \frac{X_{Tq}}{D}\,\frac{L''_{ads}}{L_{fd}} \qquad m_3 = \frac{X_{Tq}}{D}\,\frac{L''_{ads}}{L_{1d}}$$

$$m_4 = -\frac{R_T}{D}\,\frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} \qquad m_5 = -\frac{R_T}{D}\,\frac{L''_{aqs}}{L_{2q}}$$

$$n_1 = \frac{E_B}{D}\,(R_T \sin\delta_\circ + X_{Td} \cos\delta_\circ) \qquad (۱۶۷ ـ ۱۲)$$

$$n_2 = \frac{R_T}{D}\,\frac{L''_{ads}}{L_{fd}} \qquad n_3 = \frac{R_T}{D}\,\frac{L''_{ads}}{L_{1d}}$$

$$n_4 = \frac{X_{Td}}{D}\,\frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} \qquad n_5 = \frac{X_{Td}}{D}\,\frac{L''_{aqs}}{L_{2q}}$$

و عبارات مربوط به $\Delta\psi_{ad}$ و $\Delta\psi_{aq}$ به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{ad} &= L''_{ads}\left(-\Delta i_d + \frac{\Delta\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\Delta\psi_{1d}}{L_{1d}}\right) \\ &= (-m_1 L''_{ads})\,\Delta\delta + L''_{ads}\left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2\right)\Delta\psi_{fd} + L''_{ads}\left(\frac{1}{L_{1d}} - m_3\right)\Delta\psi_{1d} \\ &\quad + (-m_4 L''_{ads})\,\Delta\psi_{1q} + (-m_5 L''_{ads})\,\Delta\psi_{2q} \end{aligned} \qquad (۱۶۸ ـ ۱۲)$$

$$i_{1d} = \frac{1}{L_{1d}} (\psi_{1d} - \psi_{ad})$$

$$i_{1q} = \frac{1}{L_{1q}} (\psi_{1q} - \psi_{aq})$$

$$i_{2q} = \frac{1}{L_{2q}} (\psi_{2q} - \psi_{aq})$$

شاردور متقابل محورِ q و d به صورت زیر داده می‌شود:

$$\psi_{fd} = -L_{ads}\, i_d + L_{ads}\, i_{fd} + L_{ads}\, i_{1d}$$

$$= L''_{ads} \left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \qquad (۱۶۰-۱۲)$$

$$\psi_{aq} = L''_{aqs} \left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \qquad (۱۶۱-۱۲)$$

که در آن:

$$L''_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} \qquad (۱۶۲-۱۲)$$

$$L''_{aqs} = \frac{1}{\frac{1}{L_{aqs}} + \frac{1}{L_{1q}} + \frac{1}{L_{2q}}} \qquad (۱۶۳-۱۲)$$

بدین ترتیب روابط مربوط به i_d و i_q (متناظر با معادلات ۱۲ ـ ۱۰۳ و ۱۲ ـ ۱۰۴) به شکل زیر درمی‌آید:

$$i_d = \frac{X_{Tq} E_{qN} - R_T E_{dN}}{D} \qquad (۱۶۴-۱۲)$$

$$i_q = \frac{R_T E_{qN} + X_{Td} E_{dN}}{D}$$

که در آن:

$$E_{dN} = E''_d + E_B \sin\delta \qquad E_{qN} = E''_q - E_B \cos\delta$$

$$E''_d = \bar{\omega}\, L''_{aqs} \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \qquad E''_q = \bar{\omega}\, L''_{ads} \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right)$$

(۱۶۵-۱۲)

که در آن:

$$a_{11} = -\frac{K_D}{2H} \qquad a_{12} = -\frac{K_1}{2H} \qquad a_{13} = -\frac{K_2}{2H}$$
$$a_{14} = -\frac{K_{21}}{2H} \qquad a_{15} = -\frac{K_{22}}{2H} \qquad a_{16} = -\frac{K_{23}}{2H} \qquad (۱۲-۱۷۳)$$
$$b_{11} = \frac{1}{2H}$$

همانند قبل:

$$p\,\Delta\delta = a_{21}\,\Delta\omega_r \qquad (۱۲-۱۷۴)$$

که در آن:

$$a_{21} = \omega_0 = \alpha\,\pi\,f_0 \qquad (۱۲-۱۷۵)$$

از معادلات ۱۲ ـ ۱۵۸، ۱۲ ـ ۱۵۹ و ۱۲ ـ ۱۶۸ داریم:

$$p\,\Delta\psi_{fd} = a_{31}\,\Delta\omega_r + a_{32}\,\Delta\delta + a_{33}\,\Delta\psi_{fd} + a_{34}\,\Delta\psi_{1d} + a_{35}\,\Delta\psi_{1q} + a_{36}\,\Delta\psi_{2q} + b_{32}\,\Delta e_{fd} \qquad (۱۲-۱۷۶)$$

که در آن:

$$a_{31} = 0 \qquad a_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L''_{ads}$$
$$a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}}\left(1 - \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L''_{ads}\right)$$
$$a_{34} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}}\left(m_3 L''_{ads} - \frac{L''_{ads}}{L_{fd}}\right) \qquad (۱۲-۱۷۷)$$
$$a_{35} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_4 L''_{ads} \qquad a_{36} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_5 L''_{ads}$$
$$b_{32} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}}$$

به‌طور مشابهی:

$$\begin{aligned} p\Delta\psi_{1d} &= -\omega_0 R_{1d}\,\Delta i_{1d} \\ &= a_{41}\,\Delta\omega_r + a_{42}\,\Delta\delta + a_{43}\,\Delta\psi_{fd} + a_{44}\,\Delta\psi_{1d} + a_{45}\,\Delta\psi_{1q} + a_{46}\,\Delta\psi_{2q} \end{aligned} \qquad (۱۲-۱۷۸)$$

$$\Delta\psi_{aq} = (-n_1 L''_{aqs})\Delta\delta + (-n_2 L''_{aqs})\Delta\psi_{fd} + (-n_3 L''_{aqs})\Delta\psi_{1d}$$

$$+ L''_{aqs}\left(\frac{1}{L_{1q}} - n_4\right)\Delta\psi_{1q} + L''_{ads}\left(\frac{1}{L_{2q}} - n_5\right)\Delta\psi_{2q} \qquad (۱۶۹ - ۱۲)$$

عبارت ΔT_e (متناظر با معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۱۲) به صورت زیر داده می‌شود:

$$\Delta T_e = \psi_{ad0}\,\Delta i_q + i_{q0}\,\Delta\psi_{ad} - \psi_{aq0}\,\Delta i_d - i_{d0}\,\Delta\psi_{aq}$$

$$= K_1\,\Delta\delta + K_2\,\Delta\psi_{fd} + K_{21}\,\Delta\psi_{1d} + K_{22}\,\Delta\psi_{1q} + K_{23}\,\Delta\psi_{2q} \qquad (۱۷۰ - ۱۲)$$

که در آن:

$$K_1 = n_1(\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_1(\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0})$$

$$K_2 = n_2(\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_2(\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) + \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} i_{q0}$$

$$K_{21} = n_3(\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_3(\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) + \frac{L''_{ads}}{L_{1d}} i_{q0} \qquad (۱۷۱ - ۱۲)$$

$$K_{22} = n_4(\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_4(\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) - \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} i_{d0}$$

$$K_{23} = n_5(\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_5(\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) - \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}} i_{d0}$$

از معادلات ۱۲ ـ ۸۳ و ۱۲ ـ ۱۷۰ داریم:

$$p\,\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}[\Delta T_M - \Delta T_e - K_D\,\Delta\omega_r]$$

$$= \frac{1}{2H}[\Delta T_m - K_1\,\Delta\delta - K_2\,\Delta\psi_{fd} - K_{21}\,\Delta\psi_{1d} - K_{22}\,\Delta\psi_{1q}$$

$$- K_{23}\,\Delta\psi_{2q} - K_D\,\Delta\omega_r]$$

$$= a_{11}\,\Delta\omega_r + a_{12}\,\Delta\delta + a_{13}\,\Delta\psi_{fd} + a_{14}\,\Delta\psi_{1d}$$

$$+ a_{15}\,\Delta\psi_{1q} + a_{16}\,\Delta\psi_{2q} + b_{11}\,\Delta T_m \qquad (۱۷۲ - ۱۲)$$

$$a_{۶۵} = -\frac{\omega_{\circ} R_{۲q}}{L_{۲q}}\left(n_{۴} L''_{aqs} - \frac{L''_{aqs}}{L_{۱q}}\right)$$

$$a_{۶۶} = -\frac{\omega_{\circ} R_{۲q}}{L_{۲q}}\left(۱ - \frac{L''_{aqs}}{L_{۲q}} + n_{۵} L''_{aqs}\right) \qquad (۱۲ - ۱۸۳ \text{ ب})$$

بدین ترتیب معادلهٔ کامل حالت به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\psi}_{fd} \\ \Delta\dot{\psi}_{۱d} \\ \Delta\dot{\psi}_{۱q} \\ \Delta\dot{\psi}_{۲q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{۱۱} & a_{۱۲} & a_{۱۳} & a_{۱۴} & a_{۱۵} & a_{۱۶} \\ a_{۲۱} & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & a_{۳۲} & a_{۳۳} & a_{۳۴} & a_{۳۵} & a_{۳۶} \\ \circ & a_{۴۲} & a_{۴۳} & a_{۴۴} & a_{۴۵} & a_{۴۶} \\ \circ & a_{۵۲} & a_{۵۳} & a_{۵۴} & a_{۵۵} & a_{۵۶} \\ \circ & a_{۶۲} & a_{۶۳} & a_{۶۴} & a_{۶۵} & a_{۶۶} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\psi_{۱d} \\ \Delta\psi_{۱q} \\ \Delta\psi_{۲q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{۱۱} & \circ \\ \circ & \circ \\ \circ & b_{۳۲} \\ \circ & \circ \\ \circ & \circ \\ \circ & \circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}$$

(۱۲ ـ ۱۸۴)

با گشتاور ورودی ثابت، $\Delta T_m = \circ$ و با ولتاژ تحریک ثابت، $\Delta E_{fd} = \circ$ است.

اگر بخواهیم عمل AVR را نمایش دهیم به معادلهٔ ΔE_t نیازمندیم. با دنبال کردن روش به کار گرفته شده در بخش ۱۲ ـ ۳ ـ ۳ داریم:

$$\Delta E_t = \frac{e_{d\circ}}{E_{t\circ}} \Delta e_d + \frac{e_{q\circ}}{E_{t\circ}} \Delta e_q$$

با:

$$\Delta e_d = -R_a \Delta i_d + L_l \Delta i_q - \Delta\psi_{ad}$$
$$\Delta e_q = -R_a \Delta i_q - L_l \Delta i_d + \Delta\psi_{aq}$$

با بکارگیری معادلات ۱۲ ـ ۱۶۶، ۱۲ ـ ۱۶۸ و ۱۲ ـ ۱۶۹ می‌توان مقدار منحرف شدهٔ ولتاژ پایانه را به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta E_t = K_{۵} \Delta\delta + K_{۶} \Delta\psi_{fd} + K_{۶۱} \Delta\psi_{۱d} + K_{۶۲} \Delta\psi_{۱q} + K_{۶۳} \Delta\psi_{۲q} \qquad (۱۲ - ۱۸۵)$$

خواننده می‌تواند به عنوان تمرین، ثابتهای K را در معادلهٔ فوق، برحسب پارامترهای سیستم پیدا کند.

که در آن:

$$a_{41} = 0 \qquad a_{42} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_1 L''_{ads}$$

$$a_{43} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \left(m_2 L''_{ads} - \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} \right)$$

$$a_{44} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \left(1 - \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} + m_3 L''_{ads} \right) \qquad (۱۷۹ - ۱۲)$$

$$a_{45} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_4 L''_{ads} \qquad a_{46} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_5 L''_{ads}$$

$$\begin{aligned} P\Delta\psi_{1q} &= -\omega_0 R_{1q} \Delta i_{1q} \\ &= a_{51} \Delta\omega_r + a_{52} \Delta\delta + a_{53} \Delta\psi_{fd} + a_{54} \Delta\psi_{1d} + a_{55} \Delta\psi_{1q} + a_{56} \Delta\psi_{2q} \end{aligned} \qquad (۱۸۰ - ۱۲)$$

که در آن:

$$a_{51} = 0 \qquad a_{52} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} n_1 L''_{aqs}$$

$$a_{53} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} n_2 L''_{aqs} \qquad a_{54} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} n_3 L''_{aqs}$$

$$a_{55} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \left(1 - \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} + n_4 L''_{aqs} \right) \qquad (۱۸۱ - ۱۲)$$

$$a_{56} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \left(n_5 L''_{aqs} - \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}} \right)$$

$$\begin{aligned} P\Delta\psi_{2q} &= -\omega_0 R_{2q} \Delta i_{2q} \\ &= a_{61} \Delta\omega_r + a_{62} \Delta\delta + a_{63} \Delta\psi_{fd} + a_{64} \Delta\psi_{1d} + a_{65} \Delta\psi_{1q} + a_{66} \Delta\psi_{2q} \end{aligned} \qquad (۱۸۲ - ۱۲)$$

که در آن:

$$a_{61} = 0 \qquad a_{62} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} n_1 L''_{aqs}$$

$$a_{63} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} n_2 L''_{aqs} \qquad a_{64} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} n_3 L''_{aqs}$$

(۱۲ - ۱۸۳ الف)

براساس معادلات به دست آمده در بخش ۱۲ ـ ۶، ماتریس حالت سیستم شامل سیم‌پیچ میراکننده، اما با E_{fd} ثابت، عبارت است از:

$$A = \begin{pmatrix} ۰ & -۰/۱۲۱ & -۰/۰۶۹ & -۰/۰۷۶ & -۰/۰۰۳ & -۰/۰۲۳ \\ ۳۷۷ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ \\ ۰ & -۰/۱۰۹ & -۰/۸۸۳ & ۰/۶۴۵ & ۰ & ۰/۰۰۰۳ \\ ۰ & -۴/۹۲۸ & ۲۶/۷۲ & -۳۷/۴۷ & ۰/۰۰۲ & ۰/۰۱۳ \\ ۰ & -۰/۰۵۸ & -۰/۰۰۰۵ & -۰/۰۰۰۵ & -۲/۹۱۴ & ۲/۲۵۰ \\ ۰ & -۱/۳۹ & -۰/۰۱۱ & -۰/۰۱۲ & ۸/۳۶۷ & -۲۴/۱۸ \end{pmatrix}$$

مقادیر ویژهٔ A و متغیر حالت متناظر با بالاترین مشارکت عبارت است از:

	مقادیر ویژه	حالت(های) غالب	ω_d	ζ
$\lambda_۱, \lambda_۲$	$-۰/۱۷۱ \pm j۶/۴۷$	$\Delta\omega_r$ و $\Delta\delta$	۱/۰۳ Hz	۰/۰۲۶۵
$\lambda_۳$	$-۰/۲۰۰$	$\Delta\psi_{fd}$		
$\lambda_۴$	$-۲/۰۴۵$	$\Delta\psi_{1q}$		
$\lambda_۵$	$-۲۵/۰۱$	$\Delta\psi_{2q}$		
$\lambda_۶$	$-۳۷/۸۵$	$\Delta\psi_{1d}$		

از مقایسه با نتایج مثال ۱۲ ـ ۳، مشاهده می‌کنیم که اثر سیم‌پیچ میراکننده به شکل افزایش نسبت میرایی (از ۰/۰۱۷ به ۰/۰۲۶۵) و نیز افزایش فرکانس به مقدار کمی از ۱/۰۲ به ۱/۰۳ هرتز ظاهر می‌شود.

ب) جدول ۱۲ ـ ۱ م اثر تغییر K_A را بر روی مقادیر ویژهٔ ماتریس حالت (با PSS خارج از خط) نشان می‌دهد. جدول همچنین برای هر مُد، متغیر حالتِ با بالاترین مشارکت و نیز هر حالت دیگرِ دارای مشارکت زیاد را نشان می‌دهد.

مثال ۱۲ ـ ۵

در این مثال، تحلیل ارائه شده در مثالهای ۱۲ ـ ۳ و ۱۲ ـ ۴ را با وارد کردن اثر سیم‌پیچ میراکننده، تعمیم خواهیم داد. به علاوه برای دریافت فهم دقیقِ تأثیر AVR و PSS بر مشخصهٔ دینامیکی سیگنال کوچک تغییر بهرهٔ تحریک کنندهٔ و بهرهٔ پایدارساز را بررسی می‌کنیم.

پارامترهای در مبنای واحد ژنراتور در خصوص سیم‌پیچ میراکننده، عبارتند از:

$$X'_q = ۰/۶۵ \qquad X''_d = ۰/۲۳ \qquad X''_q = ۰/۲۵$$

$$T'_{qo} = ۱/۰ \text{ (ثانیه)} \quad T''_{do} = ۰/۰۳ \text{ (ثانیه)} \quad T''_{qo} = ۰/۰۷ \text{ (ثانیه)}$$

سایر داده‌ها (شامل پارامترهای ژنراتور و سیستم تحریک، و شرایط سیستم) همانند داده‌های درنظر گرفته شده در مثال ۱۲ ـ ۴ است.

الف) در حالتی که سیستم تحریک بر روی کنترل دستی قرار گرفته، ماتریس حالت و مقادیر ویژهٔ آن‌را تعیین کنید. متغیر حالتی را شناسایی کنید که بالاترین مشارکت را برای هر مُد دارد.

ب) در حالتی که AVR در حال کار و PSS خارج از خط باشد، اثر تغییر بهرهٔ تحریک کننده K_A را بر روی مقادیر ویژه، بررسی کنید.

ج) درحالتی که هم AVR و هم PSS درحال کار باشند، اثر تغییر بهرهٔ پایدارساز K_{STAB} را بر روی مقادیر ویژه، بررسی کنید.

حل

الف) با بکارگیری روش کاربردی در مثال ۴ ـ ۱ مقادیر در مبنای واحد اندوکتانس‌های نشتی و مقاومتهای مدارهای سیم‌پیچ میراکننده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{1d} = ۰/۱۴۰۰ \qquad L_{1q} = ۰/۷۰۶۳ \qquad L_{2q} = ۰/۱۱۰۲$$

$$R_{1d} = ۰/۰۲۴۸ \qquad R_{1q} = ۰/۰۰۶۱ \qquad R_{2q} = ۰/۰۲۲۷$$

ج) جدول ۱۲ ـ ۲م تأثیر تغییر بهرهٔ پایدارساز K_{STAB}، با K_A = ۲۰۰ را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲ ـ ۲ م

K_{STAB}	مقادیر ویژه						
	λ_1, λ_2	λ_3, λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9
–	۰/۵۳ ± j ۷/۴	−۱۷/۶ ± j ۱۱/۳	−۲۴/۹	−۱/۹۷	−۵۴/۴	–	–
۰/۱	۰/۵۱ ± j ۷/۴	−۱۷/۶ ± j ۱۱/۴	−۲۴/۹	−۱/۹۷	−۵۴/۴	−۳۰/۴	−۰/۷۱
۱/۰	۰/۳۴ ± j ۷/۴	−۱۷/۱ ± j ۱۱/۸	−۲۴/۹	−۱/۹۷	−۵۴/۴	−۳۰/۹	−۰/۷۲
۳/۰	−۰/۰۱ ± j ۷/۴	−۱۶/۲ ± j ۱۲/۷	−۲۴/۹	−۱/۹۷	−۵۴/۵	−۳۱/۹	−۰/۷۲
۵/۰	−۰/۳۷ ± j ۷/۲	−۱۵/۴ ± j ۱۳/۶	−۲۴/۹	−۱/۹۷	−۵۴/۵	−۳۲/۸	−۰/۷۳
۹/۵	−۰/۰۸ ± j ۶/۸	−۱۳/۹ ± j ۱۵/۵	−۲۵/۰	−۱/۹۶	−۵۴/۵	−۳۴/۳	−۰/۷۴
۱۵/۰	−۱/۷۵ ± j ۶/۲	−۱۲/۵ ± j ۱۷/۷	−۲۵/۰	−۱/۹۵	−۵۴/۶	−۳۵/۶	−۰/۷۶
۲۱/۰	−۲/۲۰ ± j ۵/۵	−۱۱/۴ ± j ۲۰/۰	−۲۵/۰	−۱/۹۴	−۵۴/۷	−۳۶/۷	−۰/۷۸
حالتهای غالب	$\Delta\omega_r, \Delta\delta$	$\Delta\psi_{fd}, \Delta\psi_{1d}$	$\Delta\psi_{2q}$	$\Delta\psi_{1q}$	Δv_1	Δv_2	Δv_s

از نتایج خلاصه شده در این جدول، ملاحظه می‌شود هنگامی که K_{STAB} افزایش می‌یابد میرایی مُد زاویهٔ روتور افزایش پیدا کرده و فرکانس به مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند. کاهش در فرکانس، نشان‌دهندهٔ کاهش در گشتاور سنکرون کننده می‌باشد که خود ناشی از مدار پیش‌فاز PSS است که فوق جبرانسازی را در فرکانس نوسانی روتور فراهم می‌کند. هنگامی که K_{STAB} افزایش پیدا می‌کند، فرکانس دومین مُد نوسانی افزایش و میرایی آن کاهش می‌یابد. این مود متناظر با مدار تحریک است. کلیهٔ مُدهای دیگر از متغیر K_{STAB} تأثیر نمی‌پذیرند.

۱۲ ـ ۷ پایداری سیگنال کوچک سیستمهای چندماشینه

تحلیل سیستمهای قدرت عملی شامل حل همزمان معادلات مربوط به موارد ذیل است:

- ماشینهای سنکرون، و سیستمهای تحریک مربوطه و محرکه‌ها (توربین‌ها)؛
- شبکهٔ به هم پیوستهٔ انتقال؛
- بارهای استاتیکی و دینامیکی (موتور)؛
- سایر وسایل مانند کنورتورهای HVDC، جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو.

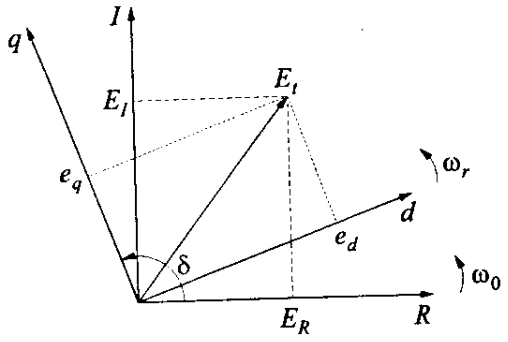
شکل ۱۲ ـ ۱۸ساختار کلی مدل کامل سیستم را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲ - ۱ م

K_A	مقادیر ویژه					
	λ_1, λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
–	−۰/۱۷۱ ± j۶/۴۷	−۰/۲۰	−۳۷/۸۵	−۲۵/۰۱	−۲/۰۴	–
۰/۱	−۰/۱۷۰ ± j ۶/۴۷	−۰/۲۰	−۳۷/۸۴	−۲۵/۰۱	−۲/۰۵	−۵۰/۰۰
۵/۰	−۰/۱۱۲ ± j ۶/۴۶	−۰/۵۹	−۳۷/۳۴	−۲۵/۰۲	−۲/۰۶	−۵۰/۲۲
۱۰/۰	−۰/۰۵۰ ± j ۶/۴۶	−۰/۹۸	−۳۶/۸۳	−۲۵/۰۲	−۲/۱۰	−۵۰/۴۲
۱۵/۰	۰/۰۱۱ ± j ۶/۴۶	−۱/۳۴	−۳۶/۳۴	−۲۵/۰۲	−۲/۱۶	−۵۰/۷۹
۳۰/۰	۰/۱۸۲ ± j ۶/۵۰	−۲/۹۴	−۳۴/۸۶	−۲۵/۰۳	−۱/۸۶	−۵۱/۱۲
۵۰/۰	۰/۳۵۷ ± j ۶/۶۲	−۴/۶۰	−۳۲/۸۷	−۲۵/۰۶	−۱/۹۴	−۵۱/۷۰
۱۰۰/۰	۰/۵۵۲ ± j ۶/۹۵	−۹/۴۰	−۲۶/۸۱	−۲۵/۵۴	−۱/۹۶	−۵۲/۸۴
۱۱۰/۰	۰/۵۶۴ ± j۷/۰۱	−۱۰/۶۴	−۲۵/۴۷ ± j ۰/۹۶		−۱/۹۷	
۱۲۵/۰	۰/۵۷۳ ± j ۷/۰۹	−۱۳/۰۳	−۲۴/۱۵ ± j ۰/۸۸		−۱/۹۷	−۵۳/۳۰
۱۳۰/۰	۰/۵۷۴ ± j ۷/۱۱	−۱۴/۱۴	−۲۲/۹۲	−۲۴/۱۸	−۱/۹۷	
۱۵۰/۰	۰/۵۷۰ ± j ۷/۲۱	−۱۸/۰۹ ± j ۵/۰۹		−۲۴/۷۲	−۱/۹۷	−۵۳/۷۱
۲۰۰/۰	۰/۵۲۸ ± j ۷/۳۸	−۱۷/۶۳ ± j۱۱/۳۳		−۲۴/۸۶	−۱/۹۷	−۵۴/۴۱
۴۰۰/۰	۰/۳۱۵ ± j۷/۶۶	−۱۶/۴۰ ± j ۲۲/۶۳		−۲۴/۹۲	−۱/۹۸	−۵۶/۳۸
حالتهای غالب	$\Delta\omega_r, \Delta\delta$	$\Delta\psi_{fd}, \Delta\psi_{1d}$		$\Delta\psi_{2q}$	$\Delta\psi_{1q}$	$\Delta\nu_1$
حالتهای با اهمیت		$\Delta\nu_1$				$\Delta\psi_{1d}$

باتوجه به جدول مشاهده می‌شود اثر AVR، اعمال میرایی منفی است. برای مقادیر K_Aی تقریباً بزرگتر از ۱۴، سیستم ناپایدار است. سیستم ناپایدارترین حالت را برای K_Aی در حدود ۱۲۵ دارد؛ با افزایش بیشتر K_A، سیستم کمتر و کمتر ناپایدار می‌شود. با K_Aی در حدود ۱۱۰، دو مقدار ویژهٔ حقیقی (λ_4 و λ_5) با هم تلفیق شده و به یک جفت مقادیر ویژهٔ مختلط، تبدیل می‌شوند. برای K_Aی در حدود ۱۵۰ و بالاتر، مقادیر ویژهٔ حقیقی λ_3 و λ_4 با هم تلفیق شده تا تشکیل یک جفت مختلط را بدهند. مُد نوسانی نشان داده شده به وسیلهٔ این مقادیر ویژه، به مدار تحریک سیم‌پیچ میراکنندهٔ محور d، و AVR محدود می‌شود.

دینامیکهای یک یا چند مدار روتورِ آن به طور مشروح نمایش داده شده، زاویهٔ روتور δ به صورت زاویه‌ای تعریف می‌شود که به اندازهٔ آن محورِ q ماشین، جلوتر از محور R است، برای ماشینی که با مدل کلاسیک نمایش داده شده، زاویهٔ روتور، زاویه‌ای است که به اندازهٔ آن ولتاژ E' نسبت به محور R پیش‌فاز است. در وضعیت دینامیکی، زاویهٔ δ با سرعتِ روتور تغییر پیدا می‌کند.



$$e_d = E_R \sin\delta - E_I \cos\delta$$
$$e_q = E_I \sin\delta + E_R \cos\delta$$
$$E_R = e_d \sin\delta + e_q \cos\delta$$
$$E_I = e_q \sin\delta - e_d \cos\delta$$

شکل ۱۲ ـ ۱۹ تبدیل چارچوب مرجع

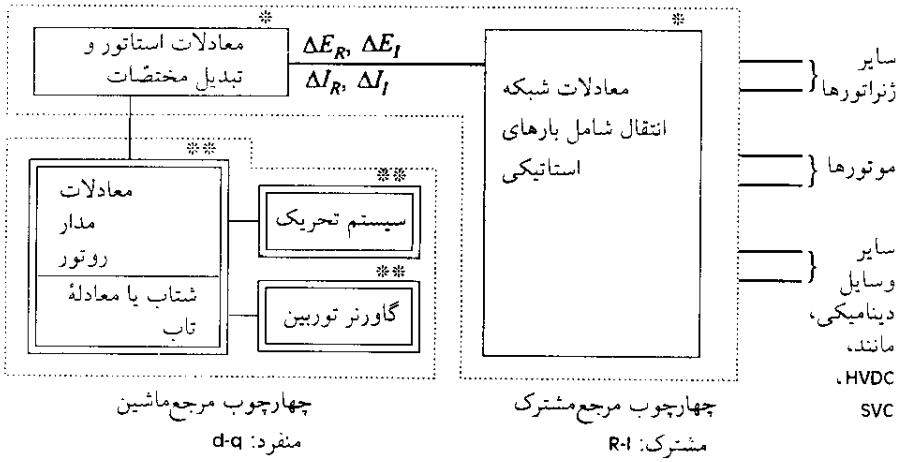
فرموله کردن معادلات حالت برای تحلیل سیگنال ـ کوچک، شامل به دست آوردن معادلات خطی حول نقطهٔ کار و حذف کلیهٔ متغیرها به جز متغیرهای حالت است. روش کلی، مشابه روشی است که برای سیستم شین بینهایتِ تک ماشینه در بخشهای قبل به کار گرفته شد. لیکن با درنظر گرفتن نمایش شبکه‌های انتقال وسیع، بارها، انواع گوناگونی از سیستمهای تحریک و مدلهای توربین، خطوط HVDC، و جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو، فرایند را بسیار پیچیده می‌کند. بنابراین، فرموله کردن معادلات حالات روش منظمی را در برخورد با طیف وسیعی از وسایل لازم می‌دارد. آنچه که به دنبال می‌آید توصیفی از چنین روشی است [۱۲ و ۱۱ و ۱۰].

فرموله کردن معادلات حالت

مدل خطی شدهٔ هر وسیلهٔ دینامیکی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i \Delta\mathbf{v} \qquad (۱۲ - ۱۸۶)$$

$$\Delta\mathbf{i}_i = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i - \mathbf{Y}_i \Delta\mathbf{v} \qquad (۱۲ - ۱۸۷)$$



معادلات جبری *

معادلات دیفرانسیل **

شکل ۱۲ ـ ۱۸ ساختار مدل کامل سیستم قدرت

همان‌طور که در فصل پنجم بحث شد، برای مطالعات پایداری سیستم مقتضی است که از مدار انتقال و گذراهای استاتور ماشین نادیده گرفته شود. دینامیک مدارهای روتور ماشین، سیستمهای تحریک، توربین و سایر وسایل، به‌کمک معادلات دیفرانسیل نمایش داده می‌شوند. نتیجه آنکه مدل کامل سیستم شامل تعداد زیادی معادلات دیفرانسیل معمولی و جبری خواهد بود.

هر مدل ماشینی برحسب چارچوب مرجع d ـ q خود بیان شده، که با روتور خودش می‌گردد. برای حل معادلات شبکهٔ به هم پیوسته، باید کلیهٔ ولتاژها و جریانها در یک چارچوب مرجع مشترک بیان شوند. معمولاً برای این کار از یک چارچوب مرجع که با سرعت سنکرون می‌چرخد، استفاده می‌شود و از معادلات تبدیل محور برای تبدیل بین چارچوبهای مرجع (d - q) ماشینهای منفرد و چارچوب مرجع (R - I) مشترک، مطابق شکل ۱۲ ـ ۱۹ استفاده می‌گردد. برای راحتی در سازماندهی مجموعهٔ کامل معادلات جبری، معادلات استاتور ماشین نیز در چهارچوب مرجع مشترک بیان می‌شود.

معمولاً از محور R چارچوب مرجع مشترک به عنوان مرجعِ اندازه‌گیری زاویهٔ روتور ماشین استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ ـ ۱۹ نشان داده شده است، برای ماشینی که

که در آن ماتریس **A**ی سیستم کامل به صورت زیر داده می‌شود:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_D + \mathbf{B}_D (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)^{-1} \mathbf{C}_D \qquad (۱۹۲ - ۱۲)$$

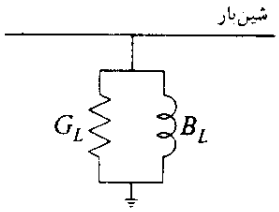
روش ساختن ماتریسهای $\mathbf{A}_i$، $\mathbf{B}_i$، $\mathbf{C}_i$ و $\mathbf{Y}_i$ برای ماشین سنکرون و کنترلهای مربوطه از روند کلی توصیف شده در بخشهای قبل تبعیت می‌کند. می‌توان با روش مشابه‌ای با بارهای موتوری نیز برخورد نمود. مرجع ۱۲ جزییات مواجهه با خطوط HVDC و SVCها را بیان می‌کند.

برنامه کامپیوتری MASS (پایداری سیگنال کوچک چند ناحیه‌ای[1]) توصیف شده در مراجع ۱۰ و ۱۱ از روش کلی بالا برای فرموله کردن ماتریس حالت سیستم استفاده می‌کند. این برنامه کلیهٔ مقادیر ویژهٔ ماتریس را با بکارگیری روش تبدیل QR (ارائه شده در بخش ۱۲ ـ ۲ ـ ۹) محاسبه می‌کند. از آنجا که در این روش از شیوهٔ پراکندگی[2] بهره‌برداری نمی‌کند، نمی‌تواند برای تحلیل سیستم‌های خیلی بزرگ به کار گرفته شود. بسته به قابلیت کامپیوتر استفاده شده، حداکثر اندازهٔ سیستم به چند صد حالت محدود می‌شود. که برای تحلیل پایداری سیستمهای کوچک یا مسائل پایداری محلی در سیستمهای بزرگ رضایتبخش است. همچنین از آنجا که کلیهٔ مُدهای سیستم محاسبه می‌گردند، به‌طور ایده‌ال برای طراحی و هماهنگی کنترلها مناسب است. در بخش بعدی، روشهایی را برای تحلیل مسائل جامع در سیستمهای بسیار بزرگ توصیف می‌کنیم.

نمایش بارهای استاتیکی

الف) بار امپدانس ثابت (خطی). ادمیتانس شنت نسبت به زمین که نشان‌دهندهٔ بار است، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_L = \frac{P_{L0}}{V_0^2} \qquad B_L = -\frac{Q_{L0}}{V_0^2} \qquad (۱۹۳ - ۱۲)$$



شکل ۱۲ ـ ۲۰

1. Multi - Area

۲. پراکندگی (Sparsity) ، روشی است که به کمک آن درایه‌های صفر را در یک ماتریس حذف نموده تا بدین طریق هم در حجم حافظه و هم در عملیات صرفه‌جویی شود (م).

که در آن:

$\mathbf{x}_i$ مقادیر منحرف شدهٔ متغیرهای حالت؛

$\mathbf{i}_i$ تزریق جریان از وسیله به شبکه؛

و $\mathbf{V}$ بردار ولتاژهای شین شبکه است.

در معادلات ۱۲ ـ ۱۸۶ و ۱۲ ـ ۱۸۷ $\mathbf{B}_i$ و $\mathbf{Y}_i$ تنها متناظر با ولتاژ پایانهٔ وسیله و ولتاژهای شین دور برای کنترل وسیله، عناصر غیرصفر دارند. بردار جریان $\mathbf{i}_i$ دارای دو عنصر، متناظر با مؤلفه‌های حقیقی و موهومی است. به طور مشابهی، بردار ولتاژ $\mathbf{V}$ نیز دو عنصر، برای هر شین متناظر با وسیله دارد. چنین معادلات حالتی را می‌توان برای کلیهٔ اسباب دینامیکی موجود در سیستم به شکل زیر ترکیب کرد:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_D \mathbf{x} + \mathbf{B}_D \Delta\mathbf{V} \qquad (۱۸۸ ـ ۱۲)$$

$$\Delta\mathbf{i} = \mathbf{C}_D \mathbf{x} - \mathbf{Y}_D \Delta\mathbf{V} \qquad (۱۸۹ ـ ۱۲)$$

که $\mathbf{X}$ بردار حالت سیستم‌کامل است، و $\mathbf{A}_D$ و $\mathbf{B}_D$ ماتریسهای قطری ـ بلوکیِ تشکیل شده از $\mathbf{A}_i$ و $\mathbf{C}_i$ متناظر با وسایل منفرد است.

همچنانکه در فصل ششم توضیح داده شد، شبکهٔ انتقالِ به هم پیوسته، با معادلهٔ گره زیر نشان داده می‌شود:

$$\Delta\mathbf{i} = \mathbf{Y}_N \Delta\mathbf{V} \qquad (۱۹۰ ـ ۱۲)$$

همانطور که بعداً در این بخش نشان داده خواهد شد عناصر $\mathbf{Y}_N$ اثر بارهای استاتیکی غیرخطی را نشان می‌دهد.

از مساوی قرار دادن معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۸۹ مربوط به وسایل و معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۹۰ متناظر شبکه، نتیجه می‌شود:

$$\mathbf{C}_D \mathbf{x} - \mathbf{Y}_D \Delta\mathbf{V} = \mathbf{Y}_N \Delta\mathbf{V}$$

پس:

$$\Delta\mathbf{V} = (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)^{-1} \mathbf{C}_D \mathbf{x}$$

باجایگزینی عبارت بالا به‌جای $\Delta\mathbf{V}$ در معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۸۸، معادله‌حالت‌سیستم‌کلی نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_D \mathbf{x} + \mathbf{B}_D (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)^{-1} \mathbf{C}_D \mathbf{x} \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x}\end{aligned} \qquad (۱۹۱ ـ ۱۲)$$

که در آن:

$$\Delta V = \frac{v_{R0}}{V_0}\Delta v_R + \frac{v_{I0}}{V_0}\Delta v_I \qquad (۱۹۶ - ۱۲)$$

اکنون:

$$\Delta P_L = m\frac{P_{L0}}{V_0}\Delta V$$
$$\Delta Q_L = n\frac{Q_{L0}}{V_0}\Delta V \qquad (۱۹۷ - ۱۲)$$

با جایگزینی از معادلات ۱۲ ـ ۱۹۶ و ۱۲ ـ ۱۹۷ در معادله ۱۲ ـ ۱۹۵ نتیجه می‌شود:

$$\begin{pmatrix}\Delta i_R\\ \Delta i_I\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}G_{RR} & B_{RI}\\ -B_{IR} & G_{II}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta v_R\\ \Delta v_I\end{pmatrix} \qquad (۱۹۸ - ۱۲)$$

که در آن:

$$G_{RR} = \frac{P_{L0}}{V_0^2}\left((m-2)\frac{v_{R0}^2}{V_0^2}+1\right) + \frac{Q_{L0}}{V_0^2}\left((n-2)\frac{v_{R0}v_{I0}}{V_0^2}\right)$$
$$B_{RI} = \frac{Q_{L0}}{V_0^2}\left((n-2)\frac{v_{I0}^2}{V_0^2}+1\right) + \frac{P_{L0}}{V_0^2}\left((m-2)\frac{v_{R0}v_{I0}}{V_0^2}\right) \qquad (۱۹۹ - ۱۲)$$
$$B_{IR} = \frac{Q_{L0}}{V_0^2}\left((n-2)\frac{v_{R0}^2}{V_0^2}+1\right) - \frac{P_{L0}}{V_0^2}\left((m-2)\frac{v_{R0}v_{I0}}{V_0^2}\right)$$
$$G_{II} = \frac{P_{L0}}{V_0^2}\left((m-2)\frac{v_{I0}^2}{V_0^2}+1\right) - \frac{Q_{L0}}{V_0^2}\left((n-2)\frac{v_{R0}v_{I0}}{V_0^2}\right)$$

به عنوان مثال، باری را به صورت زیر درنظر بگیرید:

$$P_{L0} = 0/5\ \text{pu} \qquad Q_{L0} = 0/2\ \text{pu} \qquad \tilde{v}_0 = 1/0 \angle 20^\circ$$

مؤلفه‌های حقیقی و موهومی ولتاژ شین اولیه عبارت است از:

$$v_{R0} = 1/0\cos 20^\circ = 0/94\ \text{pu}$$
$$v_{I0} = 1/0\sin 20^\circ = 0/342\ \text{pu}$$

که در آن:

$P_{L\circ}$، مقدار اولیهٔ مؤلفهٔ اکتیو بار،

$X_{L\circ}$، مقدار اولیهٔ مؤلفهٔ راکتیو بار،

و $V_\circ$، مقدار اولیهٔ دامنهٔ ولتاژ شین است.

ب) بار غیرخطی. باری را درنظر بگیرید که مشخصه‌های وابسته به ولتاژ آن به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$P_L = P_{L\circ}\left(\frac{V}{V_\circ}\right)^m$$
$$Q_L = Q_{L\circ}\left(\frac{V}{V_\circ}\right)^n \qquad (۱۹۴ - ۱۲)$$

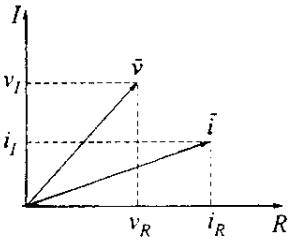
که در آن V، دامنهٔ ولتاژ شین است؛ یعنی:

$$V = \sqrt{\nu_R^{۲} + \nu_I^{۲}}$$

مؤلفه‌های R و I جریان بار عبارت است از:

$$i_R = P_L\frac{\nu_R}{V^{۲}} + Q_L\frac{\nu_I}{V^{۲}}$$

$$i_I = P_L\frac{\nu_I}{V^{۲}} - Q_L\frac{\nu_R}{V^{۲}}$$



شکل ۱۲ - ۲۱

از خطی‌سازی، درمی‌یابیم:

$$\Delta i_R = \frac{\nu_{R\circ}}{V_\circ^{۲}}\Delta P_L + \frac{\nu_{I\circ}}{V_\circ^{۲}}\Delta Q_L + \frac{P_{L\circ}}{V_\circ^{۲}}\Delta\nu_R + \frac{Q_{L\circ}}{V_\circ^{۲}}\Delta\nu_I + (P_{L\circ}\nu_{R\circ} + Q_{L\circ}\nu_{I\circ})\left(-\frac{۲}{V_\circ^{۳}}\right)\Delta v$$
$$\Delta i_I = \frac{\nu_{I\circ}}{V_\circ^{۲}}\Delta P_L - \frac{\nu_{R\circ}}{V_O^{۲}}\Delta Q_L + \frac{P_{L\circ}}{V_\circ^{۲}}\Delta\nu_I - \frac{Q_{L\circ}}{V_\circ^{۲}}\Delta\nu_R + (P_{L\circ}\nu_{I\circ} - Q_{L\circ}\nu_{R\circ})\left(-\frac{۲}{V_\circ^{۳}}\right)\Delta v \qquad (۱۹۵ - ۱۲)$$

اگر کلیهٔ گشتاورهای ژنراتور مستقل از تغییرات سرعت فرض شوند، دومین مقدار ویژهٔ صفر وجود دارد، به عبارت دیگر، اگر عبارت میرایی نشان داده شده با K_D در معادلهٔ تاب وارد نشود و یک گاورنر سرعت نیز نشان داده نشده باشد می‌توان با اندازه‌گیری انحرافهای سرعت نسبت به سرعت یک ماشین مرجع از این مقدار ویژهٔ صفر اجتناب کرد. از نظر ریاضی، فرایند ارجاع زوایای روتور یا انحرافهای سرعت به یک ماشین مرجع، معادل با یک تبدیل همانندی است.

باید خاطرنشان کرد که به علت عدم تطابق در حل پخش‌بار و دقت محدودِ برنامه‌های محاسباتیِ مقدار ویژه، نمی‌توان مقادیر ویژهٔ صفر را به طور دقیق محاسبه کرد. بنابراین ممکن است این مقادیر به صورت مقادیر ویژهٔ کوچکی ظاهر شوند.

۱۲ ـ ۸ روشهای خاص در تحلیل سیستمهای بسیار بزرگ

تحلیل نوسانهای بین ناحیه‌ای در یک سیستم بزرگ به هم پیوستهٔ قدرت، مستلزم مدلسازی تفصیلی کل سیستم است. در چنین مطالعاتی، نمایش سیستمی با بیش از ۲۰۰۰ وسیلهٔ دینامیکی و ۱۲۰۰۰ شین، غیرمعمول نمی‌باشد. با درنظر گرفتن میانگین ۱۵ حالت برای هر وسیله، ممکن است تعداد متغیرهای حالت لازم برای تحلیل مُدال در حدود ۳۰۰۰۰ باشد. این حد، از محدودهٔ روشهای معمولی تحلیل مقدارهای ویژه بسیار خارج است. از این‌رو روشهای خاصی مطرح شده‌اند که بر محاسبهٔ زیر مجموعه‌ای انتخاب شده از مقادیر ویژه مربوط به پاسخ سیستم کامل متمرکز شده‌اند.

یکی از این روشها، الگوریتم AESOPS است که برای نخستین بار در مرجع ۱۴ آورده شده است. این شیوه از یک روش پاسخ فرکانسی جدید برای محاسبهٔ مقادیر ویژهٔ مربوط به مُدهای زاویهٔ روتور استفاده می‌کند. مراجع ۱۰ و ۱۵ شکل اصلاح شدهٔ این الگوریتم را بیان می‌کنند.

در منابع مربوط به پایداری سیستم قدرت چند روش قدرتمند برای محاسبهٔ مقادیر ویژهٔ مربوط به تعداد اندکی از مُدهای انتخاب شدهٔ نوسان، چاپ شده‌اند. مرجع ۱۶ کاربرد دو روش محاسبهٔ مقدار ویژه را براساس روش پراکندگی توصیف می‌کند: تکرارهای همزمان[1] و روشهای اصلاح شده آرنولدی[2]. روش S توصیف شده در مرجع ۱۷ خصوصاً برای پیدا کردن مُدهای ناپایدار مناسب است. روش تحلیل مُدال انتخابی (SMA)[3] توصیف شده در مراجع ۲ و ۱۸، مقادیر ویژهٔ مربوط به مُدهای انتخاب شده مورد علاقه را با استفاده از روشهای خاصی برای شناسایی متغیرهای مربوط به آن مُدها، محاسبه می‌کند و سپس یک مدلِ مرتبه کاهش یافته را می‌سازد که فقط شامل متغیرهای مربوطه است.

1. Simultaneous Iterations
2. Arnoldi Methods
3. Selective Modal Analysis

از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۹۹، با مشخصهٔ امپدانس ثابت ($m = n = ۲/۰$)، داریم:

$$G_{RR} = ۵/۰ \qquad B_{RI} = ۲/۰$$
$$-B_{IR} = -۲/۰ \qquad G_{II} = ۵/۰$$

به طور مشابهی، با مشخصهٔ جریان ثابت ($m = n = ۱/۰$)، نتیجه می‌شود:

$$G_{RR} = -۰/۰۶ \qquad B_{RI} = ۰/۱۶$$
$$-B_{IR} = -۱/۸۴ \qquad G_{II} = ۵/۰۶$$

و با مشخصهٔ MVA ثابت ($m = n = ۰/۰$)؛

$$G_{RR} = -۵/۱۲ \qquad B_{RI} = -۱/۶۸$$
$$-B_{IR} = -۱/۶۸ \qquad G_{II} = ۵/۱۲$$

ماتریس ادمیتانس معادل مثال ۱۲ ـ ۱۹۸ را می‌توان مستقیماً در ماتریس ادمیتانس شبکه اعمال کرد. لیکن، همان‌طور که از مثال بالا مشاهده می‌شود، ماتریس ادمیتانس معادل نشان‌دهندهٔ بارهای غیرخطی متقارن نیست و یک ادمیتانس شنتِ سادهٔ به زمین را همانند حالت یک بار امپدانس ثابت نشان نمی‌دهد.

متغیرهای حالت اضافی

در فرموله کردن معادلات حالت سیستم مذکور، از تغییرات قدر مطلقِ سرعت و زاویهٔ روتور ماشین به عنوان متغیرهای حالت استفاده شده است. با چنین فرمول‌بندی، ماتریس حالت سیستمی که شامل شین بینهایت نشود یک یا دو مقدار ویژهٔ صفر خواهد داشت [۱۳]. یکی از این مقادیر ویژهٔ صفر به عدم یکتایی زاویهٔ روتور مطلق، مربوط می‌باشد. به عبارت دیگر، اگر زوایای روتورِ کلیهٔ ماشینها با یک مقدار ثابت افزایش یابند، بر پایداری سیستم تأثیری ندارند. افزونگی در حالتهای زاویهٔ روتور را می‌توان به صورت زیر با انتخاب یکی از ماشینها به عنوان مرجع و بیان تغییرات زاویه‌ای کلیهٔ ماشینهای دیگر نسبت به این مرجع حذف کرد.

برای ماشین مرجع R داریم:

$$P\,\Delta\delta_R = ۰$$

و برای هر ماشین دیگر i ($i = ۱, \ldots, n, i \neq R$)، می‌توان نوشت:

$$(\Delta\omega_r \text{ از ماشین } i) - (\Delta\omega_r \text{ از ماشین } R) = P\,\Delta\delta_i$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس، داریم:

$$2Hs\Delta\omega_r = \Delta T_m - \left[K_s(s)\frac{\Delta\omega_r}{s} + K_D(s)\Delta\omega_r\right] \qquad (۲۰۰ - ۱۲)$$

معادلهٔ بالا تصدیق می‌کند که ضرایب گشتاور میراکننده و سنکرون کننده (K_D و K_S) توابعی از فرکانس نوسان هستند.

از بازنویسی معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۰۰، نتیجه می‌شود:

$$\Delta T_m = \left[2Hs + K_D(s) + \frac{K_s(s)}{s}\right]\Delta\omega_r \qquad (۲۰۱ - ۱۲)$$

که مقادیر مشخصه (مقادیر ویژهٔ) سیستم با صفرهای معادلهٔ زیر داده می‌شود:

$$2Hs + K_D(s) + \frac{K_s(s)}{s} = 0 \qquad (۲۰۲ - ۱۲)$$

بنابراین مقادیر مشخصه، مقادیری از s هستند که به شرط غیرصفر بودن $\Delta\omega_r$، ΔT_m را صفر می‌کنند. از این نکته در الگوریتم AESOPS برای محاسبهٔ صفرهای معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۰۲ استفاده شده است.

با یک گشتاور خارجیِ محدود، دامنهٔ متغیرهای سیستم در فرکانسهای مختلطِ نزدیک به یک مقدار ویژه به سمت بینهایت میل می‌کند. از نظر محاسباتی مطلوبتر است که کران پاسخ سیستم را محدود کرده، اجازه دهیم دامنهٔ گشتاور خروجی در یک مقدار ویژه به سمت صفر رود. این کار با مساوی قرار دادن انحرافِ سرعت مختلطِ ژنراتور دچار اغتشاش با مقدار ۰/۰ j + ۱/۰ در مبنای واحد، قابل حصول است. گشتاور خارجی ΔT_m در طی حل، تعیین می‌شود. با همگرایی تکرارها، دامنهٔ گشتاور خارجی به سمت صفر میل می‌کند و این خود دلیلی بر دقت مقدار ویژه می‌باشد.

در عمل، مدل نشان‌دهندهٔ سیستم هم قطب و هم صفر دارد. صفرهای نزدیک به قطب، مانع همگرایی الگوریتم AESOPS به سمت مقادیر ویژهٔ متناظر، می‌شوند. قطبهای متناظر با مُدهایی که در آنها ماشین مشارکت بسزایی دارد به وسیلهٔ صفرها حذف نمی‌شوند. از این‌رو برای هر ژنراتورِ سیستم، می‌توان زیرمجموعه‌ای از مُدهای سیستم کلی را محاسبه کرد.

روش تکرار. صفرهای $\Delta T_m(s)$ را می‌توان با استفاده از روش نیوتون تعیین کرد. برای این کار به مشتق ΔT_m نسبت به s نیاز است. از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۰۱ داریم:

$$\frac{\partial \Delta T_m}{\partial s} = \left[2H + \frac{\partial K_D(s)}{\partial s} + \frac{1}{s}\frac{\partial K_s(s)}{\partial s} - \frac{K_s(s)}{s^2}\right]\Delta\omega_r \qquad (۲۰۳ - ۱۲)$$

PEALS (برنامه‌ای برای تحلیل مقدار ویژهٔ سیستم‌های بزرگ[1]) توصیف شده در مراجع ۱۰ و ۱۱ دو تا از این روشها را استفاده می‌کند: الگوریتم AESOPS و روش آرنولدی اصلاح شده. این دو روش، مؤثر و قابل اعتماد بوده، در برآورده ساختن نیازمندیهای تحلیل پایداری سیگنال کوچک سیستمهای قدرت پیچیدهٔ بزرگ مکمل همدیگر می‌باشند. در قسمت بعد، توصیفی از این دو روش ارائه می‌شود.

الف) الگوریتم AESOPS

سرنام AESOPS از حروف اول کلمات تحلیل نوسانهای ذاتاً سریع در سیستمهای قدرت[2] گرفته شده است [۱۴]. این الگوریتم بر روشی هوشمند پایه‌گذاری شده که با استفاده از قضاوت مهندسیِ منطقی، به جای یک روند ریاضی دقیق ایجاد شده است.

این الگوریتم فقط مقادیر ویژهٔ مربوط به مُدهای زاویهٔ روتور را محاسبه می‌کند، (در هر زمان یک جفت مختلط مزدوج از مقادیر ویژه). مقادیر ویژه، با اعمال یک گشتاور خارجی به شکل سینوسیِ مختلط، که برحسب تخمین اولیه‌ای از یکی از مقادیر ویژه بیان شده، به روتور ژنراتوری منتخب تعیین می‌شود. در حالت ماندگار، کلیهٔ متغیرهای نموی[3] از مدل سیستم خطی، سینوسهای مختلطی مشابه با گشتاور خارجی هستند. پاسخ فرکانسی مختلط سیستم با حل مجموعه‌ای مناسب از معادلات جبری مختلط محاسبه می‌شود. آنگاه از پاسخ سیستم خطی تخمین تجدیدنظر شده‌ای از مقدار ویژه تعیین می‌گردد و فرایند تا همگرایی تخمینهای متوالی در حد میزان خطای مطلوبی ادامه می‌یابد. مقدار ویژه حاصل، یک مُد نوسانی را نشان می‌دهد که در آن ژنراتور انتخاب شده، نقش بسزایی دارد. اگر ژنراتور، چند مُد غالب از نوسانهای روتور داشته باشد، مقدار ویژهٔ محاسبه شده به تخمین اولیه بستگی خواهد داشت.

از این روش می‌توان برای محاسبه مقادیر ویژهٔ متناظر با مُدهایی که در آنها ژنراتورها مشارکت بسزایی دارند، بهره برد.

الگوریتم AESOPS از معادلهٔ خطی شدهٔ حرکت ژنراتور به دست می‌آید؛ یعنی:

$$2H\frac{d\,\Delta\omega_r}{dt} = \Delta T_m - \Delta T_e$$

$$= \Delta T_m - (K_s\,\Delta\delta + K_D\,\Delta\omega_r)$$

1. Program for Eigenvalue Analysis of Large Systems
2. Analysis of Essentially Spontaneous Oscillations in Power Systems
3. Incremental Variables

در مجذور تغییرِ سرعت در ماشین منحرف شده است. لختی معادل به صورت زیر داده می‌شود:

$$H_e = \sum_{i=1}^{N_m} H_i \mid \Delta\omega_{ri} \mid^2 \qquad (۲۰۹ - ۱۲)$$

که N_m = تعداد ماشینهاست. معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۰۸ را می‌توان به صورت زیر اصلاح کرد:

$$s_{n+1} = s_n - \left[\frac{\Delta T_m(s)}{4H_e \Delta\omega_r}\right]_{s=s_n}$$

اگر همان‌طور که قبلاً بحث شد $\Delta\omega_r$ برابر با ۱/۰ + j ۰/۰ pu قرار داده شود، داریم:

$$s_{n+1} = s_n - \frac{\Delta T_m(s_n)}{4H_e} \qquad (۲۱۰ - ۱۲)$$

به کارگیری الگوریتم AESOPS در PEALS

همچنان که در بالا به دست آمد کاربرد الگوریتم AESOPS نیازمند محاسبه پارامترهای زیر است:

الف) گشتاور لازم برای نگه داشتن تغییر سرعت یک ماشین منتخب تحت اغتشاش مساوی با ۱/۰ + j ۰/۰ pu؛

ب) تغییرات سرعت کلیهٔ ماشینهای دیگر و لختی معادل H_e.

که این موارد به معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۸۶ مربو ط به هر وسیلهٔ دینامیکی و معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۹۰ مربوط به شبکهٔ به هم پیوسته، بستگی دارد.

اینک نخست معادلات دستگاه را به صورت مناسبی برای اجرای محاسبات بالا مرتب می‌کنیم. از معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۸۶، برای هر فرکانس مختلط s و برای هر وسیلهٔ دینامیکی، می‌توان نوشت:

$$s\mathbf{x}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i \Delta\mathbf{v}$$

بنابراین:

$$\mathbf{x}_i = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{B}_i \Delta\mathbf{v} \qquad (۲۱۱ - ۱۲)$$

با جایگزینی از بالا در معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۸۷، و بیان روابط در حوزهٔ s، نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned}\Delta\mathbf{i}_i &= \mathbf{C}_i (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{B}_i \Delta\mathbf{v} - \mathbf{Y}_i \Delta\mathbf{v} \\ &= -\mathbf{Y}_{ie}(s) \Delta\mathbf{v}\end{aligned} \qquad (۲۱۲ - ۱۲)$$

این معادله را می‌توان با تقریبهای زیر ساده کرد.

در نزدیکی هریک از مقادیر ویژهٔ سیستم، از معادله ۱۲ ـ ۲۰۲، نتیجه می‌شود:

$$\frac{K_s(s)}{s^2} + \frac{K_D(s)}{s} = -2H \qquad (۲۰۴ ـ ۱۲)$$

اگر K_D کوچک باشد، داریم:

$$\frac{K_s(s)}{s^2} \approx -2H \qquad (۲۰۵ ـ ۱۲)$$

بنابراین:

$$\frac{\partial \Delta T_m}{\partial s} \approx \left[4H + \frac{\partial K_D(s)}{\partial s} + \frac{1}{s}\frac{\partial K_s(s)}{\partial s} \right] \Delta\omega_r \qquad (۲۰۶ ـ ۱۲)$$

علاوه بر این، $\frac{\partial K_D}{\partial s}$ و $\frac{\partial K_s}{\partial s}$ در مقایسه با $4H$ کوچک هستند. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial \Delta T_m}{\partial s} \approx 4H\,\Delta\omega_r \qquad (۲۰۷ ـ ۱۲)$$

nاُمین تکرارِ روش نیوتون برای محاسبهٔ مقادیر ویژه، به عبارت دیگر، مقادیر s، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$s_{n+1} = s_n - \frac{\Delta T_m(s)}{\left[\frac{\partial \Delta T_m}{\partial s}\right]_{s=s_n}}$$

$$= s_n - \left[\frac{\Delta T_m(s)}{4H\Delta\omega_r}\right]_{s=s_n}$$

گشتاور ماشین تحت اغتشاش، عبارت است از:

$$M_n = J\Delta\omega_r = 2H\Delta\omega_r$$

از این‌رو می‌توان نوشت:

$$s_{n+1} = s_n - \left[\frac{\Delta T_m(s)}{2M_n}\right]_{s=s_n} \qquad (۲۰۸ ـ ۱۲)$$

برای مُدهایی که مربوط به چندین ماشین است، این موضوع، میزان تغییرات مقدار ویژه را در هر تکرار بسیار بزرگ می‌کند. در چنین حالاتی، $\partial K_D / \partial s$ و $\partial K_s / \partial s$ کوچک نیستند. لذا از یک گشتاور اصلاح شده براساس یک لختی معادل استفاده می‌شود. این لختی، چنان تعریف می‌شود که انرژی جنبشی مربوط به تغییرِ سرعت کلیهٔ ماشینها در سیستم مساوی با حاصل‌ضرب لختی معادل

که در آن:

$$\Delta \mathbf{I}_{ke}(s) = \left[c_1 + \frac{c_2 \omega_0}{s} + \mathbf{C}_r (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{rr})^{-1} \left(a_{r1} + \frac{a_{r2} \omega_0}{s} \right) \right] \qquad (۲۱۸ - ۱۲)$$

$$\mathbf{Y}_{ke}(s) = \mathbf{Y}_k - \mathbf{C}_r (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{rr})^{-1} \mathbf{B}_r \qquad (۲۱۹ - ۱۲)$$

همانند معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۳، محاسبات متناظر با معادلات بالا با بیان کردن $(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{rr})^{-1}$ به صورت قطری برحسب مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}_{rr}$ ساده می‌شوند.

تزریق جریان در شبکه، با معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۷ برای ماشین منحرف شده و با معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۲ برای کلیهٔ ماشینهای دیگر و وسایل دینامیکی داده می‌شود. ادمیتانسهای وسیله، معادل $\mathbf{Y}_{le}(s)$ و منبع جریان معادل $\Delta \mathbf{I}_{ke}(s)$ برای ماشین منحرف شده، توابعی از پارامترهای اسباب، نقطهٔ کار اولیه، و فرکانس مختلط s هستند.

معادله شبکه به هم پیوسته را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{I}_D \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{DD} & \mathbf{Y}_{DL} \\ \mathbf{Y}_{LD} & \mathbf{Y}_{LL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{v}_D \\ \Delta \mathbf{v}_L \end{pmatrix} \qquad (۲۲۰ - ۱۲)$$

که در آن زیرنویس D بر شینهای باوسایل دینامیکی و زیرنویس L به شینهای با بارهای استاتیکی، یعنی شینهای بدون وسایل دینامیکی دلالت می‌کند.

از ترکیب معادلات وسیله، ۱۲ ـ ۲۱۲ و ۱۲ ـ ۲۱۷، و معادلهٔ شبکه ۱۲ ـ ۲۲۰، نتیجه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{I}_{De}(s) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{DD} + \mathbf{Y}_{De}(s) & \mathbf{Y}_{DL} \\ \mathbf{Y}_{LD} & \mathbf{Y}_{LL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{v}_D \\ \Delta \mathbf{v}_L \end{pmatrix} \qquad (۲۲۱ - ۱۲)$$

که در آن $\mathbf{Y}_{De}(s)$ یک ماتریس قطری ـ بلوکی از ماتریس ادمیتانس معادل وسیله $\mathbf{Y}_{le}(s)$ است، و $\Delta \mathbf{I}_{De}(s)$ بردار منبع جریان وسیله با عنصر غیرصفر فقط برای ماشین منحرف شدهٔ داده شده با معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۸ می‌باشد.

معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۱ برای ولتاژهای شین، $\Delta \mathbf{v}$، حل می‌شود. ماتریس شبکه بسیار بزرگ و پراکنده است. روش PEALS این مشکل را با استفاده از روش مؤثر حل شبکه براساس پراکندگی حل می‌کند.

که در آن:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{ie}(s) &= [\mathbf{Y}_i - \mathbf{C}_i (sI - A_i)^{-1} \mathbf{B}_i] \\ &= [\mathbf{Y}_i - \mathbf{C}_i \Phi_i (sI - \Lambda_i)^{-1} \Phi_i^{-1} \mathbf{B}_i] \end{aligned} \qquad (۲۱۳-۱۲)$$

که:

Λ_i، ماتریس قطری مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}_i$ی وسیله؛

Φ_i، ماتریس بردار ویژهٔ متناظر است.

محاسبهٔ $\mathbf{Y}_{ie}(s)$ با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۳ به واسطهٔ قطری بودن $sI - \Lambda_i$ ساده است.

برای ماشین Kی انتخاب شده برای اِعمال گشتاورِ خارجی، می‌توان معادلات دینامیکی را، شامل اثر گشتاور اعمال شده ΔT_m، به صورت تفکیک شدهٔ زیر نوشت:

$$\begin{pmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \dot{x}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1r} \\ \omega_0 & 0 & 0 \\ a_{r1} & a_{r2} & A_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ x_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ 0 \\ \mathbf{B}_r \end{pmatrix} \Delta v + \begin{pmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m \qquad (۲۱۴-۱۲)$$

$$\Delta i_k = [c_1 \; c_2 \; \mathbf{C}_r] \begin{pmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ x_r \end{pmatrix} - \mathbf{Y}_k \Delta \mathbf{v} \qquad (۲۱۵-۱۲)$$

که در آن x_r بردار نشان‌دهندهٔ کلیهٔ متغیرهای حالت ماشین به جز $\Delta\omega_r$ و $\Delta\delta$ است. برای ماشین منحرف شده، $\Delta\omega_r$ برابر با ۱/۰ pu فرض شده و از این‌رو $\Delta\delta = \omega_0 / s$ است.

با دستکاری و مرتب کردن مجدد معادلات ۱۲ ـ ۲۱۴ و ۱۲ ـ ۲۱۵ برای حذف $\Delta\delta$ و x_r برحسب $\Delta\omega_r$ و با قراردادن $\Delta\omega_r$ برابر با ۱/۰ pu، روابط ذیل را برای ΔT_m و Δi_k (به صورت توابعی از Δv) به دست می‌آوریم:

$$\Delta T_M = 2H \left[s - a_{11} - \frac{a_{12}\omega_0}{s} - a_{1r} (sI - \mathbf{A}_{rr})^{-1} \left(a_{r1} + \frac{a_{r2}\omega_0}{s} \right) \right] -$$

$$2H [b_1 + a_{1r} (sI - \mathbf{A}_{rr})^{-1} \mathbf{B}_r] \Delta \mathbf{v} \qquad (۲۱۶-۱۲)$$

$$\Delta i_k = \Delta \mathbf{I}_{ke}(s) - \mathbf{Y}_{ke}(s) \Delta \mathbf{v} \qquad (۲۱۷-۱۲)$$

بردار ویژهٔ چپ با استفاده از مدل دینامیکی سیستم ترانهادهٔ معادلات ۱۲ ـ ۱۸۸ و ۱۲ ـ ۱۸۹:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A}_D^T \mathbf{y} + \mathbf{C}_D^T \Delta \mathbf{u}$$
$$\Delta \mathbf{j} = \mathbf{B}_D^T \mathbf{y} - \mathbf{Y}_D^T \Delta \mathbf{u}$$

و نیز مدل شبکهٔ ترانهادهٔ معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۹۰ محاسبه می‌شود:

$$\Delta \mathbf{j} = \mathbf{Y}_N^T \Delta \mathbf{u}$$

بسادگی می‌توان نشان داد هنگامی که الگوریتم AESOPS به مدل بالا اعمال شود به سمت یک مقدار ویژهٔ سیستم و بردار ویژهٔ چپ متناظر آن همگرا می‌شود. با انتخاب مقدار ویژهٔ اولیه، مساوی با مقداری صحیح، معمولاً یک تکرار برای همگراشدن الگوریتم به بردار ویژهٔ چپ کافی است.

محاسبهٔ پاسخ فرکانسی. پاسخ فرکانسی را می‌توان مستقیماً از معادلات سیستم، به‌صورت به کار گرفته شده در الگوریتم AESOPS با جایگزینیِ s با $j\omega$ محاسبه کرد. سیستم، شکل کلی معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۱ را دارد. به جای اعمال گشتاور خارجی به عنوان ورودی به یکی از ماشینها، سیگنال ورودی را می‌توان به هر یک از وسایل اعمال کرد و خروجیها را در موقعیتهای مطلوب زیرنظر گرفت. از آنجا که صورت معادله‌های شبکه به طور صریح حفظ می‌شود، ممکن است ورودی و خروجیها علاوه بر وسایل دینامیکی به شبکه هم مربوط باشند.

ب) روش آرنولدی اصلاح شده (MAM)

روش آرنولدی نخستین بار در مرجع ۱۹ ارائه شده است. لیکن در شکل اولیه، ویژگیهای عددی ضعیفی داشت. مشکلات اصلی آن از دست رفتن تعامد و همگرایی کُند در صورت نیاز به چند مقدار ویژهٔ غالب است. این مشکلات، در مرجع ۲۰، با استفاده از متعامدسازی مجدد کامل و یک فرایند تکرار، حل شد. در اینجا توصیفی از روش به صورتی که در روش PEALS بکار گرفته شده، آورده می‌شود [۱۱ و ۱۰].

روش آرنولدی اصلاح شده براساس یک روش کاهشی پایه‌گذاری شده است، که در آن

بندهای ذیل خلاصه‌ای از مراحل محاسبهٔ مربوط به الگوریتم AESOPS می‌باشد:

۱. از مدلِ وسیله‌ها: $\mathbf{A}_i$، $\mathbf{B}_i$، $\mathbf{C}_i$ و $\mathbf{Y}_i$؛ مقادیر ویژه و بردارهای ویژهٔ $\mathbf{A}_i$ را با استفاده از روش تبدیل QR محاسبه کنید.

۲. مقدار اولیهٔ فرکانس مختلط s را برابر با تخمین اولیهٔ مقدار ویژه، قرار دهید.

۳. با استفاده از معادلات ۱۲ ـ ۲۱۸ و ۱۲ ـ ۲۱۹، $\Delta\mathbf{I}_{Ke}(s)$ و $\mathbf{Y}_{Ke}(s)$ی مربوط به ماشین منحرف شده، و با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۳ $\mathbf{Y}_{ie}(s)$ را برای کلیهٔ وسایل دینامیکی دیگر محاسبه کنید.

۴. معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۱ را برای محاسبهٔ ولتاژ شین، $\Delta\mathbf{v}$، حل کنید.

۵. با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۶ ΔT_m را برای ماشین منحرف شده، با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۱ $\Delta\omega_r$ را برای کلیهٔ ماشینها و با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۰۹ H_e را محاسبه کنید.

۶. با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۱۰ تخمین بعدی s را محاسبه کنید.

۷. اگر Δs بین تکرارهای متوالی در بین تلرانس مشخص شده باشد، مقدار ویژه را برابر s قرار داده، توقف کنید و در غیر این‌صورت، به مرحلهٔ ۳ رفته فرایند را تکرار کنید.

روند بالا برای محاسبهٔ مقادیر ویژهٔ متناظر با مُدهای زاویهٔ روتور فقط شامل حل معادلات جبری ۱۲ ـ ۲۲۱ می‌شود و تشکیل ماتریس حالت ($\mathbf{A}$) سیستم کلی را لازم نمی‌دارد. به جای آن، معادلات حالت، برای هر وسیلهٔ دینامیکی تشکیل شده و به عنوان مسألهٔ مقدار ویژهٔ کوچک برای تشکیل ماتریس ادمیتانسِ معادل $\mathbf{Y}_{ie}(s)$ مطرح می‌شود. ماتریس ادمیتانسِ کلی معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۱ به میزان زیادی پراکنده است. از این‌رو، با بکارگیری روشهای مؤثر حل براساس شیوهٔ پراکندگی، این روش به سیستمهای قدرتی با بیش از ۲۰۰۰ وسیلهٔ دینامیکی و ۱۲۰۰۰ شین اعمال شده است [۱۰].

یکی از محدودیتهای الگوریتم AESOPS، به جز در مواردی که مشخصه‌های مُدهای بحرانی از قبل معلوم هستند، آن است که جستجوی فراوانی برای یافتن کلیهٔ مُدهای بحرانی لازم است. درواقع، هیچ تضمینی وجود ندارد که کلیه مُدهای بحرانی، شناسایی شده باشند. این روش، برای دنبال کردن تغییرات مودهای معینی به هنگام تغییر شرایط سیستم، بسیار مناسب است. روش آرنولدی، توصیف شده در بخش بعد، بر این محدودیتهای روش AESOPS فائق می‌آید.

محاسبهٔ بردارهای ویژه. در روش AESOPS انحرافهای سرعت $\Delta\omega_r$ برای کلیهٔ ماشینها، که در آخرین تکرار محاسبه شده، مستقیماً مؤلفهٔ متناظر در بردار ویژهٔ راست را به دست می‌دهد.

و معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۳ چنین می‌شود:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_N = \mathbf{v}_N\mathbf{H}_N \qquad (۲۲۴ - ۱۲)$$

بنابراین $\mathbf{A}$ به ماتریس هِسِنبرگ فوقانی $\mathbf{H}_N$ تقلیل یافته که مقادیر ویژهٔ آن، مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}$ است. یک ویژگی مهم روش آن است که مقادیر $h_{m+1,m}$، درایه‌های زیرقطریِ $\mathbf{H}_m$، با افزایش m با سرعت زیاد کاهش می‌یابند، بنابراین می‌توان برای $m \ll N$ و با نادیده گرفتن جملهٔ دوم در معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۳، تقریب خوبی به شکل زیر به کار برد:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_m \approx \mathbf{v}_m\mathbf{H}_m \qquad (۲۲۵ - ۱۲)$$

مقادیر ویژهٔ $\mathbf{H}_m$، که از مرتبهٔ بسیار پایینی هستند، زیرمجموعه‌ای از مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}$ را تقریب می‌زنند. بردارهای ویژهٔ متناظر $\mathbf{A}$ به صورت زیر داده می‌شوند:

$$\mathbf{W} \approx \mathbf{V}_m\mathbf{P} \qquad (۲۲۶ - ۱۲)$$

که در آن $\mathbf{P}$ ماتریس بردار ویژهٔ $\mathbf{H}_m$ است. برای بهبود دقت مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}$، می‌توان شیوهٔ عمل فوق را با یک بردار شروع کنندهٔ جدید $\mathbf{v}_1^{new}$ بدست آمده از ترکیب خطیِ ستونهای $\mathbf{V}_m$، تکرار کرد:

$$\mathbf{v}_1^{new} = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i\mathbf{v}_i \qquad (۲۲۷ - ۱۲)$$

که در آن α_i ضرایبی است که از خواص مُدال $\mathbf{H}_m$ محاسبه می‌شود [۱۶].

معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۵ فقط درصورتی برقرار است که دنبالهٔ برداری $\mathbf{v}_i$ در هر مرحله از محاسبه، متعامد نگه داشته شود. در عمل، ممکن است به دلیل حذف عددی و خطاهای گرد کردن تعامد بسرعت از دست برود. راه‌حل این مشکل آن است که از یک فرایند متعامدسازی مجدد [۱۶] بعد از محاسبهٔ هر $\mathbf{v}_i$ از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۲ استفاده شود.

یکی از ویژگیهای مهم این روش آن است که مقادیر ویژهٔ $\mathbf{H}_m$ در معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۵، معمولاً به آن مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}$ همگرا می‌شوند که بزرگترین (و کوچکترین) قدر مطلق را دارند. از این‌رو، اگر مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}$ حول یک نقطهٔ مشخص، موردنظر باشند، می‌توان از تبدیل:

$$\mathbf{A}_t = (\mathbf{A} - \lambda_t\mathbf{I})^{-1} \qquad (۲۲۸ - ۱۲)$$

ماتریس **A**، که باید مقادیر ویژه‌اش محاسبه شود، با تکرار زیر به یک ماتریس هِسِنبرگ فوقانی[1] کاهش داده می‌شود:

$$h_{i+1,i}\,\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{A}\mathbf{v}_i - \sum_{j=1}^{i} h_{j,i}\,\mathbf{v}_j \qquad i = 1, \ldots, m \qquad (۲۲۲-۱۲)$$

که در آن:

$h_{j,i} = \mathbf{v}_j^H \mathbf{A}\,\mathbf{v}_i$ (بالانویس **H** نشان‌دهندهٔ ترانهادهٔ مزدوج است)

$\mathbf{v}_1$، یک بردار شروع کنندهٔ دلخواه با $\|v_1\|_2 = 1$؛

$h_{i+1,i}$ ضریب مقیاس برای تضمین $\|v_{i+1}\|_2 = 1$؛

و m مرتبهٔ از پیش تعیین شدهٔ ماتریس هِسِنبرگِ کاهش یافته است.

معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۲ را می‌توان دوباره مرتب و جمع کرد تا معادلهٔ زیر به دست آید:

$$\mathbf{A}\,\mathbf{V}_m = \mathbf{V}_m\,\mathbf{H}_m + h_{m+1,m}\,\mathbf{v}_{m+1}\,\mathbf{e}_m^T \qquad (۲۲۳-۱۲)$$

که در آن:

$$\mathbf{V}_m = [\mathbf{v}_1, \ldots, \mathbf{v}_m]$$

$$\mathbf{H}_m = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,m} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdot\cdot \\ 0 & \cdots & h_{m,m-1} & h_{m,m} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{e}_m^T = [\,0 \;\; \ldots \;\; 0 \;\; 1\,]$$

در اینجا $\mathbf{H}_m$ یک ماتریس هِسِنبرگ فوقانی است. می‌توان نشان داد که دنبالهٔ برداری $\mathbf{v}_i$ تولید شده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۲ به طور ایده‌ال متعامدِ یکه است. بنابراین، اگر $m = N$ (مرتبهٔ **A**) باشد، داریم:

$$h_{N+1,N} = 0$$

1. Upper Hessenberg Matrix

معادله‌های ۱۲ ـ ۲۲۳ و ۱۲ ـ ۲۳۴ را می‌توان با هم ترکیب کرد تا معادلهٔ ماتریسی زیر نتیجه شود:

$$\begin{pmatrix} (\mathbf{A}_D - \lambda_t \mathbf{I}) & \mathbf{B}_D \\ \mathbf{C}_D & -(\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{q}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_i \\ 0 \end{pmatrix} \qquad (۱۲ ـ ۲۳۵)$$

در زیر مراحل محاسباتی همراه با MAM آورده شده است:

۱. مدلهای وسیله: $\mathbf{A}_i$، $\mathbf{B}_i$، $\mathbf{C}_i$ و $\mathbf{Y}_i$ را تشکیل دهید.

۲. ماتریس ادمیتانس وسیله، متناظر با نقطهٔ شیفتِ انتخاب شدهٔ λ_t را محاسبه کنید:

$$\mathbf{Y}_{De}(\lambda_t) = \mathbf{Y}_D - \mathbf{C}_D (\lambda_t \mathbf{I} - \mathbf{A}_D)^{-1} \mathbf{B}_D \qquad (۱۲ ـ ۲۳۶)$$

۳. معادلهٔ ذیل را برای $\mathbf{q}_i$ حل کنید:

$$[\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_{De}(\lambda_t)]\, \mathbf{q}_i = -\mathbf{C}_D (\lambda_t \mathbf{I} - \mathbf{A}_D)^{-1} \mathbf{v}_i \qquad (۱۲ ـ ۲۳۷)$$

۴. از رابطهٔ زیر $\mathbf{u}_i$ را محاسبه کنید:

$$\mathbf{u}_i = (\lambda_t \mathbf{I} - \mathbf{A}_D)^{-1} (\mathbf{B}_D \mathbf{q}_i - \mathbf{v}_i) \qquad (۱۲ ـ ۲۳۸)$$

۵. $\mathbf{v}_{i+1}$ را با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۳۱ و درایه‌های مرتبط $\mathbf{H}_m$ را با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۳۲، با مرتبهٔ m مساوی با مقدار مشخص شده، محاسبه کنید. مراحل ۳ تا ۵ را برای تشکیل $\mathbf{V}_m$ و $\mathbf{H}_m$ کامل تکرار کنید.

۶. مقادیر ویژهٔ $\mathbf{H}_m$ را با استفاده از روش تبدیل QR محاسبه کنید. اگر مجموعهٔ مطلوب مقادیر ویژه به مقدار خطای داده شده همگرا شده توقف کنید و در غیر این صورت، یک بردار شروع کنندهٔ جدید $\mathbf{v}_1^{new}$ را با استفاده از معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۷ محاسبه کنید، و به مرحله ۳ بازگردید.

باید اشاره کرد که لازم است از ماتریس ادمیتانس معادل شبکه $\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_{De}(\lambda_t)$ در معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۳۷ فقط یک‌بار فاکتورگیری انجام گیرد، زیرا λ_t درحین فرایند تکرار تغییر نمی‌کند و این به کارآیی روش اضافه می‌کند. از آنجاکه ماتریس ادمیتانس خیلی پراکنده است، این روش می‌تواند با استفاده از روشهای مبتنی بر پراکندگی به سیستمهای بسیار بزرگ نیز برای حل معادلات جبری اعمال شود.

MAM برخلاف الگوریتم AESOPS، می‌تواند مقادیر ویژهٔ متناظر با هر مُد سیستم و نه فقط

به منظور بزرگ کردن مقادیر ویژهٔ نزدیک به λ_t استفاده کرد، زیرا:

$$\lambda_{ti} = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_t} \qquad (۲۲۹ - ۱۲)$$

که در آن λ_i مقدار ویژهٔ $\mathbf{A}$، و λ_{ti} مقدار ویژهٔ متناظر $\mathbf{A}_t$ است. در این صورت $\mathbf{A}_t$، ماتریس مناسبی برای اعمال روش به منظور پیداکردن مجموعهٔ مقادیر ویژهٔ $\mathbf{A}$ نزدیک به λ_t است، که *نقطهٔ شیفت*[1] نامیده می‌شود.

با کاربرد رابطهٔ تبدیل ۱۲ ـ ۲۲۸، تنها محاسبهٔ شامل $\mathbf{A}$ در ساختن دنبالهٔ برداری $\mathbf{v}_i$، حل معادله زیر است:

$$(\mathbf{A} - \lambda_t \mathbf{I})\mathbf{u}_i = \mathbf{v}_i \qquad (۲۳۰ - ۱۲)$$

معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۲ را می‌توان برحسب $\mathbf{u}_i$ به صورت زیر بازنوشت:

$$h_{i+1,i}\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{u}_i - \sum_{j=1}^{i} h_{j,i}\mathbf{v}_j \qquad i = 1, \ldots, m \qquad (۲۳۱ - ۱۲)$$

و درایه‌های بالا مثلثی در $\mathbf{H}_m$ به شکل زیر درمی‌آید:

$$h_{j,i} = \mathbf{v}_j^H \mathbf{u}_i \qquad j \le i \qquad (۲۳۲ - ۱۲)$$

کاربرد الگوریتم MAM در مدل سیستم قدرت. با جایگزینی ماتریس حالت $\mathbf{A}$ مربوط به سیستم قدرتی با معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۹۲ در معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۳۰، نتیجه می‌شود:

$$(\mathbf{A}_D - \lambda_t \mathbf{I})\mathbf{u}_i + \mathbf{B}_D(\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)^{-1}\mathbf{C}_D\mathbf{u}_i = \mathbf{v}_i$$

که می‌توان آن را به شکل زیر نوشت:

$$(\mathbf{A}_D - \lambda_t \mathbf{I})\mathbf{u}_i + \mathbf{B}_D\mathbf{q}_i = \mathbf{v}_i \qquad (۲۳۳ - ۱۲)$$

که در آن:

$$\mathbf{q}_i = (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)^{-1}\mathbf{C}_D\mathbf{u}_i$$

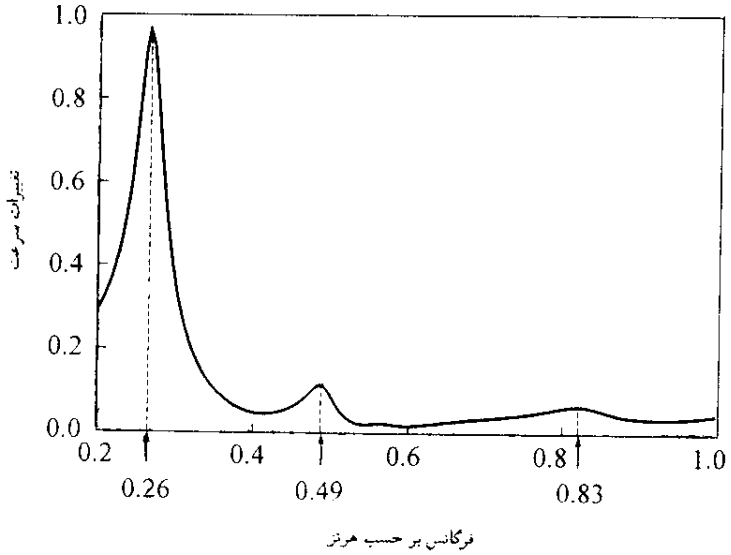
با دوباره مرتب کردن، داریم:

$$\mathbf{C}_D\mathbf{u}_i - (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)\mathbf{q}_i = 0 \qquad (۲۳۴ - ۱۲)$$

1. Shift Point

مختلط متناظر با مُدهای زاویهٔ روتور برای مقایسه با AESOPS و MAM انتخاب شدند. تخمینهای اولیهٔ مقادیر ویژه برای هر دو روش چنان انتخاب شدند که از مقادیر واقعی، حدود ۱۰٪ انحراف داشته باشند. از جدول ۱۲ ـ ۲، مشاهده می‌کنیم که هر سه روش در عمل نتایج یکسانی را به دست می‌دهند. این نتایج، خصوصاً با توجه به آنکه سه روش بر سه نظریهٔ بسیار متفاوت پایه‌گذاری شده‌اند، اطمینان بخش است.

برای بررسی نکته‌ای دیگر راجع به اعتبار نتایج مذکور، با تغییرِ گشتاور مکانیکی یک ژنراتور بزرگ (با مشارکت بالا در هر سه مُد) به عنوان سیگنال ورودی و تغییر سرعت همان ژنراتور به عنوان سیگنال خروجی، پاسخ فرکانسی با استفاده از PEALS محاسبه شد. شکل ۱۲ ـ ۲۲ نمودار پاسخ فرکانسی محاسبه شده را نشان می‌دهد، که فرکانسهای تشدیدی در حدود ۰/۲۶، ۰/۴۹ و ۰/۸۳ هرتز را از خود نشان می‌دهد. که با فرکانسهای مُدهای انتخاب شده هماهنگی دارد.



شکل ۱۲ ـ ۲۲ پاسخ فرکانسی

مثال ۱۲ ـ ۶

در این مثال، پایداری سیگنال کوچک یک سیستم دو ناحیه‌ای ساده را مطابق شکل ۱۲ ـ ۸ م تحلیل می‌کنیم. این سیستم از نظر ساختار مشابه سیستمهایی است که در مراجع ۲۳ و ۴۶ برای مطالعهٔ ویژگیهای اصلی نوسانهای بین ناحیه‌ای استفاده شده است.

مُد زاویهٔ روتور را محاسبه کند. علاوه بر این، اطلاعات *قبلی* در رابطه با مشخصه‌های مُد سیستم را لازم نمی دارد. معمولاً، نقطهٔ شیفت λ_t به منظور محاسبهٔ مجموعه‌ای خاص از مقادیر ویژهٔ نزدیک به آن داده می‌شود. با اصلاح اندک الگوریتم، از این روش می‌توان به منظور فراهم آوردن امکان نگرش اجمالی بر مقادیر ویژه برگستره‌ای از فرکانسی در صفحه مختلط با تضمین آنکه کلیهٔ مقادیر ویژهٔ بحرانی در داخل محدوده‌ای مشخص محاسبه شده‌اند، استفاده کرد.

محاسبهٔ بردارهای ویژه. بردارهای ویژهٔ راست، مستقیماً از آخرین تکرار معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۲۶ به دست می‌آیند. بردارهای ویژهٔ چپ نیز از تکرار معکوس حاصل می‌شوند. برای این کار لازم است پاسخ معادلهٔ ۱۲ ـ ۲۳۵ ، به شکل ترانهادهٔ زیر درآید:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_D^T - \lambda_t \mathbf{I} & \mathbf{C}_D^T \\ \mathbf{B}_D^T & -(\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_\circ \\ \circ \end{pmatrix}$$

معمولاً با مقدار ویژهٔ محاسبه شده λ_t و یک بردار دلخواه $\mathbf{y}_\circ$، فقط یک تکرار برای رسیدن به بردار ویژهٔ چپ، کافی است.

مقایسهٔ نتایج

جدول ۱۲ ـ ۲ محاسبهٔ مقادیر ویژه را با استفاده از تبدیل QR ، AESOPS و MAM مقایسه می‌کند. سیستم آزمایشی، از ۹۴ ژنراتور و حدود ۱۴۰۰ شین تشکیل شده است. ۱۸ ژنراتور با مدل تفصیلی و بقیه با مدل کلاسیک، نشان داده شده‌اند. که به مدلی با ۳۶۶ حالت انجامیده است. و از روش MASS و PEALS برای محاسبهٔ مقادیر ویژه استفاده شده است.

جدول ۱۲ ـ ۲

مُد	روش QR	AESOPS	MAM
A	−۰/۱۲۲ ± j۱/۶۵۰	−۰/۱۲۱ ± j۱/۶۵۰	−۰/۱۲۱ ± j۱/۶۵۰
B	−۰/۱۱۷ ± j۳/۰۷۳	−۰/۱۱۷ ± j۳/۰۷۳	−۰/۱۱۷ ± j۳/۰۷۳
C	−۰/۲۷۶ ± j۵/۲۱۲	−۰/۲۷۶ ± j۵/۲۱۲	−۰/۲۷۶ ± j۵/۲۱۲

نخست کلیهٔ مقادیر ویژهٔ ماتریس حالت و ضرایب مشارکت متناظر با استفاده از برنامهٔ MASS محاسبه شدند، که از روش تبدیل QR استفاده می‌کند. سپس سه جفت از مقادیر ویژهٔ

بارها و قدرت راکتیو تأمین شده (Q_c) به وسیلهٔ خازنهای شنت در شین‌های ۷ و ۹ عبارتند از:

شین ۷ : P_L = ۹۶۷ MW, Q_L = ۱۰۰ MVAr, Q_C = ۲۰۰ MVAr

شین ۹ : P_L = ۱,۷۶۷ MW, Q_L = ۱۰۰ MVAr, Q_C = ۳۵۰ MVAr

الف) اگر کلیهٔ چهار ژنراتور در حالت کنترل تحریک دستی (E_{fd} ثابت) قرار گرفته باشند، مقادیر ویژهٔ ماتریسِ حالت سیستم را، که نشان‌دهندهٔ عملکرد سیگنال کوچکِ سیستم حول نقطهٔ کار اولیه است، محاسبه کنید. برای هر مقدار ویژه، متغیرهای حالت سیستم با مشارکت بالا را شناسایی کنید. فرکانسها، نسبتهای میرایی، و شکل مُدهای نوسانیِ روتور را تعیین کنید. فرض کنید که مؤلفه‌های حقیقی بارها دارای مشخصه‌های جریانی ثابت، و مؤلفه‌های راکتیو بارها دارای مشخصه‌های امپدانس ثابت هستند.

ب) مقادیر ویژه، فرکانسها، و نسبتهای میرایی مُدهای نوسانیِ روتور را هنگامی که هر چهار ژنراتور به انواع کنترل تحریک زیر مجهز هستند، تعیین کنید:

۱. تحریک کنندهٔ جریان مستقیم خود تحریک (شکلهای ۸ ـ ۳۸ و ۸ ـ ۴۰ را ببینید):

K_A = ۲۰/۰ T_A = ۰/۰۵۵ T_E = ۰/۳۶ K_F = ۰/۱۲۵

T_F = ۱/۸ A_{ex} = ۰/۰۰۵۶ B_{ex} = ۱/۰۷۵ T_R = ۰/۰۵

T_B، T_C، R_C، X_C استفاده نشده‌اند

۲. تحریک کنندهٔ تریستوری با بهرهٔ گذرای بالا:

K_A = ۲۰۰/۰ T_R = ۰/۰۱

۳. تحریک کنندهٔ تریستوری با کاهش گذرای بهره (TGR):

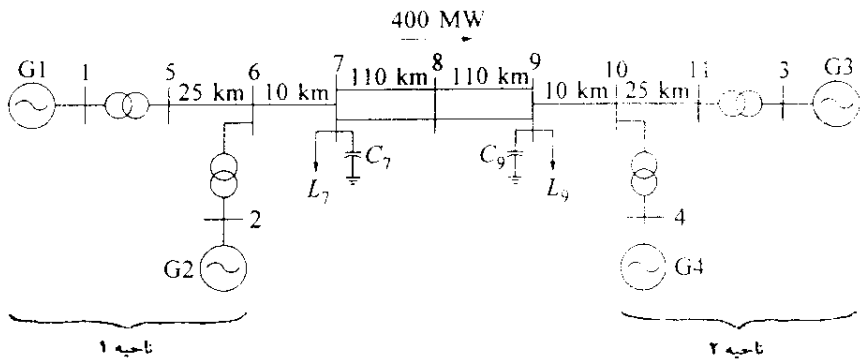
K_A = ۲۰۰/۰ T_R = ۰/۰۱ T_A = ۱/۰ T_B = ۱۰/۰

۴. تحریک کنندهٔ تریستوری با بهرهٔ گذرای بالا و PSS:

K_A = ۲۰۰/۰ T_R = ۰/۰۱ K_{STAB} = ۲۰/۰ T_W = ۱۰/۰

T_1 = ۰/۰۵ T_2 = ۰/۰۲ T_3 = ۳/۰ T_4 = ۵/۴

نمودار بلوکی سیستم تحریک تریستوری با PSS در شکل ۱۲ ـ ۹ م نشان داده شده است.



شکل ۱۲ ـ ۸ م یک سیستم دو ناحیه‌ای ساده

سیستم، شامل دو ناحیهٔ مشابه متصل شده با یک ارتباط ضعیف است. هر ناحیه از دو واحد کنار هم هر کدام دارای مقدار نامی ۹۰۰ MVA و ۲۰ KV، تشکیل شده است. پارامترهای ژنراتور در مبنای واحد بر پایهٔ مگا ولت آمپر و کیلو ولت نامی به صورت زیر می‌باشد:

$X_d = ۱/۸$ $X_q = ۱/۷$ $X_l = ۰/۲$ $X'_d = ۰/۳$ $X'_q = ۰/۵۵$

$X''_d = ۰/۲۵$ $X''_q = ۰/۲۵$ $R_a = ۰/۰۰۲۵$ $T'_{do} = ۸/۰\ s$ $T'_{qo} = ۰/۴\ s$

$T''_{do} = ۰/۰۳\ s$ $T''_{qo} = ۰/۰۵\ s$ $A_{sat} = ۰/۰۱۵$ $B_{sat} = ۹/۶$ $\psi_{TI} = ۰/۹$

$H = ۶/۵$ (برای $G_۱$ و $G_۲$) $H = ۶/۱۷۵$ (برای $G_۳$ و $G_۴$) $K_D = ۰$

هر ترانسفورمر بالابرنده دارای امپدانس ۰/۱۵ j + ۰/۰ در مبنای واحد بر پایهٔ ۹۰۰ MVA و ۲۰/۲۳۰ KV، و نسبت غیر نامی[1] ۱/۰ است.

ولتاژ نامی سیستم انتقال ۲۳۰ KV است. طول خطوط در شکل ۱۲ ـ ۸ م مشخص شده است. پارامترهای خطوط در مبنای واحد بر پایهٔ ۱۰۰ MVA، ۲۳۰ KV عبارت است از:

$r = ۰/۰۰۰۱$ pu/km $x_L = ۰/۰۰۱$ pu/km $b_c = ۰/۰۰۱۷۵$ pu/km

سیستم با ارسال ۴۰۰ MW از ناحیهٔ ۱ به ناحیهٔ ۲ عمل می‌کند، و واحدهای تولید کننده به صورت زیر بارگذاری شده‌اند:

G۱: P = ۷۰۰ MW, Q = ۱۸۵ MVAr, $E_t = ۱/۰۳ \angle ۲۰/۲°$

G۲: P = ۷۰۰ MW, Q = ۲۳۵ MVAr, $E_t = ۱/۰۱ \angle ۱۰/۵°$

G۳: P = ۷۱۹ MW, Q = ۱۷۶ MVAr, $E_t = ۱/۰۳ \angle -۶/۸°$

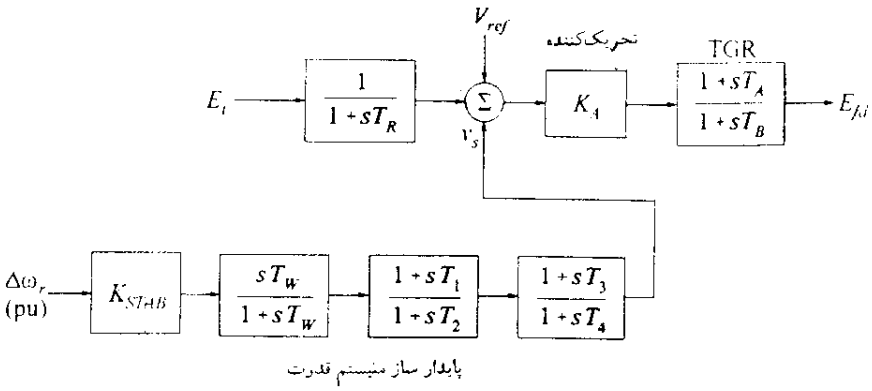
G۴: P = ۷۰۰ MW, Q = ۲۰۲ MVAr, $E_t = ۱/۰۱ \angle -۱۷/۰°$

1. Off - Nominal

در شکل ۱۲ ـ ۱۰ م نشان داده شده است. از شکل مُدها مشاهده می‌شود که مُد ۰/۵۵ هرتز، مُد بین ناحیه‌ای است که متناظر با پیچش ژنراتورهای G_1 و G_2 از ناحیهٔ ۱، برخلاف ژنراتورهای G_3 و G_4 از ناحیهٔ ۲ می‌باشد. مُد ۱/۰۹ هرتز، نوسانِ بین ماشینی محلی ناحیهٔ ۱ است که متناظر با پیچش G_1 برخلاف G_2 می‌باشد و سومین مُد زاویهٔ روتور، با فرکانس ۱/۱۲ هرتز، مُد بین ماشینی محلیِ ناحیه ۲، است.

جدول ۱۲ ـ ۳ م مُدهای سیستم با کنترل تحریک دستی

شماره	مقادیر ویژه: حقیقی	مقادیر ویژه: موهومی	فرکانس (Hz)	نسبت میرایی	حالتهای غالب
۱,۲	−۰/۷۶E−۳	± ۰/۲۲E − ۲	۰/۰۰۰۳	۰/۳۳۱	$\Delta\omega$ و $\Delta\delta$ ی G۱ , G۲ , G۳ , G۴
۳	۰/۹۶E − ۱	–	–	–	G۱ , G۲ , G۳ , G۴
۴,۵	− ۰/۱۱۱	± ۳/۴۳	۰/۵۴۵	۰/۰۳۲	G۱ , G۲ , G۳ , G۴
۶	− ۰/۱۱۷	–	–	–	G۱ , G۲ , G۳ , G۴
۷	− ۰/۲۶۵	–	–	–	$\Delta\psi_{fd}$ ی G۴ , G۳
۸	− ۰/۲۷۶	–	–	–	$\Delta\psi_{fd}$ ی G۲ , G۱
۹,۱۰	− ۰/۴۹۲	± ۶/۸۲	۱/۰۸۷	۰/۰۷۲	$\Delta\omega$ و $\Delta\delta$ ی G۲ , G۱
۱۱,۱۲	− ۰/۵۰۶	± ۷/۰۲	۱/۱۱۷	۰/۰۷۲	$\Delta\omega$ و $\Delta\delta$ ی G۴ , G۳
۱۳	− ۳/۴۲۸	–	–	–	شاردورهای سیم پیچهای میراکنندهٔ محور q و d
۱۴	− ۴/۱۳۹	–	–	–	
۱۵	− ۵/۲۸۷	–	–	–	
۱۶	− ۵/۳۰۳	–	–	–	
۱۷	− ۳۱/۰۳	–	–	–	
۱۸	− ۳۲/۴۵	–	–	–	
۱۹	− ۳۴/۰۷	–	–	–	
۲۰	− ۳۵/۵۳	–	–	–	
۲۱,۲۲	−۳۷/۸۹	±۰/۱۴۲	۰/۰۲۳	≈ ۱/۰	
۲۳,۲۴	−۳۸/۰۱	±۰/۳۸E − ۱	۰/۰۰۶	≈ ۱/۰	

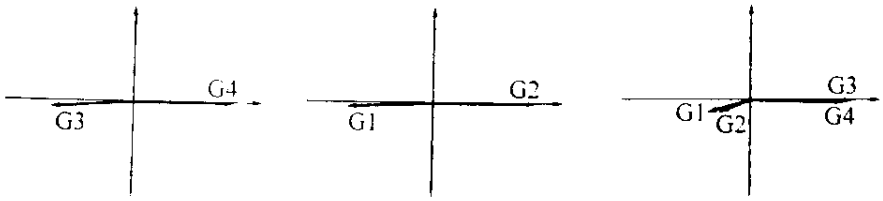


شکل ۱۲ ـ ۹ م سیستم تحریک تریستوری با PSS

حل

الف) مُدهای سیستم با ژنراتورها در حالت کنترل تحریک دستی. جدول ۱۲ ـ ۳ م مقادیر ویژهٔ ماتریس حالت سیستم و متغیرهای حالت را که مشارکت زیادی در هر مُد دارند، خلاصه می‌کند. دو مقدار ویژهٔ اول، مقادیر ویژهٔ صفر ناشی از متغیرهای حالت اضافی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در بخش ۱۲ ـ ۷ توضیح داده شد، یکی از این مقادیر ویژهٔ صفر ناشی از فقدان یکتایی زاویهٔ روتور است (هیچ شین بینهایتی وجود ندارد، و زوایای روتور به یک چارچوب مرجع مشترک ارجاع می‌شوند). مقدار ویژهٔ صفرِ دیگر ناشی از این فرض است که گشتاورهای ژنراتور مستقل از انحراف سرعت هستند (گاورنرهای سرعت مدل نشده‌اند و $K_D = 0$).

از جدول مشاهده می‌شود که سیستم پایدار است و سه مُد نوسانی برای زاویهٔ روتور وجود دارد که شکل مُد آنها (مؤلفه‌های بردار ویژهٔ نرمالیزه شدهٔ متناظر با سرعتهای روتور چهار ماشین)



(الف) مُد بین ناحیه‌ای f=0.545 Hz, ζ=0.032

(ب) مُد محلّی ناحیهٔ ۱ f=1.087 Hz, ζ=0.072

(ج) مُد محلّی ناحیهٔ ۲ f=1.117 Hz, ζ=0.072

شکل ۱۲ ـ ۱۰ م شکل مُدهای زاویهٔ روتور با کنترل تحریک دستی

زاویهٔ روتورِ یک ژنراتور منفرد و یا یک دستگاه منفرد در مقابل بقیهٔ سیستم قدرت، باشد. چنین نوسانهایی، نوسانهای *مُد محلی واحد*[1] نامیده می‌شود. مسائل پایداریِ چنین نوسانهایی مشابه مسائل سیستمی تک ماشینه و متصل به شین بینهایت است که در بخشهای ۱۲ ـ ۳ تا ۱۲ ـ ۶ بررسی شد. مسائل پایداری سیگنال کوچک، که معمولاً با آنها مواجه هستیم، از این دسته هستند.

همچنین ممکن است مسائل محلی، مربوط به نوسانهای بین روتورهای چند ژنراتور نزدیک به هم باشد. چنین نوسانهایی را *نوسانهای مُد بین ماشینی*[2] *یا بین واحدی*[3] می‌نامند. معمولاً، نوسانهای مُد محلی واحد و بین واحدی، فرکانسی در بازهٔ ۰/۷ تا ۲/۰ هرتز دارند.

مسائل محلی دیگر، ناپایداریِ مُدهای مربوط به کنترل وسایلی مانند سیستمهای تحریک ژنراتور، کنورتورهای HVDC، و جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو است. مسائل مربوط به *مُدهای کنترلی*، ناشی از تنظیم ناکافی سیستمهای کنترل می‌باشد [۲۱]. به علاوه، این کنترلها ممکن است با دینامیک سیستم محور توربین ـ ژنراتور اثر متقابلی داشته که موجب ناپایداری *نوسانهای مُد* پیچشی شود [۲۲]. مسائل نوسان پیچشی در فصل ۱۵ توصیف می‌شود.

تحلیل مسائل پایداری سیگنال کوچکِ محلی، مستلزم نمایش مشروح قسمت کوچکی از سیستم به هم پیوستهٔ قدرت است. نمایش سایر قسمتها را می‌توان به طور مناسبی و با استفاده از مدلهای ساده و معادلهای سیستمی ساده کرد و معمولاً می‌توان سیستم کامل را به طور کافی به وسیلهٔ مدلی دارای حداکثر چند صد حالت نمایش داد.

مسائل جامع

مسائل پایداری سیگنال کوچکِ جامع، ناشی از اثر متقابل بین گروه‌های بزرگی از ژنراتورهاست که دارای عواقب گسترده‌ای می‌باشد. و شامل نوسانهای گروهی از ژنراتورهای یک ناحیه است که برخلاف گروه دیگری از ژنراتورها نوسان می‌کنند. چنین نوسانهایی را *نوسانهای مُد بین ناحیه‌ای*[4] می‌نامند.

سیستمهای به هم پیوستهٔ بزرگ معمولاً دارای دو نوع متمایز از نوسانهای بین ناحیه‌ای هستند:

الف) مُد فرکانسی بسیار پایین که در برگیرندهٔ کلیه ژنراتورها در سیستم است. سیستم اساساً به دو قسمت تقسیم شده است، که ژنراتورها در یک قسمت با پیچش برخلاف ماشینها در

1. Local Plant Mode Oscillations
2. Intermachine
3. Interplant
4. Interarea Mode Oscillations

ب) *مُدهای زاویهٔ روتور با انواع مختلف کنترل تحریک.* جدول ۱۲ ـ ۴ م مقادیر ویژه، فرکانسها، و نسبتهای میرایی متناظر با مُدهای نوسانی روتور را برای چهار صورت دیگرِ کنترل تحریک خلاصه می‌کند.

مشاهده می‌کنیم که مُدهای نوسانی بین ماشینیِ محلی دارای درجهٔ یکسانی از میرایی تحریک کنندهٔ جریان مستقیم و تحریک کنندهٔ تریستوری (با و بدون TGR) هستند. مُد بین ناحیه‌ای، میرایی مثبت کوچکی با تحریک کنندهٔ جریان مستقیم دارد. TGR، مُد بین ناحیه‌ای را ناپایدارتر می‌کند. هنگامی که پایدارسازهای قدرت به تحریک کنندهٔ تریستوری اضافه شود، مُدهای بین ناحیه‌ای و مُدهای محلی بسیار خوب میرا می‌شوند.

جدول ۱۲ ـ ۴ م اثرات کنترل تحریک بر مُدهای نوسانی روتور

نوع کنترل تحریک	مقدار ویژه / (فرکانس برحسب هرتز، نسبت میرایی)		
	مُد بین ناحیه‌ای	مُد محلیِ ناحیهٔ ۱	مُد محلیِ ناحیهٔ ۲
۱. تحریک کنندهٔ جریان مستقیم	۰/۰۱۸ ± j ۳/۲۷ − (f = ۰/۵۲ و ζ = ۰/۰۰۵)	۰/۴۸۵ ± j ۶/۸۱ − (f = ۱/۰۸ و ζ = ۰/۰۷)	۰/۵۰۰ ± j ۷/۰۰ − (f = ۱/۱۱ و ζ = ۰/۰۷)
۲. تریستور با بهرهٔ زیاد	۰/۰۳۱ ± j ۳/۸۴ + (f = ۰/۶۱ و ζ = − ۰/۰۰۸)	۰/۴۹۰ ± j ۷/۱۵ − (f = ۱/۱۴ و ζ = ۰/۰۷)	۰/۴۹۶ ± j ۷/۳۵ − (f = ۱/۱۷ و ζ = ۰/۰۷)
۳. تریستور با TGR	۰/۱۲۳ ± j ۳/۴۶ + (f = ۰/۵۵ و ζ = − ۰/۰۳۶)	۰/۴۵۰ ± j ۶/۸۶ − (f = ۱/۰۹ و ζ = ۰/۰۶)	۰/۴۹۲ ± j ۷/۰۵ − (f = ۱/۱۲ و ζ = ۰/۰۶)
۴. تریستور با PSS	۰/۵۰۱ ± j ۳/۷۷ + (f = ۰/۶۰ و ζ = ۰/۱۳)	۱/۸۲۶ ± j ۸/۰۵ − (f = ۱/۲۸ و ζ = ۰/۲۲)	۱/۸۹۵ ± j ۸/۳۵ − (f = ۱/۳۳ و ζ = ۰/۲۲)

۱۲ ـ ۹ مشخصه‌های مسائل پایداریِ سیگنال کوچک

در سیستمهای بزرگ قدرت، ممکن است از نظر ماهوی مسائل پایداری سیگنال کوچک محلی یا جامع باشند.

مسائل محلی

مسائل محلی قسمت کوچکی از سیستم را شامل می‌شود. که ممکن است مربوط به نوسانهای

در خارج از این بخش، ممکن است مقادیر ویژه‌ای به جز مقادیر ویژهٔ نشان داده شده در صفحهٔ مختلط وجود داشته باشد.

جدول ۱۲ ـ ۳ مُدهای سیستم A محاسبه شده با استفاده از روش مرور فرکانسی

شمارهٔ مُد	مقدار ویژه	فرکانس (Hz)	نسبت میرایی
۱	− ۰/۷۵۶۷ ± j ۱/۴۱۶۳	۰/۲۲۵۴	۰/۴۷۱۲
۲	− ۰/۷۱۹۳ ± j ۱/۴۶۰۵	۰/۲۳۲۴	۰/۴۴۱۹
۳	− ۰/۷۹۹۹ ± j ۱/۵۶۲۳	۰/۲۴۸۶	۰/۴۵۵۸
۴	− ۰/۷۸۰۶ ± j ۱/۵۷۷۶	۰/۲۵۱۱	۰/۴۴۳۵
۵	− ۰/۱۲۶۵ ± j ۱/۹۸۹۴	۰/۳۱۶۶	۰/۰۶۳۴
۶	− ۰/۸۲۴۸ ± j ۲/۳۵۰۹	۰/۳۷۴۲	۰/۳۳۱۱
۷	− ۱/۰۶۹۸ ± j ۲/۳۶۴۲	۰/۳۷۶۳	۰/۴۱۲۳
۸	− ۰/۱۴۳۴ ± j ۲/۷۸۲۶	۰/۴۴۲۹	۰/۰۵۱۵
۹	− ۰/۲۸۷۱ ± j ۳/۲۴۹۵	۰/۵۱۷۲	۰/۰۸۸۰
۱۰	− ۰/۱۶۰۹ ± j ۳/۷۷۹۷	۰/۶۰۱۶	۰/۰۴۲۵
۱۱	− ۰/۴۳۸۲ ± j ۴/۶۷۵۴	۰/۷۴۴۱	۰/۰۹۳۳
۱۲	− ۰/۰۴۷۰ ± j ۴/۷۴۳۹	۰/۷۵۵۰	۰/۰۰۹۹
۱۳	− ۰/۳۳۳۶ ± j ۴/۸۲۶۲	۰/۷۶۸۱	۰/۰۶۸۹
۱۴	− ۰/۵۴۲۰ ± j ۵/۲۰۷۴	۰/۸۲۸۸	۰/۱۰۳۵
۱۵	− ۰/۰۵۵۱ ± j ۵/۴۲۰۰	۰/۸۶۲۶	۰/۰۱۰۲
۱۶	− ۰/۳۱۱۶ ± j ۵/۶۱۵۹	۰/۸۹۳۸	۰/۰۵۵۴
۱۷	− ۰/۱۴۵۱ ± j ۵/۸۸۲۵	۰/۹۳۶۲	۰/۰۲۴۷
۱۸	− ۰/۲۳۸۵ ± j ۶/۱۲۲۸	۰/۹۷۴۵	۰/۰۳۸۹
۱۹	− ۰/۲۲۴۳ ± j ۶/۱۷۴۵	۰/۹۸۲۷	۰/۰۳۶۳
۲۰	− ۰/۲۵۵۲ ± j ۶/۱۸۱۴	۰/۹۸۳۸	۰/۰۴۱۲
۲۱	− ۰/۱۹۶۱ ± j ۶/۳۵۰۴	۱/۰۱۰۷	۰/۰۳۰۹
۲۲	− ۰/۱۴۵۷ ± j ۶/۴۳۵۶	۱/۰۲۴۳	۰/۰۲۲۶

۲۲ مُد نمایش داده شده با مقادیر ویژهٔ شکل ۱۲ ـ ۲۳ و جدول ۱۲ ـ ۳ را می‌توان براساس

قسمت دیگر عمل می‌کنند. فرکانس این مُد نوسانی در حدود ۰/۱ تا ۰/۳ هرتز است.

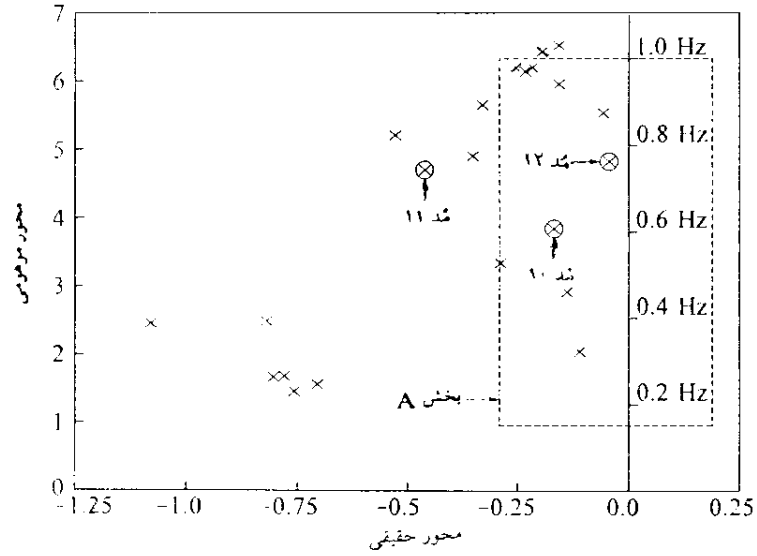
ب) مُدهای فرکانس بالاتر که در بر گیرندهٔ زیر گروههایی پیچشی برخلاف یکدیگر است. فرکانس این نوسانها معمولاً در بازهٔ ۰/۴ تا ۰/۷ هرتز قرار دارد.

نمایش مسائل جامع

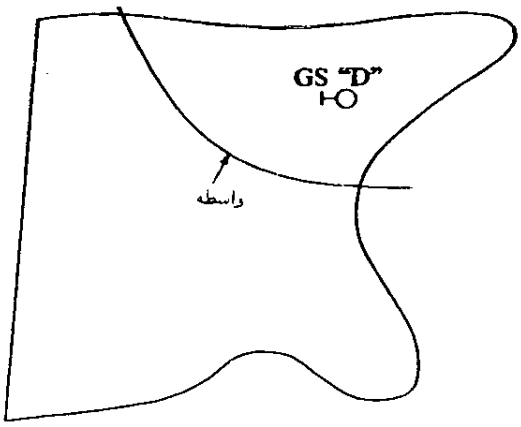
اینک دو سیستم بزرگ را با مشخصه‌های متمایز، برای نشان دادن دو نوع نوسان بین ناحیه‌ای، در نظر می‌گیریم.

سیستم آزمایشی A. این سیستمِ آزمایشی شامل ۲۳۱۰ شین، ۳۷۵ ژنراتور، و ۳ خط HVDC است. خط HVCD و ۲۹۱ ژنراتور به تفصیل مدل شده‌اند. ۸۴ ژنراتور باقیمانده، بیانگر ماشینهای معادل بوده، با مدل کلاسیک مدل شده‌اند.

برای شناسایی مُدهای بحرانیِ نوسان بین ناحیه‌ای، با استفاده از روش اصلاح شده آرنولدی، مقادیر ویژهٔ مُدهای سیستم با فرکانسهایی در بازهٔ ۰/۲ تا ۱/۰ هرتز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. جدول ۱۲ ـ ۳ مقادیر ویژه، فرکانسها، و نسبتهای میرایی مُدهای شناسایی شده را در بر می‌گیرد. شکل ۱۲ ـ ۲۳ نموداری از این مقادیر ویژه در صفحهٔ مختلط نشان می‌دهد. بخش A در شکل، محدوده‌ای را بر صفحهٔ مختلط نمایش می‌دهد که در داخل آن کلیهٔ مقادیر ویژه محاسبه شده‌اند.



شکل ۱۲ ـ ۲۳ مقادیر ویژهٔ محاسبه شده با مرور فرکانسی با استفاده از روش MAM



شکل ۱۲ ـ ۲۵ واسطه‌های مُدهای نوسانی بین ناحیه‌ای ۰/۲ هرتزیِ سیستم B

جدول ۱۲ ـ ۴ نتایج تحلیل انجام شده در بررسی اثر کنترل تحریک ژنراتورها را در یک نیروگاه حرارتی بزرگ با مشارکت بالا در مُد بین ناحیه‌ای، خلاصه می‌کند. این نیروگاه به صورت "GS"D در شکل ۱۲ ـ ۲۵ نشان داده شده است و دارای سیستم تحریکی تریستوری است.

جدول ۱۲ ـ ۴ تأثیر کنترل تحریک واحدهای تولیدی در "GS"D بر پایداری مُد بین ناحیه‌ای

نوع کنترل تحریک	مُد بین ناحیه‌ای	
	فرکانس (Hz)	نسبت میرایی
الف) تحریک کنندهٔ تریستوری با بهرهٔ گذرای زیاد	۰/۱۹۲	۰/۰۰۹
ب) تحریک کنندهٔ تریستوری با کاهش بهرهٔ گذرا	۰/۱۸۷	− ۰/۰۵۷
ج) تحریک تریستوری با پایدارساز سیستم قدرت	۰/۱۷۹	۰/۱۲۲

از این نتایج مشاهده می‌کنیم که کنترل تحریک ژنراتورها در نیروگاه حرارتی تأثیر بسزایی بر پایداری مُد نوسانی بین ناحیه‌ای (۰/۲ هرتزی) دارد. با یک تحریک کنندهٔ تریستوری بهرهٔ زیاد و برای وضعیت مشخص سیستم مُد بین ناحیه‌ای میرایی مثبت کوچکی (ζ = ۰/۰۰۹) دارد. با کاهش بهرهٔ گذرا، مُد بین ناحیه‌ای در عمل ناپایدار می‌شود (ζ = − ۰/۰۵۷). هنگامی که به سیستم یک پایدارساز سیستم قدرت (طراحی شده به صورت توصیف شده در مرجع ۹) اضافه می‌شود، میرایی به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد.

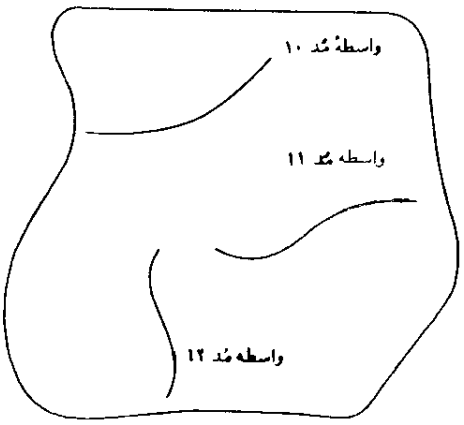
شکل مُد، به سه دسته زیر تقسیم کرد:

الف) مُدهای بین ناحیه‌ای، مانند مُدهای ۵ و ۸ تا ۱۲؛

ب) مُدهای محلی واحد، مانند مُدهای ۱۳، ۲۱ و ۲۲؛

ج) مُدهای کنترلی، مانند مُدهای ۱ تا ۴ و ۶.

مُدهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مُدهای بین ناحیه‌ایِ بحرانی را نشان می‌دهند. این مُدها فرکانسهایی در گستره ۰/۶ تا ۰/۷۵ هرتز دارند و هر یک نوسان یک زیر گروه از ژنراتورهای چرخشی را بر ضد زیر گروهی دیگر از ژنراتورها در دو سر یک واسطهٔ انتقال زیر بار ضعیف یا سنگین، نشان می‌دهد. شکل ۱۲ ـ ۲۴ نشان می‌دهد که چگونه واسطه‌هایی مربوط به سه مُد بین ناحیه‌ای بحرانی به طور جغرافیایی، سیستم کلی را تقسیم می‌کنند. مشخصه‌های پایداری هر مُد نوسانیِ بین ناحیه‌ای به انتقال قدرت در دو سر واسطهٔ آن و به کنترلهای مربوط به زیر گروههای واحدهای تولید در هر دو طرف واسطه بستگی دارد.



شکل ۱۲ ـ ۲۴ واسطه‌های مُدهای نوسانی بحرانی بین ناحیه‌ایِ سیستم A

سیستم آزمایشی B. این سیستم تقریباً شامل ۳۰۰۰ شین و ۳۰۰ ژنراتور است. این سیستم یک مُد بین ناحیه‌ای غالب با فرکانس ۰/۲ هرتز دارد که عملاً کلیهٔ ژنراتورهای سیستم در آن مشارکت دارند. همان‌طور که در شکل ۱۲ ـ ۲۵ نمایش داده شده، شکل مُد بین ناحیه‌ای چنان است که سیستم را به دو قسمت تقسیم می‌کند. هنگامی که سیستم منحرف می‌شود، واحدهای تولیدکننده در هر دو طرف واسطه برخلاف هم و با فرکانسی در حدود ۰/۲ هرتز می‌چرخند.

منابع

[1] A.M. Lyapunov, *Stability of Motion*, English translation, Academic Press, Inc., 1967.

[2] G.C. Verghese, I.J. Perez-Arriaga, and F.C. Schweppe, "Selective Modal Analysis with Application to Electric Power Systems, Part I: Heuristic Introduction, Part II: The Dynamic Stability Problem," *IEEE Trans.*, Vol., PAS-101, No. 9, pp. 3117-3134, September 1982.

[3] J.G.F. Francis, "The QR Transformation - A Unitary Analogue to the LR Transformation," Parts 1 and 2, *The Computer Journal*, Vol. 4, pp. 265-271, 1961; pp. 332-345, 1962.

[4] J.H. Wilkinson, *The Algebraic Eigenvalue Problem*, Clarendon Press, Oxford, 1965.

[5] W.G. Heffron and R.A. Phillips, "Effects of Modern Amplidyne Voltage Regulator in Underexcited Operation of Large Turbine Generators," *AIEE Trans.*, Vol. PAS-71, pp. 692-697, August 1952.

[6] F.P. deMello and C. Corcordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-88, pp. 316-329, April 1969.

[7] S.B. Crary, *Power System Stability*, Vol. II, John Wiley & Sons, Inc., 1955.

[8] F.P. DeMello and T.F. Laskoswski, "Concepts of Power System Dynamic Stability," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-94, pp. 827-833, May/June 1975.

[9] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers, and M.S. Zywno, "Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, pp. 614-626, May 1989.

[10] P. Kundur, G.J. Rogers, D.Y. Wong, L. Wang, and M.G. Lauby, "A Comprehensive Computer Program for Small Signal Stability Analysis of Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-5, pp. 1076-1083, November 1990.

[11] EPRI Report EL-5798, "The Small Signal Stability Program Package," Vol. 1, Final Report of Project 2447-1, Prepared by Ontario Hydro, May 1988.

[12] S. Arabi, G.J. Rogers, D.Y. Wong, P. Kundur, and M.G. Lauby, "Small Signal Stability Program Analysis of SVC and HVDC in AC Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-6, pp. 1147-1153, August 1991.

عوامل تأثیرگذار بر مُدهای نوسانی بین ناحیه‌ای

مشخصه‌های مُدهای نوسان بین ناحیه‌ای بسیار پیچیده است و از برخی نظرها با مُدهای محلی واحد بسیار متفاوت می‌باشد. و بخصوص مشخصه‌های بار، تأثیری اساسی بر پایداری مُدهای بین ناحیه‌ای دارد. نحوهٔ تأثیر سیستمهای تحریک بر نوسانهای بین ناحیه‌ای به انواع و محلهای تحریک کننده‌ها، و مشخصه‌های بارها بستگی دارد [۲۳].

معمولاً سیستمهای کنترل سرعت تأثیر چندانی بر نوسانهای بین ناحیه‌ای ندارند. لیکن، اگر به گونهٔ مناسبی تنظیم نشوند، ممکن است میرایی نوسانها را اندکی کاهش دهند که ممکن است در شرایط حدی برای بدتر کردن موقعیت به مقدار زیاد، کافی باشد. در صورت فقدان وسیلهٔ مناسب دیگری برای افزایش میرایی، ممکن است تنظیم یا متوقف کردن گاورنرها اندک گشایشی فراهم آورد. [۲۶].

یک مود نوسانی در قسمتی از سیستم ممکن است به واسطهٔ تزویج مُد با مُد نوسانی دیگری در یک قسمت دور افتاده تداخل پیدا کند. این واقعه هنگامی رخ می‌دهد که فرکانسهای دو مُد تقریباً مساوی باشند [۲۵ و ۲۴] و باید در تفسیر نتایج تحلیل در چنین حالاتی دقت کرد.

کنترل‌پذیری مُدهای بین ناحیه‌ای با PSS تابع پیچیده‌ای از چند عامل است:

- محل واحد با PSS؛
- مشخصه‌ها و محل بار؛
- انواع تحریک کننده در سایر واحدها.

در برخی واحدها، PSS اثر مطلوبی بر نوسانهای بین ناحیه‌ای ندارد. مرجع ۲۴ نتایج یک مطالعهٔ تفصیلی را در مورد عوامل تأثیرگذار بر عملکرد PSS در میرایی مُدهای نوسانی بین ناحیه‌ای و بین واحدی ارائه می‌کند.

وسایل مؤثر دیگر پایدارسازی مُدهای نوسانی بین ناحیه‌ای، مدوله کردن کنترلهای کنورتور HVDC و کنترلهای جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو است.

تحلیل نوسانهای بین ناحیه‌ای مستلزم نمایش تفصیلیِ کل سیستم به هم پیوستهٔ قدرت است. و بویژه باید مدلهای سیستم تحریک و بارها دقیق باشند، و باید همان اندازه از جزئیات مدلسازی در کل سیستم به کار گرفته شود.

مرجع ۲۷ گزارشی تفصیلی راجع به مطالعهٔ جامع مسائل نوسان بین ناحیه‌ای، شامل ویژگیهای اساسی مسأله، روشهای تحلیل، و روشهای طراحی کنترل برای سبک کردن مسأله را فراهم می‌آورد.

دربارهٔ افزایش پایداری سیگنال کوچک در فصل هفدهم بحث شده است.

[24] M. Klein, G.J. Rogers, S. Moorty, and P. Kundur, "Analytical Investigation of Factors Influencing Power System Stabilizers Performance," Paper 92WM016-6EC, Presented at the IEEE PES Winter Meeting, New York, January 1992.

[25] D.K. Mugwanya and J.E. Van Ness, "Mode Coupling in Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-2, pp. 264-270, May 1987.

[26] O.W. Hanson, C.J. Goodwin, and P.L. Dandeno, "Identification of Excitation and Speed Control Parameters in Stabilizing Inter-System Oscillation," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-87, pp. 1306-1313, May 1968.

[27] Canadian Electrical Association Report, "Investigation of Low Frequency Inter-area Oscillation Problems in Large Interconnected Power Systems," Report of Research Project 294T622, prepared by Ontario Hydro, 1993.

[13] N. Martins and L.T.G. Lima, "Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small Signal Electromechanical Stability Problems," *Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, IEEE publication 90TH0292-3-PWR.

[14] R.T. Byerly, R.J. Bennon, and D.E. Sherman, "Eigenvalue Analysis of Synchronizing Power Flow Oscillations in Large Electric Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, pp. 235-243, January 1982.

[15] N. Martins, "Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-1, pp. 217-225, February 1986.

[16] L. Wang and A. Semlyen, "Application of Sparse Eigenvalue Techniques to the Small Signal Stability Analysis of Large Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-6, pp. 635-642, November 1990.

[17] N. Uchida and T. Nagao, "A New Eigen-Analysis Method of Steady-State Stability Studies for Large Power Systems: S Matrix Method," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-3, pp. 706-714, May 1988.

[18] F.L. Pagola, L. Rouco, and I.J. Perez-Arriaga, "Analysis and Control of Small-Signal Stability in Electric Power Systems by Selective Modal Analysis," *Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, IEEE publication 90TH0292-3-PWR.

[19] W.E. Arnoldi, "The Principle of Minimized Iterations in the Solution of the Matrix Eigenvalue Problem," *Quart. Appl. Math.*, Vol. 9, pp. 17-29, 1951.

[20] Y. Saad, "Variations on Arnoldi's Method for Computing Eigenelements of Large Unsymmetric Matrices," *Linear Algebra and Its Applications*, Vol. 34, pp. 184-198, June 1981.

[21] P. Kundur, D.C. Lee, and H.M. Zein El-Din, "Power System Stabilizers for Thermal Units: Analytical Techniques and On-site Validation," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 81-95, January 1981.

[22] P. Kundur and P.L. Dandeno, "Practical Application of Eigenvalue Techniques in the Analysis of Power System Dynamic Stability Problems," *Proceedings of Fifth Power System Computation Conference*, Cambridge, England, September 1975.

[23] M. Klein, G.J. Rogers, and P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-6, No. 3, pp. 914-921, August 1991.

فصل سیزدهم

پایداری گذرا

همان‌طور که در فصل دوم توضیح داده شد، پایداری گذرا توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرونیزم است هنگامی که تحت تأثیر اغتشاش گذرای شدیدی مانند خرابیِ وسایل انتقال، از دست دادن تولید، یا از دست دادن یک بار بزرگ، قرار گیرد. پاسخ سیستم به چنین اغتشاشهایی تغییرات بزرگی را در زوایای روتور ژنراتور، توانهای انتقالی، ولتاژ شینها و سایر متغیرهای سیستم به وجود می‌آورد. پایداری از مشخصه‌های غیر خطی سیستم قدرت، تأثیر می‌پذیرد. اگر جداییِ زاویه‌ایِ پدید آمده بین ماشینهای سیستم، درون کرانهای معینی باقی بماند، سیستم سنکرونیزم را حفظ خواهد کرد. اما اگر سنکرونیزم، به واسطهٔ ناپایداری گذرا از دست برود، پس از ۲ تا ۳ ثانیه از بروز اغتشاش اولیه، معلوم خواهد شد.

این فصل ماهیتِ مسائل پایداری گذرا را نشان می‌دهد، عواملی که آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد شناسایی کرده، ملاحظات مدلسازی و روشهای تحلیلی قابل اعمال به تحلیل پایداری گذرا را توضیح می‌دهد.

۱۳ ـ ۱ دیدی مقدماتی از پایداری گذرا [۱ ـ ۳]

سیستم نشان داده در شکل ۱۳ ـ ۱ را در نظر بگیرید، این سیستم شامل یک ژنراتورِ تأمین کنندهٔ توان به یک سیستم بزرگ نمایش داده شده با یک شین بینهایت از طریق دو مدار انتقال است. شین بینهایت، همان‌طور که در فصل دوازدهم (بخش ۱۲ ـ ۳) توضیح داده شد، نمایانندهٔ منبع ولتاژی با دامنه و فرکانس ثابت است.

در این فصل مفاهیم اساسی و اصول پایداری گذرا را با تحلیل پاسخ سیستم به اغتشاشهای بزرگ و با استفاده از مدلهای بسیار ساده، ارائه خواهیم کرد. در این بحث، کلیهٔ مقاومتها نادیده

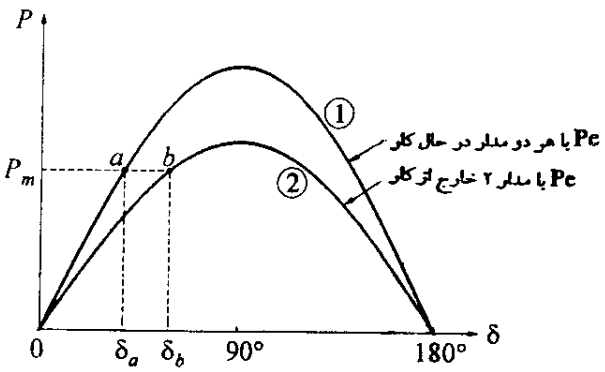
می‌توان مدل سیستم را به شکل ۱۳ ـ ۲«ب» کاهش داد و سپس می‌توان با روشهای تحلیلی ساده، مدل کاهش ـ یافته را بررسی کرد. این کار در به دست دادن فهمی پایه‌ای از پدیدهٔ پایداریِ گذرا سودمند است. این مدل، مشابهِ مدلی است که در شکل ۱۲ ـ ۴ فصل دوازدهم نشان داده شده است. از معادلهٔ ۱۲ ـ ۷۱ خروجی توان الکتریکی ژنراتور برابر است با:

$$P_e = \frac{E' E_B}{X_T} \sin\delta = P_{max} \sin\delta \qquad (۱ - ۱۳)$$

که در آن:

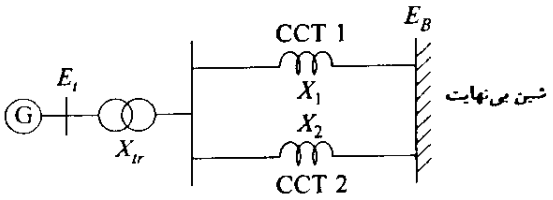
$$P_{max} = \frac{E' E_B}{X_T} \qquad (۲ - ۱۳)$$

از آنجا که مقاومت استاتور را نادیده گرفته‌ایم، P_e توان فاصلهٔ هوایی و نیز توان پایانه را نشان می‌دهد. رابطهٔ زاویه ـ توان، به صورت ترسیمی و با هر دو مدار انتقال در حال کار (I/S) در شکل ۱۳ ـ ۳ با منحنی شماره ۱ نشان داده شده است. با ورودی توان مکانیکی P_m، خروجی توان الکتریکی حالت ماندگار P_e برابر با P_m است و نقطه کار توسط نقطه a بر روی منحنی نمایش داده شده است (زاویهٔ مربوطهٔ روتور، δ_a).



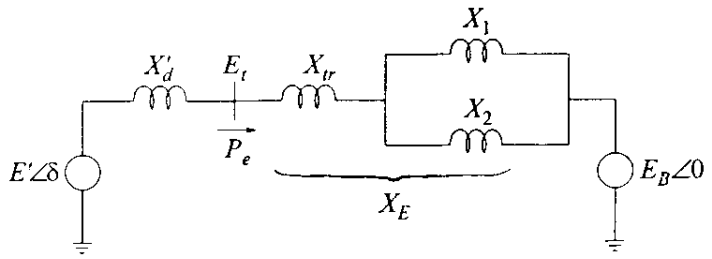
شکل ۱۳ ـ ۳ رابطهٔ زاویه ـ توان

اگر یکی از مدارها خارج از کار باشد (O/S)، راکتانس مؤثر X_T بیشتر خواهد بود. رابطهٔ زاویه ـ توان در حالتی که مدار ۲ خارج از کار است، در شکل ۱۳ ـ ۳ با منحنی شماره ۲ نشان داده شده است. در این حالت، توانِ حداکثر کمتر است. با یک توان مکانیکی ورودیِ مشخص P_m، زاویهٔ روتور δ_b متناظر با نقطهٔ کار b بر روی منحنی ۲ می‌باشد و با یک راکتانس بیشتر، به منظور انتقال همان توانِ حالت ماندگار، زاویهٔ روتور بیشتر است.

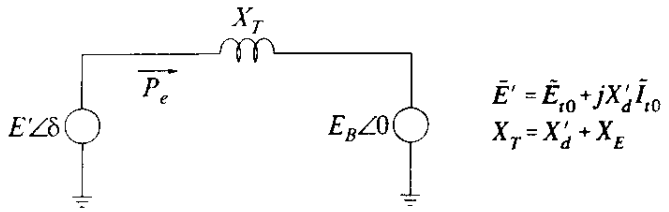


شکل ۱۳ ـ ۱ سیستم شین بینهایت تک ماشینه

گرفته شده‌اند، ژنراتور با مدل کلاسیک نشان داده می‌شود (فصل ۵، بخش ۵ ـ ۳ ـ ۱ را ببینید) و از اثر گاورنرِ سرعت نیز چشمپوشی می‌شود. سیستم مورد بحث در شکل ۱۳ ـ ۲ «الف» نشان داده شده است. ولتاژ متصل به راکتانس گذرا (X'_d) با E' نمایش داده شده است. زاویهٔ روتور، σ، زاویه‌ای است که E' به اندازهٔ آن از E_B پیش می‌افتد. هنگامی که سیستم اندکی تغییر می‌کند، اندازه E' در مقدار قبل از اغتشاش، ثابت باقی می‌ماند و δ با منحرف شدن سرعت روتورِ ژنراتور از سرعت سنکرونِ ω_0، تغییر می‌کند.

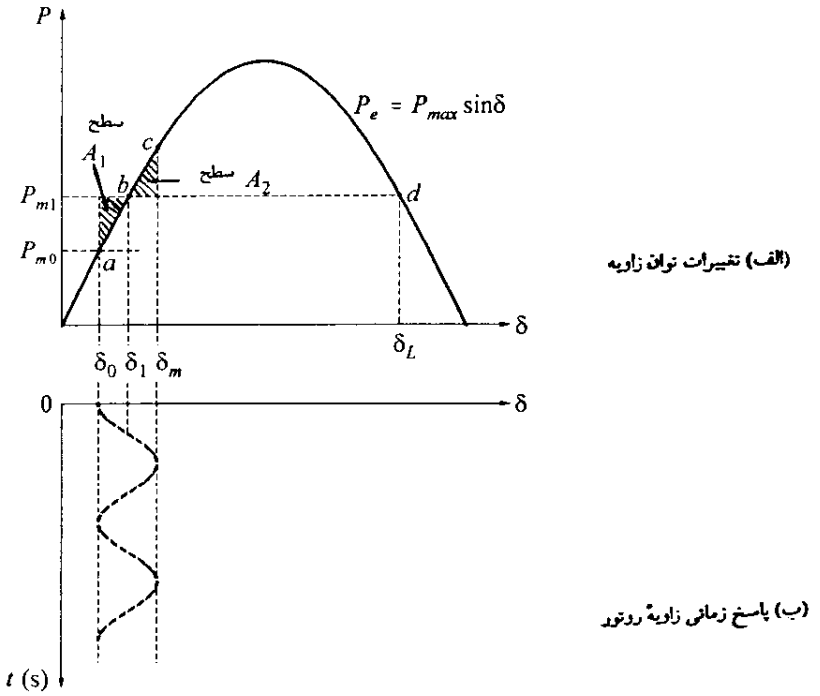


(الف) مدار معادل



(ب) مدار معادل کاهش یافته

شکل ۱۳ ـ ۲ نمایش سیستم همراه با ژنراتور نشان داده شده توسط مدل کلاسیک



شکل ۱۳ ـ ۴ پاسخ به تغییر پله‌ای در ورودی توان مکانیکی

زاویهٔ تعادل جدید δ_1 با دامنه‌ای ثابت مشابه با نمودار زمانیِ δ در شکل ۱۳ ـ ۴ «ب»، نوسان می‌کند.

در این نمایش از تمامی مقاومتها صرف‌نظر شده و از مدل کلاسیک برای نمایش ژنراتور استفاده شده است. در واقع، کلیهٔ منابع میرایی نادیده گرفته شده است. بنابراین، نوسانهای روتور پس از انحراف، بدون کاهش ادامه خواهد داشت. در عمل، همان‌طور که در فصل دواز هم بحث شد، منابع بسیاری از میرایی مثبت شامل تغییرات شار تحریک و سیم‌پیچ میرا کنندهٔ مدارها وجود دارد. در سیستمی که پایدار سیگنال کوچک است، نوسانها همواره میرا خواهد شد.

معیار سطوح مساوی

برای مدل مفروض سیستم در قسمت قبل، لازم نیست برای تعیین وضعیت نوسان زاویهٔ روتور، معادلهٔ نوسان به طور دقیق حل شود ولی می‌توان اطلاعات مربوط به حداکثر زاویهٔ گردش δ_m

در حین یک اغتشاش، نوسان δ بر روی سرعت سنکرون ω_0 سوار می‌شود، لیکن انحراف سرعت ($\Delta\omega_r = d\delta/dt$) بسیار کوچکتر از ω_0 است. بنابراین، سرعت ژنراتور عملاً برابر با ω_0 می‌باشد، و گشتاورِ فاصله هوایی را در مبنای واحد (pu) می‌توان برابر با توان مبنای واحد فاصلهٔ هوایی در نظر گرفت. از این رو هنگام مراجعه به معادلهٔ نوسان، گشتاور و توان را به جای هم استفاده می‌کنیم.

معادلهٔ حرکت یا *معادلهٔ نوسان* (فصل ۳، بخش ۳ - ۹ را ببینید) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_{max}\sin\delta \qquad (۳ - ۱۳)$$

که در آن:

P_m، ورودی توان مکانیکی برحسب pu؛

P_{max}، حداکثر توان الکتریکی خروجی برحسب pu؛

H، ثابت لختی برحسب MW.s / MVA؛

δ، زاویهٔ روتور برحسب رادیان الکتریکی؛

و t، زمان برحسب ثانیه است.

پاسخ به تغییر پله‌ای در P_m

اکنون رفتار گذرای سیستم را با هر دو مدار در کار، و با در نظر گرفتن یک افزایش ناگهانی در ورودیِ توان مکانیکی از مقدار اولیه P_{m0} به P_{m1}، مطابق شکل ۱۳ - ۴ «الف» بررسی می‌کنیم. به علت لختی روتور، زاویهٔ روتور نمی‌تواند به طور آنی از مقدار اولیهٔ δ_0 به δ_1 متناظر با نقطهٔ تعادل جدید b که در آن $P_e = P_{m1}$ است، تغییر کند. اکنون توان مکانیکی بیشتر از توان الکتریکی است، لذا گشتاور شتابدهندهٔ حاصل باعث می‌شود که روتور از نقطهٔ کار اولیهٔ a به سمت نقطهٔ تعادل جدید b، با دنبال کردن منحنی $P_e - \delta$ با آهنگ تعیین شده به وسیلهٔ معادلهٔ نوسان، شتاب گیرد. تفاضل بین P_{m1} و P_e در هر لحظه، توان شتابدهنده را نشان می‌دهد.

در نقطهٔ b، توان شتابدهنده، صفر است، لیکن سرعت روتور بیش از سرعت سنکرون ω_0 (متناظر با فرکانس ولتاژِ شین بینهایت) می‌باشد. از این رو، زاویهٔ روتور همچنان افزایش می‌یابد. برای مقادیر δ بیش از δ_1، P_e بزرگتر از P_{m1} است و بنابراین از سرعت روتور کاسته می‌شود. در مقدار اوج δ_m، سرعت روتور به مقدار سنکرون ω_0 بر می‌گردد، اما P_e بزرگتر از P_{m1} است. لذا روند کاهش سرعت موتور ادامه می‌یابد تا سرعت آن به زیر ω_0 برسد، در این صورت نقطهٔ کارِ منحنیِ $P_e - \delta$ از c به b و سپس دوباره به a انتقال می‌یابد. زاویهٔ روتور همواره حول

δ_0 به δ_1 تغییر پیدا می‌کند، انرژی به دست آمده برابر است با:

$$E_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e)\, d\delta = A_1 \text{ سطح} \qquad (۸ - ۱۳)$$

انرژی تلف شده حین کاهش سرعت هنگامی که δ از δ_1 به δ_m تغییر می‌یابد عبارت است از:

$$E_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_e - P_m)\, d\delta = A_2 \text{ سطح} \qquad (۹ - ۱۳)$$

از آنجا که هیچ تلفاتی را در نظر نگرفته‌ایم، انرژیِ به دست آمده مساوی با انرژیِ تلف شده است. از این رو، سطح A_1 برابر با سطح A_2 است. این پایه، معیار سطوح مساوی را بنا می‌گذارد. با این معیار می‌توانیم حداکثر مقدار نوسان δ و در نتیجه پایداری سیستم را بدون محاسبهٔ پاسخ زمانی، از طریق حل صریح معادلهٔ نوسان، تعیین کنیم. ضمناً می‌توان از این معیار برای تعیین حداکثر افزایش مجاز در P_m برای سیستم شکل ۱۳ ـ ۱ استفاده کرد. پایداری تنها در صورتی حفظ می‌شود که بتوان سطحی از A_2، حداقل برابر با A_1 را در بالای P_{m1} جایابی کرد. اگر A_1 بزرگتر از A_2 باشد، آنگاه $\delta_m > \delta_L$ است، و پایداری از دست می‌رود. از دست دادن پایداری بدین دلیل است که برای $\delta > \delta_L$، P_{m1} بزرگتر از P_e می‌باشد و گشتاور خالص به جای شتاب‌زدایی، شتاب می‌دهد.

اینک مکانیزم ناپایداری گذرا را با در نظر گرفتن پاسخ سیستم به خطای اتصال کوتاه روی سیستم انتقال بررسی می‌کنیم، که نوع متداول اغتشاش در مطالعات پایداری گذرا می‌باشد.

پاسخ به خطای اتصال کوتاه

پاسخ سیستم به خطای سه فاز را در محل F بر روی مدارِ انتقال ۲، مطابق شکل ۱۳ ـ ۵ «الف» در نظر می‌گیریم. مدار معادل متناظر، با فرض مدل کلاسیک ژنراتور، در شکل ۱۳ ـ ۵ «ب» نشان داده شده است. خطا با باز کردن کلیدهای مدار در هر طرف مدار خطادار بر طرف می‌شود، زمان رفع خطا به زمان رله‌ها و نیز زمان کلیدها بستگی دارد (بخش ۱۳ ـ ۵ ـ ۲ را ببینید).

اگر موقعیت خطای F در انتهای فرستنده (شین HT) مدار دارای خطا باشد، هیچ توانی به شین بینهایت انتقال نمی‌یابد. جریان اتصال کوتاه از ژنراتور و از طریق راکتانس‌های خالص به محل خطا فرستاده می‌شود. از این رو، فقط توان راکتیو جریان پیدا می‌کند و توان حقیقی P_e و گشتاور الکتریکی متناظر T_e در حین خطا در فاصله هوایی، صفر است. اگر در مدل داده شده،

و حد پایداری را به صورت ترسیمی و با بکارگیری نمودار توان ـ زاویهٔ شکل ۱۳ ـ ۴ به دست آورد. اگرچه این روش به سیستمهای چند ماشینه، با نمایش تفصیلی از ماشینهای سنکرون، قابل اعمال نیست، لیکن به درک عوامل اساسی مؤثر بر پایداری گذرای هر سیستمی کمک می‌کند.

از معادلهٔ ۱۳ ـ ۳، رابطهٔ زیر را بین زاویهٔ روتور و توان شتابدهنده به دست می‌آوریم:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \qquad (۱۳ - ۴)$$

ملاحظه می‌شود P_e تابعی غیر خطی از δ است، و بنابراین نمی‌توان معادلهٔ بالا را مستقیماً حل‌کرد. اگر طرفین معادله بالا را در $2d\delta/dt$ ضرب کنیم، آنگاه:

$$2\frac{d\delta}{dt}\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0(P_m - P_e)}{H}\frac{d\delta}{dt}$$

یا:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{d\delta}{dt}\right]^2 = \frac{\omega_0(P_m - P_e)}{H}\frac{d\delta}{dt} \qquad (۱۳ - ۵)$$

و انتگرالگیری نتیجه می‌دهد:

$$\left[\frac{d\delta}{dt}\right]^2 = \int \frac{\omega_0(P_m - P_e)}{H}\,d\delta \qquad (۱۳ - ۶)$$

در ابتدا، انحراف سرعت $d\delta/dt$ صفر است. اما بر اثر اغتشاش، تغییر خواهد کرد. برای عملکرد پایدار، باید انحراف زاویهٔ δ کراندار باشد و به یک مقدار حداکثر برسد (همانند نقطهٔ c در شکل ۱۳ ـ ۴) و سپس تغییر جهت دهد. برای این منظور باید انحراف سرعت $d\delta/dt$ زمانی پس از اغتشاش صفر شود. بنابراین، از معادله ۱۳ ـ ۶، به عنوان معیاری از پایداری می‌توان نوشت:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_m} \frac{\omega_0(P_m - P_e)}{H}\,d\delta = 0 \qquad (۱۳ - ۷)$$

که در آن، همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۴ نشان داده شده است، δ_0 زاویهٔ روتور اولیه و δ_m زاویهٔ روتور حداکثر است. بنابراین، اگر سیستم بخواهد پایدار باشد، باید سطح زیر تابع $P_m - P_e$، رسم‌شده برحسب δ، صفر باشد. در شکل ۱۳ ـ ۴، این شرط زمانی برآورده می‌شود که سطح A_1 برابر با سطح A_2 باشد. روتور در حین شتاب، انرژی جنبشی به دست می‌آورد و هنگامی که δ از

اگر موقعیت خطای F در مکانی دور از انتهای فرستنده، مطابق شکلهای ۱۳ ـ ۵ «الف» و «ب» باشد، هنگامی که خطا هنوز برقرار است مقداری توان حقیقی به شین بینهایت منتقل می‌شود.

شکلهای ۱۳ ـ ۵ «ج» و «د» نمودارهای $P_e - \delta$ را برای سه شرایط مختلف شبکه نشان می‌دهد: (۱) قبل از خطا (هر دو مدار در حال کار)، (۲) با یک خطای سه فاز بر روی مدار ۲ در مکانی دور از انتهای فرستنده، (۳) پس از خطا (مدار ۲ از کار افتاده). شکل ۱۳ ـ ۵ «ج» عملکرد سیستم را با توجه به زمان رفع خطای t_{c1} در نظر می‌گیرد و حالتی پایدار را نشان می‌دهد. شکل ۱۳ ـ ۵ «د» زمان رفع خطای طولانی‌تری (t_{c2}) را در نظر می‌گیرد به گونه‌ای که سیستم ناپایدار است. در هر دو حالت P_m ثابت فرض شده است.

اکنون حالت پایداری را که در شکل ۱۳ ـ ۵ «ج» نشان داده شده است، بررسی می‌کنیم. در آغاز، سیستم با هر دو مدار در حال کار و با فرض $P_e = P_m$ و $\delta = \delta_0$، عمل می‌کند. هنگامی که خطا رخ می‌دهد، نقطهٔ کار به صورت ناگهانی از a به b تغییر پیدا می‌کند. به دلیل لختی، زاویهٔ δ نمی‌تواند به طور آنی تغییر کند. چون در این حالت P_m از P_e بزرگتر است، روتور شتاب می‌گیرد تا اینکه نقطهٔ کار به c می‌رسد، هنگامی که با جداکردن مدار ۲ از سیستم خطا رفع می‌شود، نقطهٔ کار به طور ناگهانی به d انتقال پیدا می‌کند. در این زمان P_e از P_m بزرگتر است، که موجب کاهش سرعت روتور می‌شود. از آنجا که سرعت روتور بزرگتر از سرعت سنکرونِ ω_0 است، δ تا جایی افزایش می‌یابد که انرژی جنبشیِ به دست آمده در طول مدت شتاب‌گیری (نشان داده شده با سطح A_1)، با انتقال انرژی به سیستم، مصرف شود. نقطهٔ کار از d به e حرکت می‌کند، به گونه‌ای که سطح A_2 برابر با سطح A_1 است. در نقطهٔ e، سرعت مساویِ ω_0 می‌باشد و δ به حداکثر مقدار خود δ_m رسیده است. چون P_e هنوز بزرگتر از P_m است، سرعت روتور همچنان کُند می‌شود تا به زیر ω_0 کاهش یابد. زاویهٔ روتور δ کاهش پیدا می‌کند و نقطهٔ کار، دوباره مسیرِ e به d را طی می‌کند و باز هم منحنی $P_e - \delta$ را برای سیستم پس از خطا دنبال می‌کند. حداقل مقدار δ چنان است که معیار سطوح مساوی را برای سیستم پس از خطا برآورده سازد. در غیاب هر نوع منبع میرایی، روتور با دامنهٔ ثابت به نوسان ادامه می‌دهد.

اگر رفع خطا دچار تأخیر شود همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۵ «د» نشان داده شده است، سطح A_2 بالای P_m کمتر از A_1 است. هنگامی که نقطهٔ کار به e می‌رسد، انرژی جنبشی به دست آمده در حین دورهٔ شتاب‌گیری، کاملاً مصرف نشده است، در نتیجه، هنوز سرعت بزرگتر از ω_0 است و δ همچنان افزایش می‌یابد. پس از نقطهٔ e، P_e کمتر از P_m است، و دوباره زاویهٔ روتور شروع به شتاب گرفتن می‌کند. سرعت و زاویهٔ روتور آنقدر زیاد می‌شود تا در نهایت منجر به از دست

۱۳ ـ ۲ روشهای انتگرالگیری عددی [۴ – ۶]

معادلات دیفرانسیلی که باید در تحلیل پایداری سیستم قدرت حل شود، معادلات دیفرانسیل معمولی غیر خطی، با مقادیر اولیهٔ معلوم است:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, t) \qquad \text{(۱۳ ـ ۱۰ الف)}$$

که در آن، $\mathbf{x}$ بردار حالت متشکل از n متغیر مستقل و t نیز متغیر مستقل (زمان) است. هدف، این است که با مقادیر اولیهٔ $\mathbf{x}$ و t به ترتیب برابر با $\mathbf{x}_0$ و t_0، $\mathbf{x}$ را به عنوان تابعی از t به دست آوریم.

در این بخش توصیفی کلی راجع به روشهای انتگرالگیری عددیِ قابل اعمال به معادلات ۱۳ ـ ۱۰ «الف» ارائه می‌کنیم. در توضیح این روشها، بدون از دست دادن عمومیت، فرض می‌کنیم که معادلهٔ ۱۳ ـ ۱۰ «الف» یک معادلهٔ دیفرانسیل مرتبهٔ اول است. این فرض، نمایش را ساده و درک ویژگیهای خاص هر روش را برای خوانندهٔ مبتدی آسانتر می‌کند.

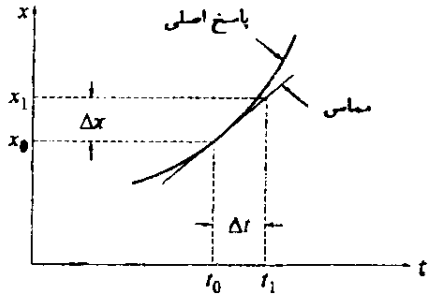
نخست روش اویلر را توضیح می‌دهیم. که با توجه به سادگی آن، مقدمهٔ خوبی برای انتگرالگیری عددی است، سپس روشهای پیشرفته‌تر را بررسی خواهیم کرد.

۱۳ ـ ۲ ـ ۱ روش اویلر[1]

معادلهٔ دیفرانسیل مرتبهٔ اول زیر را در نظر بگیرید:

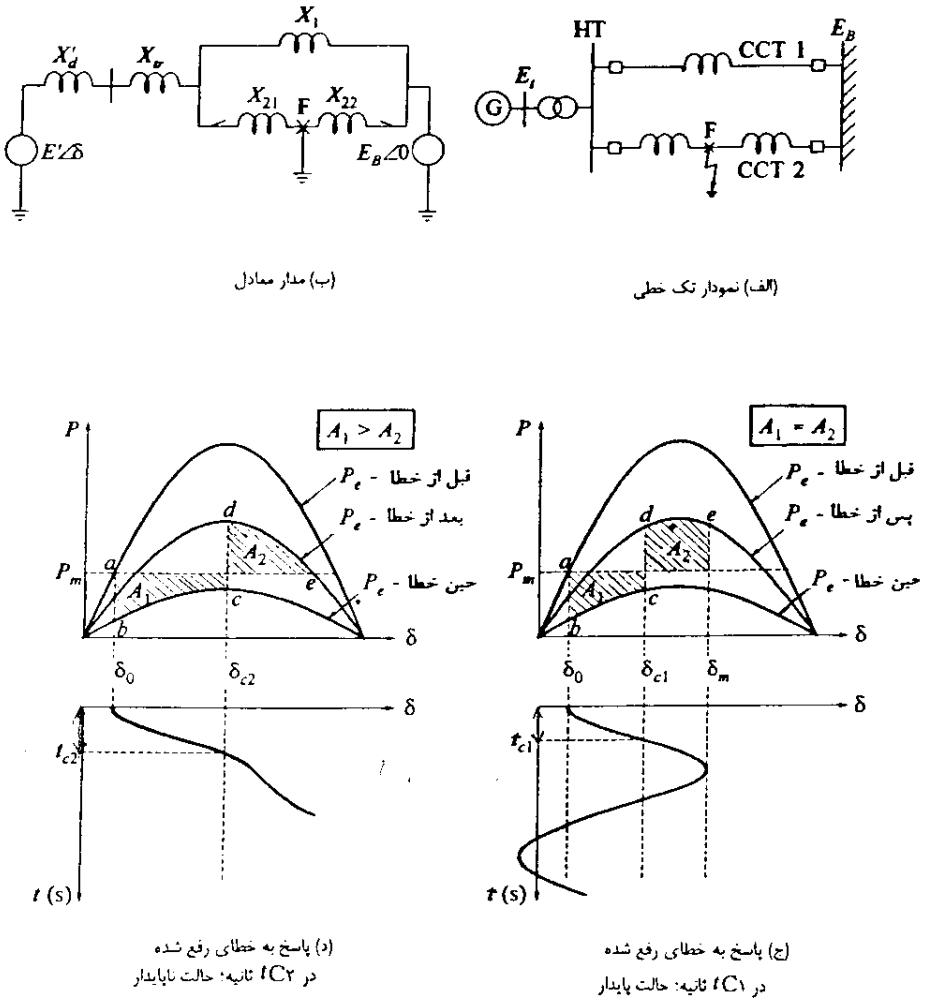
$$\frac{dx}{dt} = f(x \text{ و } t) \qquad \text{(۱۳ ـ ۱۰ ب)}$$

که در $t = t_0$، $x = x_0$ است. شکل ۱۳ ـ ۶ اساس اعمال روش اویلر را نشان می‌دهد:



شکل ۱۳ ـ ۶

1. Euler Method



(الف) نمودار تک خطی

(ب) مدار معادل

(ج) پاسخ به خطای رفع شده در t_{C1} ثانیه: حالت پایدار

(د) پاسخ به خطای رفع شده در t_{C2} ثانیه: حالت ناپایدار

شکل ۱۳ ـ ۵ نمایش پدیدهٔ پایداری گذرا

مقاومتهای استاتور ژنراتور و ترانسفورمر را نیز در نظر می‌گرفتیم، P_e مقدار کوچکی متناظر با تلفات مقاومتی می‌داشت.

مراحل بعدی نیز وارد شوند ولی موجب خطاهای با اهمیت دیگری نگردند، روش را پایدار عددی گویند. اگر از طرف دیگر، خطاهای اولیه، خطاهای بزرگِ دیگری را باعث شوند، روش را ناپایدار عددی[1] می‌گویند.

۱۳ - ۲ - ۲ روش اویلر اصلاح شدهٔ[2]

روشهای استاندارد اویلر، پاسخهای غیر دقیقی ارائه می‌دهد زیرا از مشتق در شروع بازه استفاده می‌کند و آن را به جای مشتق در سراسر بازه به کار می‌بندد. روش اویلر اصلاح شدهٔ سعی می‌کند که این مسأله را با بکارگیری میانگین مشتقات در دو سر بازه حل کند.

روش اویلر اصلاح شدهٔ، شامل مراحل ذیل است:

الف) *مرحلهٔ پیشگو*؛ در این گام با استفاده از مشتق در شروع مرحله، مقدارِ آخر مرحله، پیش‌بینی می‌شود:

$$x_1^{p} = x_0 + \left.\frac{dx}{dt}\right|_{x=x_0} . \Delta t \qquad (۱۴ - ۱۳)$$

ب) *مرحلهٔ تصحیح کننده*[3]؛ در این مرحله با استفاده از مقدار پیش‌بینی شدهٔ x_1^{p}، مقدار مشتقِ در انتهای مرحله محاسبه شده، از میانگین این مشتق و مقدار مشتقِ در ابتدای مرحله، برای پیدا کردن *مقدار* تصحیح شده استفاده می‌شود:

$$x_1^{c} = x_0 + \frac{1}{2}\left(\left.\frac{dx}{dt}\right|_{x=x_0} + \left.\frac{dx}{dt}\right|_{x=x_1^{p}}\right)\Delta t \qquad (۱۵ - ۱۳)$$

در صورت نیاز، می‌توان با استفادهٔ مجدد از $x = x_1^{c}$، مقدار دقیقترِ مشتق را در پایان مرحله به دست آورد. از این مشتق می‌توان برای محاسبهٔ مقدار دقیقترِ مشتق میانگین استفاده کرده، که خود می‌تواند برای اعمال مجدد به مرحلهٔ تصحیح کننده مورد استفاده قرار گیرد و می‌توان این فرایند را به طور تکراری تا همگراییِ مراحل متوالی با دقت مطلوب به کار برد.

روش اویلر اصلاح شده ساده‌تر از روش پیشگو - تصحیح کننده (P—C) می‌باشد. در بین روشهای شناخته شدهٔ P—C از مرتبهٔ بالاتر، می‌توان از روش آدامز - باشفورث[4]، روش میلن[5] و روش همینگ[6] نام برد [۴]. قابلیت اعمال این روشها به تحلیل پایداری سیستم قدرت، در

1. Numerically Unstable
2. Modified Euler Method
3. Correcter Step
4. Adams - Bashforth
5. Milne
6. Hamming

رفتن سنکرونیزم[1] شود.

عوامل مؤثر بر پایداری گذرا

از بحثهای قبل و با مراجعه به شکل ۱۳ ـ ۵، می‌توان نتیجه گرفت که پایداری گذرای ژنراتور به عوامل زیر وابسته است:

الف) چه مقداری ژنراتور تحت بار است؛

ب) خروجی ژنراتور در حین خطا، که خود به مکان خطا و نوع آن بستگی دارد؛

ج) زمان رفع خطا؛

د) راکتانس پس از خطای سیستم انتقال؛

ه) راکتانس ژنراتور؛ راکتانس کمتر، مقدار اوج توان را افزایش و زاویه اولیهٔ روتور را کاهش می‌دهد؛

و) لختی ژنراتور؛ هر چه لختی، بیشتر باشد، آهنگ تغییر زاویه کُندتر خواهد بود. این موضوع، انرژی جنبشی به دست آمده در حین خطا (به عبارت دیگر سطح A_1) را کاهش می‌دهد؛

ز) اندازهٔ ولتاژ داخلیِ ژنراتور (E')، که به تحریک میدان بستگی دارد؛

ح) اندازهٔ ولتاژ شین بینهایت E_B.

به منظور معرفی مفاهیم مقدماتی، سیستمی را در نظر گرفته‌ایم که ترکیب ساده‌ای داشته و با مدل ساده‌ای نمایش داده شده است. بدین ترتیب تحلیل پایداری با روش ترسیمی امکان‌پذیر است. اگرچه نمودارهای زاویهٔ روتور برحسب زمان، در شکلهای ۱۳ ـ ۴ و ۱۳ ـ ۵ نشان داده شده است، لیکن در عمل آنها را محاسبه نکرده‌ایم، و از این رو مقیاسهای زمانی بر روی این نمودارها تعریف نشده است. سیستمهای عملی قدرت ساختارهای شبکه‌ایِ پیچیده‌ای دارند و تحلیل دقیق پایداری گذرای آنها نیازمند به مدلهای تفصیلیِ واحدهای تولیدی و سایر وسایل است. *در حال حاضر، عملی‌ترین روش موجود در تحلیل پایداری گذرا، شبیه‌سازی در حوزهٔ زمان است که در آن معادلات دیفرانسیل غیر خطی با روشهای انتگرالگیری عددی، گام به گام حل می‌شوند.* در بخش بعد برخی از روشهای متداول انتگرالگیری عددی توضیح داده می‌شود.

1. Loss of Synchronism

روش R−K مرتبهٔ چهارم

در این روش، فرمول عمومیِ مقدار x در (n + ۱) اُمین گام عبارت است از:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \qquad (۱۶ - ۱۳)$$

که برای آن داریم:

$$k_1 = f(x_n, t_n)\Delta t$$

$$k_2 = f(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2})\Delta t$$

$$k_3 = f(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2})\Delta t$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t)\Delta t$$

تعبیر فیزیکی حل بالا به صورت زیر است:

$\Delta t = k_1$ (شیب در آغاز گام زمانی)؛

$\Delta t = k_2$ (اولین تقریب شیب در گام میانی)؛

$\Delta t = k_3$ (دومین تقریب شیب در گام میانی)؛

$\Delta t = k_4$ (شیب در پایان گام)؛

$\Delta x = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$.

بنابراین Δx مقدار نمو x، برحسب *میانگینِ وزندارِ* تخمینها براساس مقدارهای شیب در آغاز، نقطهٔ میانی و نهاییِ گام زمانی است. این روش معادل در نظر گرفتن چهار جملهٔ مشتق در بسط سری تیلور است و خطایی از مرتبه Δt^5 دارد.

صورت گیلِ روش R−K مرتبهٔ چهارم (R−K−G)

با در نظر گرفتن x_0 به عنوان مقدار اولیه در آغاز یک گام و با بکارگیری ۱ ، ۲ ، ۳ ، ۴ = j برای نشان دادن چهار مرحله، هر مرحله از روش گیل را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$\begin{aligned} k_j &= a_j [f(x_{j-1}, t) - b_j q_{j-1}] \\ x_j &= x_{j-1} + k_j \Delta t \\ q_j &= q_{j-1} + 3k_j - c_j f(x_{j-1}, t) \end{aligned} \qquad (۱۷ - ۱۳)$$

در نقطهٔ (t_0 و x_0) می‌توان منحنیِ نشان‌دهندهٔ پاسخ اصلی را با مماس آن با شیب زیر تقریب زد:

$$\left.\frac{dx}{dt}\right|_{x=x_0} = f(x_0, t_0)$$

پس:

$$\Delta x = \left.\frac{dx}{dt}\right|_{x=x_0} . \Delta t$$

مقدار x در $t = t_1 = t_0 + \Delta t$ به صورت زیر داده می‌شود:

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \left.\frac{dx}{dt}\right|_{x=x_0} . \Delta t \qquad (۱۱ - ۱۳)$$

در واقع روش اویلر معادل با استفاده از دو جملهٔ اول بسط سری تیلورِ[1] x حول نقطهٔ (x_0 , t_0) است:

$$x_1 = x_0 + \Delta t(\dot{x}_0) + \frac{\Delta t^2}{2!}(\ddot{x}_0) + \frac{\Delta t^3}{3!}(\dddot{x}_0) + \ldots \qquad (۱۲ - ۱۳)$$

پس از استفاده از روش اویلر برای تعیین $x = x_1$ متناظر با $t = t_1$، می‌توان مرحلهٔ زمانی کوتاه دیگری مانند Δt را اختیار و x_2 متناظر با $t_2 = t_1 + \Delta t$ را به صورت زیر تعیین کرد:

$$x_2 = x_1 + \left.\frac{dx}{dt}\right|_{x=x_1} . \Delta t \qquad (۱۳ - ۱۳)$$

با اعمال متوالی این روش، می‌توان مقادیر x را متناظر با مقادیر مختلف زمان t تعیین کرد.

این روش فقط از اولین مشتق x استفاده می‌کند، و بدین لحاظ آن را روش *مرتبه اول* می‌نامند. برای داشتن دقت کافی در هر مرحله، باید Δt کوچک باشد. این موضوع، خطاهای گرد کردن[2] را افزایش داده، بار محاسباتی لازم را بسیار زیاد خواهد کرد.

در به کارگیری روشهای انتگرالگیری عددی، بسیار مهم است که مسألهٔ *انتشار خطا*[3] را در نظر بگیریم، زیرا ممکن است موجب شود خطاهای کوچکی که در مراحل اول فرایند به وجود آمده، در مراحل بعدی بزرگ شوند. *پایداری عددی*[4] به انتشار خطا بستگی دارد. اگر خطاهای اولیه در

1. Taylor Series 2. Round - off Errors
3. Propagation of Error 4. Numerical Stability

۱۳ - ۲ - ۴ پایداری عددی روشهای انتگرالگیری صریح

روشهای عددی توضیح داده شده در بخشهای ۱۳-۲-۱ تا ۱۳-۲-۳ (یعنی روشهای اویلر، پیشگو - تصحیح کننده، و R−K) را *روشهای صریح*[1] می‌نامند. در این روشها، مقدار متغیر وابستهٔ **x** در مرحلهٔ زمانیِ t به کمک اطلاعاتِ مقادیرِ **x** از مراحل زمانی قبلی، محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، $\mathbf{x}_{n+1}$ در $(n+1)$اُمین مرحله به طور صریح با محاسبهٔ $f(\mathbf{x},t)$ با **x** معلوم محاسبه می‌شود. این روشها برای حل یک مجموعهٔ پیچیده از معادلات حالت سیستم، بسادگی قابل کاربرد هستند.

یکی از محدودیتهای مهم روشهای پایداریِ صریح آن است که این روشها، از نظر عددی پایدار - A[2] نیستند [۶]. در نتیجه، طول گام زمانی انتگرالگیری توسط ثابتهای زمانی کوچکِ سیستم، محدود می‌شود.

پایداریِ عددی، به سختی[3] مجموعه معادلات دیفرانسیل نشان‌دهندهٔ سیستم ارتباط دارد. سختی نیز به گستره ثابتهای زمانی در مدل سیستم، مرتبط است. سختی، با نسبت بزرگترین به کوچکترین ثابت زمانی، یا به طور دقیقتر با نسبت بزرگترین به کوچکترین مقدار ویژهٔ سیستم خطی شده، اندازه‌گیری می‌شود. سختی در شبیه‌سازی پایداری گذرا با جزئیات مدلسازی، افزایش می‌یابد. ممکن است در سیستم کلی، همهٔ ثابتهای زمانی به آسانی ظاهر نشوند. از این رو احتمال دارد سختی پوشیده باشد و فقط می‌توان آن را با محاسبهٔ مقادیر ویژهٔ سیستم خطی شده، نشان داد.

روشهای انتگرالگیری صریح از نظر عددی، پایداری ضعیفی دارند؛ در سیستمهای سخت[4]، در صورتی که گامهای زمانی کوچک نباشد، پاسخ بیکران خواهد شد که آن را اصطلاحاً «ترکیدن»[5] می‌نامند. حتی پس از بین رفتن مُدهای سریع، باز لازم است برای حفظ پایداری از گامهای زمانی کوچکی استفاده کرد.

۱۳ - ۲ - ۵ روشهای انتگرال‌گیری ضمنی

معادلهٔ دیفرانسیل زیر را در نظر بگیرید:

$$\frac{dx}{dt} = f(x,t)$$

که در $t = t_0$، $x = x_0$ است.

1. Explicit Methods
2. A - Stable
3. Stiffness
4. Stiff System
5. Blow up

مرجع ۷ مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که در عمل دارای محدودیتهایی هستند. این روشها خود ـ آغازکننده نیستند، به حافظهٔ کامپیوتری بیشتری نیازمندند و نسبت به روشهای رانگ کوتا، که در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد به گامهای زمانی کوچکتری نیاز دارند.

۱۳ ـ ۲ ـ ۳ روشهای رانگ ـ کوتا (R−K) [۴ و ۵]

روشهای R−K پاسخ سری تیلور را تقریب می‌زنند. لیکن، برخلاف پاسخ سری تیلور معمولی، روشهای R−K به تعیین صریح مشتقاتِ بالاتر از مرتبهٔ اول نیازی ندارند. در این روش، مشتقات مرتبهٔ بالاتر با چند بار استفاده از اولین مشتق، در نظر گرفته می‌شوند. بسته به تعداد جملاتی که به طور مؤثر در سری تیلور، نگه داشته می‌شود، روشهای R−K از مرتبه‌های مختلفی را خواهیم داشت.

روش R−K مرتبهٔ دوم

با مراجعه به معادلهٔ دیفرانسیل ۱۳ ـ ۱۰ «ب»، فرمول R−K مرتبهٔ دوم، برای مقدار x در $t = t_0 + \Delta t$ به شکل زیر در می‌آید:

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \frac{k_1 + k_2}{2}$$

که در آن:

$$k_1 = f(x_0, t_0)\Delta t$$
$$k_2 = f(x_0 + k_1, t_0 + \Delta t)\Delta t$$

این روش معادل با در نظر گرفتن اولین و دومین عبارات مشتق در سری تیلور است و خطا از مرتبه Δt^3 است.

فرمول عمومی که مقدار x را در گام $(n+1)$اُم می‌دهد به شکل ذیل است:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k_1 + k_2}{2}$$

که در آن داریم:

$$k_1 = f(x_n, t_n)\Delta t$$
$$k_2 = f(x_n + k_1, t_n + \Delta t)\Delta t$$

است که متغیر x به صورت تابعی از مقدار خودش در گام زمانی قبل و همچنین مقدار جاری (که نامعلوم است) محاسبه شود. بنابراین باید معادله‌ای ضمنی حل گردد.

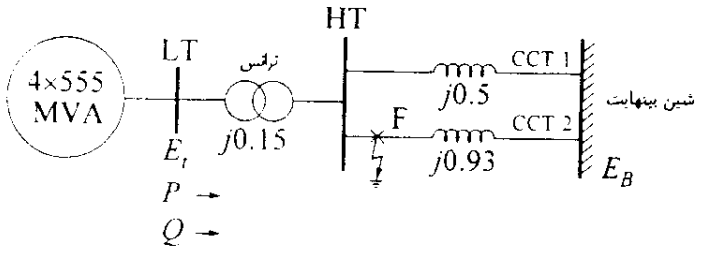
قاعدهٔ ذوزنقه‌ای پایدار ـ A عددی است [۶]. سختیِ سیستم مورد بررسی، بر دقت و نه پایداری عددی اثر می‌گذارد. با گامهای زمانی بزرگتر، مُدهای فرکانس بالا و گذراهای سریع، فیلتر می‌شوند، و پاسخهای مربوط به مُدهای کُندتر، دقیق می‌شوند. در سیستمهایی که در شبیه‌سازی آنها، گامهای زمانی به واسطهٔ ملاحظات پایداری عددی و نه ملاحظات مربوط به‌دقت محدود می‌شود، معمولاً روشهای ضمنی از روشهای صریح مناسبتر است.

قاعدهٔ ذوزنقه‌ای یک روش مرتبهٔ دوم است. روشهای دیگر انتگرالگیری ضمنی با مرتبه‌های بالاتر، در مراجع روشهای عددی پیشنهاد شده است. لیکن، از این روشها به طور وسیع در کاربردهای سیستم قدرت استفاده نشده است زیرا از نظر برنامه‌ریزی مشکلتر بوده، نسبت به قاعدهٔ ذوزنقه‌ای پایداری عددی کمتری دارند.

در توصیف بالا از روشهای انتگرالگیری عدد مختلف، برای سادگی یک معادلهٔ دیفرانسیل مرتبه اول را در نظر گرفته‌ایم. هنگامی که از این روشها در تحلیل پایداری سیستم قدرت استفاده می‌شود، معادلات سیستم را به صورت مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل مرتبهٔ اول مرتب می‌کنند. نرخ تغییر هر متغیرِ حالت، به سایر متغیرهای حالت بستگی دارد و تابع صریحی از زمان نیست. مثال زیر به عنوان نمونه‌ای ساده از کاربرد انتگرالگیری عددی و همچنین معیار سطوح مساوی در تحلیل پایداری گذرا به‌کار گرفته می‌شود.

مثال ۱۳ ـ ۱

در این مثال، پایداری گذرای یک نیروگاه تولید بخار را بررسی می‌کنیم که متشکل از چهار واحد ۵۵۵ MVA، ۲۴ KV، ۶۰ Hz است و توان تولیدی از طریق دو مدار انتقال به یک شین بینهایت منتقل می‌شود (شکل ۱۳ ـ ۱ م) این سیستم همان سیستمی است که در مثال ۱۲ ـ ۲ درنظر گرفتیم.



شکل ۱۳ ـ ۱ م

مقادیر ضرایب a، b و c عبارت است از:

$$a_1 = \frac{1}{2}\ ,\ b_1 = 2\ ,\ c_1 = a_1\ ;\ a_2 = 1-\sqrt{0/5}\ ,\ b_2 = 1\ ,\ c_2 = a_2$$

$$a_3 = 1+\sqrt{0/5}\ ,\ b_3 = 1\ ,\ c_3 = a_3\ ;\ a_4 = \frac{1}{6}\ ,\ b_4 = 2\ ,\ c_4 = \frac{1}{2}$$

پاسخ در آخر هر گام زمانی با x_4 داده می‌شود. در آغاز $q_0 = 0$ است بنابراین در جلو بردن پاسخ، q_0 در گام بعدی برابر با q_4 در گام قبلی است.

در زیر مزایای صورت گیلِ روش R—K آورده شده است:

الف) خطاهای گرد کردن، حداقل شده است (متغیر q برای این هدف به کار گرفته می‌شود).

ب) نیازهای حافظه‌ای کمتر از روش R—Kی اصلی است.

اگر ناپیوستگی و یا تغییرات ناگهانی در آهنگ تغییر متغیرها وجود داشته باشد، باید در اعمال روش R—K—G دقت کافی مبذول داشت. در هر گام زمانی، نباید متغیر به واسطهٔ عناصر غیر خطیِ تیز محدود شود زیرا در این صورت متغیر q مقادیر نادرستی اختیار می‌کند.

فرمول ریچاردسون[1] در بررسی دقت

می‌توان دقت نتایج حاصل از روشهای عددی انتگرالگیری مذکور در قسمتهای قبل را با فرمول ریچاردسون مورد بررسی قرار داد. این فرمول خطای برشیِ جمع شده راکه در طول انتگرالگیری *انتشار یافته*، به دست می‌دهد. تفاضل بین مقدار واقعیِ یک متغیر و مقدار حاصل از روش رانگ ـکوتای مرتبهٔ چهارم (با به کارگیری طول گامِ Δt)، با معادلهٔ زیر داده می‌شود:

$$x(\text{واقعی}) - x(\Delta t) = \frac{x(\Delta t) - x(2\Delta t)}{15} \qquad (۱۸ - ۱۳)$$

که در آن:

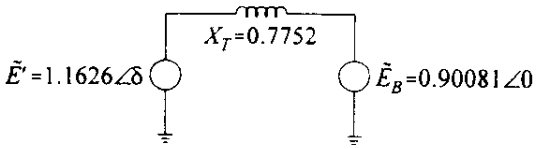
x (واقعی) = مقدار واقعی x؛

$x(\Delta t)$ = مقدار محاسبه شده با طول گام Δt؛

و $x(2\Delta t)$ = مقدار محاسبه شده با طول گام $2\Delta t$ است.

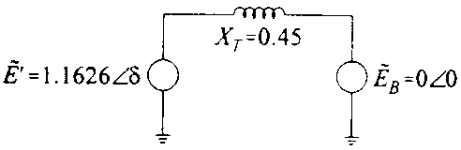
1. Richardson's Formula

شکل ۱۳ ـ ۳ م مدارهای معادل کاهش یافته را در سه وضعیت سیستم نشان می‌دهد:
الف) قبل از خطا، ب) حین خطا، و ج) پس از خطا. همچنین عبارات متناظر برای توان الکتریکی خروجی به صورت تابعی از δ در شکل نشان داده شده‌اند.



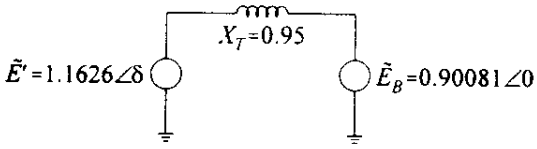
$$P_e = \frac{1.1626\times0.90081}{0.7752}\sin\delta = 1.351\sin\delta$$

(الف) قبل از خطا



$$P_e = 0$$

(ب) حین خطا



$$P_e = \frac{1.1626\times0.90081}{0.95}\sin\delta = 1.1024\sin\delta$$

(ج) پس از خطا

شکل ۱۳ ـ ۳ م مدارهای معادل کاهش یافته و معادلات توان خروجی

الف) پاسخ زمانی با استفاده از انتگرالگیری عددی. معادلهٔ ۱۳ ـ ۳ را می‌توان برحسب دو معادلهٔ مرتبه اول زیر نوشت:

$$P(\Delta\omega_r) = \frac{1}{2H}(P_m - P_{max}\sin\delta)$$

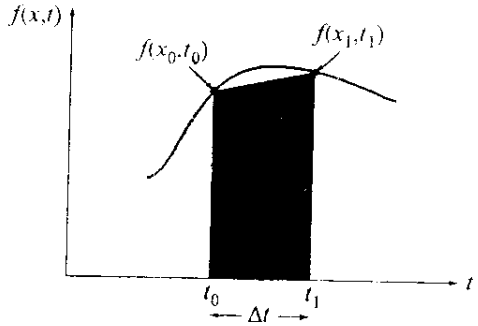
$$= \frac{1}{7/0}(0/9 - P_{max}\sin\delta) \qquad (۱۳ ـ ۱ م)$$

پاسخ x را در $t = t_1 = t_0 + \Delta t$ می‌توان به صورت انتگرال زیر بیان کرد:

$$x_1 = x_0 + \int_{t_0}^{t_1} f(x, \tau)\, d\tau \qquad (۱۹ - ۱۳)$$

روشهای انتگرالگیری صریح از توابع درونیابی[1] برای عبارت زیر انتگرال استفاده می‌کنند. درونیابی ایجاب می‌کند که توابع در زمان t_1، از نقاطی که هنوز نامعلومند عبور کنند.

ساده‌ترین روش انتگرالگیری ضمنی[2]، *قاعدهٔ ذوزنقه‌ای*[3] است. این روش از درونیابی خطی استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۷ نشان داده شده است. سطح زیر انتگرالِ معادلهٔ ۱۳ ـ ۱۹ با ذوزنقه‌هایی تقریب زده می‌شود، از این رو آن را قاعدهٔ ذوزنقه‌ای نامیده‌اند.



شکل ۱۳ ـ ۷

قاعدهٔ ذوزنقه‌ای برای معادلهٔ ۱۳ ـ ۱۹ به صورت زیر داده می‌شود:

$$x_1 = x_0 + \frac{\Delta t}{2}\left[f(x_0, t_0) + f(x_1, t_1)\right] \qquad (۲۰ - ۱۳)$$

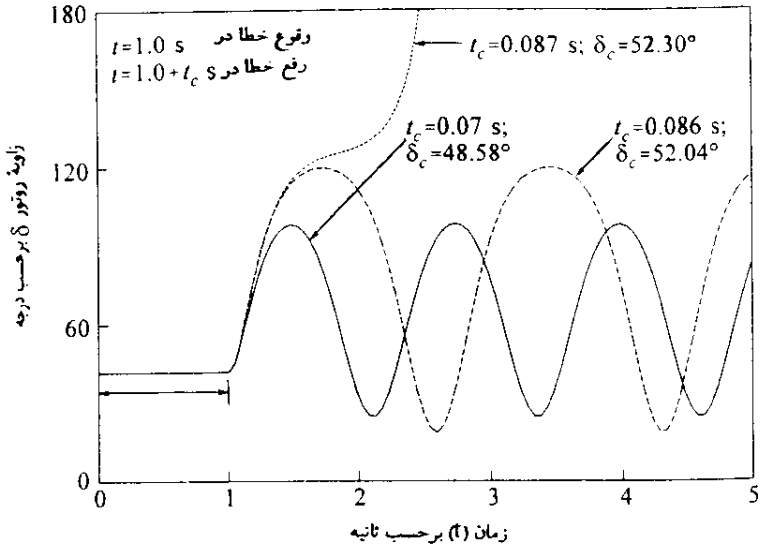
فرمول عمومیِ مقدار x در $t = t_{n+1}$ عبارت است از:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{\Delta t}{2}\left[f(x_n, t_n) + f(x_{n+1}, t_{n+1})\right] \qquad (۲۱ - ۱۳)$$

مشاهده می‌کنیم که x_{n+1} در هر دو طرف معادلهٔ ۱۳ ـ ۲۱ ظاهر می‌شود. این موضوع، مستلزم آن

1. Interpolation 2. Implicit 3. Trapezoidal Rule

از: °۴۸/۵۸، °۵۲/۰۴ و °۵۲/۳۰. این نتایج با استفاده از گام زمانی (Δt) ۰/۰۵ ثانیه در طول پاسخ محاسبه شده است. لیکن، گام زمانی نزدیک زمان رفع خطا چنان اصلاح شد تا لحظهٔ دقیق کلیدزنی را بدهد.



شکل ۱۳ ـ ۴ م پاسخ زاویهٔ روتور برای مقادیر مختلف زمانِ رفع خطا

از نتایج، مشاهده می‌کنیم که سیستم با (ثانیه) ۰/۰۸۶ = t_c (°۵۲/۰۴ = δ_c) پایدار، و با (ثانیه) ۰/۰۸۷ = t_c (°۵۲/۳۰ = δ_c) ناپایدار است. بنابراین زمان بحرانی رفع خطا برابر با (ثانیه) ۰/۰۰۰۵ ± ۰/۰۸۶۵، و زاویهٔ بحرانی رفع خطا برابر با °۰/۱۳ ± °۵۲/۱۷ است.

ب) معیار سطوح مساوی. نمودارهای توان ـ زاویه برای سه وضعیت شبکه در شکل ۱۳ ـ ۵ م نشان داده شده است. برای حالت پایدار بحرانی، مقدار حداکثر نوسان δ به صورت زیر داده می‌شود:

$$1/1024\sin\delta_m = 0/9 \qquad \text{از اینرو،} \quad \delta_m = 135/27^\circ$$

از شکل ۱۳ ـ ۵ م برای حالت بحرانی رفع خطا داریم:

$$A_1 = A_2$$

یا:

$$A_1 + A_c = A_2 + A_c$$

راکتانسهای شبکه نشان داده شده در شکل، در مبنای واحد بر پایهٔ ۲۲۲۰ MVA ، ۲۴ KV (ارجاع شده به طرف فشار ضعیف ترانسفورمر بالا برنده هستند). مقاومتها قابل صرفنظر فرض شده‌اند.

نقطهٔ کار اولیهٔ سیستم، با کمیتهای بیان شده در مبنای واحد بر پایهٔ ۲۲۲۰ MVA و ۲۴ KV ، به‌صورت زیر است:

$$p = ۰/۹ \quad Q = ۰/۴۳۶ \text{ (فوق تحریک)} \quad \tilde{E}_t = ۱/۰ \angle ۲۸/۳۴^\circ \quad \tilde{E}_B = ۰/۹۰۰۸۱ \angle ۰$$

ژنراتورها به صورت یک ژنراتور معادل منفرد، نشان داده شده با مدل کلاسیک و با پارامترهای زیر، مدلسازی شده‌اند:

$$X'_d = ۰/۳ \quad H = ۳/۵ \text{ MW. s/MVA} \quad K_D = ۰$$

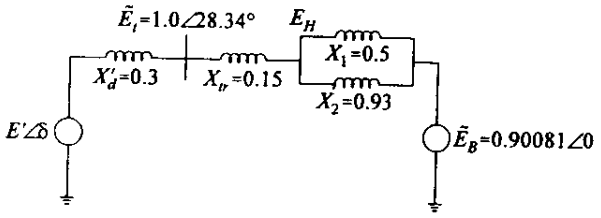
مدار ۲ دچار یک خطای سه فاز صلب در نقطهٔ F می‌شود که با جداسازی مدار رفع می‌گردد.

الف) با استفاده از انتگرالگیری عددی و با محاسبهٔ پاسخ زمانی زاویهٔ روتور زمان بحرانی رفع خطا و زاویهٔ بحرانی رفع خطا را تعیین کنید.

ب) صحت مقدار زاویهٔ بحرانی رفع خطای حاصل را، با معیار سطوح مساوی تأیید کنید.

حل

با نمایش ژنراتور توسط مدل کلاسیک، مدار معادل سیستم به صورت نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۲ م است:

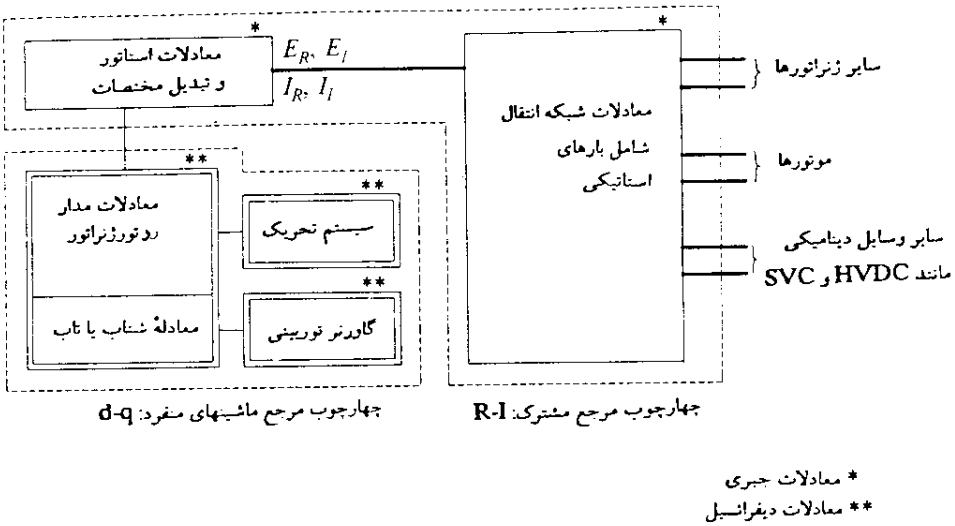


شکل ۱۳ ـ ۲ م مدار معادل

برای نقطهٔ کار اولیه، ولتاژ متصل به X'_d برابر است با:

$$\begin{aligned}\tilde{E}' &= \tilde{E}_t + jX'_d\tilde{I}_t \\ &= ۱/۰ \angle ۲۸/۳۴^\circ + \frac{j\,۰/۳\,(۰/۹ - j\,۰/۴۳۶)}{۱/۰ \angle -۲۸/۳۴^\circ} \\ &= ۱/۱۶۲۶ \angle ۴۱/۷۷^\circ\end{aligned}$$

شکل ۱۳ ـ ۸ ساختار کلی مدل سیستم قدرت را برای بکارگیری در تحلیل پایداری گذرا، نشان می‌دهد. این ساختار همانند ساختاری است که در فصل ۱۲ (شکل ۱۲ ـ ۱۸) برای تحلیل پایداری سیگنال کوچک معرفی شد. لیکن، برای تحلیل پایداری گذرا، معادلات غیرخطی سیستم حل می‌شود. علاوه بر آن، ناپیوستگیهای بزرگ ناشی از خطاها و کلیدزنیهای شبکه و ناپیوستگیهای کوچک ناشی از حدود روی متغیرهای سیستم، در مدل سیستم ظاهر می‌شود. ولتاژ شینها، توانهای انتقالی خطوط، و عملکرد سیستم حفاظتی، علاوه بر اطلاعات اساسی در خصوص پایداری سیستم، مورد توجه هستند.



شکل ۱۳ ـ ۸ ساختار مدل کامل سیستم قدرت در تحلیل پایداری گذرا

همچنان که در شکل ۱۳ ـ ۸ مشاهده می‌شود، نمایش کلی سیستم قدرت، شامل مدلهایی برای عناصر منفرد زیر است:

- ژنراتورهای سنکرون، و سیستمهای مربوط به تحریک و محرکه‌ها (توربینها)؛
- شبکهٔ انتقال به هم پیوسته، شامل بارهای استاتیکی،
- بارهای موتور القایی و سنکرون.
- سایر وسایل از قبیل کنورتورهای HVDC و SVC ها.

$$P(\delta) = \omega_{\circ}\,\Delta\omega_r$$
$$= ۳۷۷\,\Delta\omega_r \qquad (۱۳ - ۲\ م)$$

که در آن:

$$P_{max} = \begin{cases} ۱/۳۵۱ & \text{پیش از خطا} \\ \circ & \text{حین خطا} \\ ۱/۱۰۲۴ & \text{پس از خطا} \end{cases}$$

مقادیر اولیهٔ δ و $\Delta\omega_r$ به ترتیب عبارت است از: $۴۱/۷۷^{\circ}$ و صفر در مبنای واحد.

می‌توان از هر یک از روشهای انتگرالگیری عددی بخش ۱۳ ـ ۲ برای حل معادلات ۱۳ ـ ۱ م و ۱۳ ـ ۲ م استفاده کرد. به منظور نمایش، روش مرتبه دوم R-K را درنظر می‌گیریم: فرمولهای عمومی که مقادیر $\Delta\omega_r$، δ و t را برای $(n+۱)$ اُمین گامِ انتگرالگیری به دست می‌دهند، عبارتند از:

$$(\Delta\omega_r)_{n+۱} = (\Delta\omega_r)_n + \frac{K'_۱ + K'_۲}{۲}$$

$$\delta_{n+۱} = \delta_n + \frac{K''_۱ + K''_۲}{۲}$$

$$t_{n+۱} = t_n + \Delta t$$

که در آن:

$$K'_۱ = \left[\circ/۱۲۸۶ - \frac{P_{max}}{۷/\circ} \sin(\delta)_n \right] \Delta t$$

$$K''_۱ = [\,۳۷۷\,(\Delta\omega_r)_n\,]\,\Delta t$$

$$K'_۲ = \left[\circ/۱۲۸۶ - \frac{P_{max}}{۷/\circ} \sin(\delta_n + K''_۱) \right] \Delta t$$

$$K''_۲ = \{\,۳۷۷\,[\,(\Delta\omega_r)_n + K'_۱\,]\,\}\,\Delta t$$

شکل ۱۳ ـ ۴ م نمودارهای δ را به صورت تابعی از زمان در سه زمان رفع خطا (t_c): ۰/۰۷، ۰/۰۸۶ و ۰/۰۸۷ ثانیه، نشان می‌دهد. مقادیر متناظر زاویهٔ رفع خطا (δ_c) به ترتیب عبارت است:

معادلات حرکت

$$p\,\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}\left(T_m - T_e - K_D\,\Delta\omega_r\right) \qquad (۲۲ - ۱۳)$$
$$p\,\delta = \omega_0\,\Delta\omega_r$$

که در آن:

$\omega_0 = 2\pi f_0$ رادیان الکتریکی بر ثانیه؛

$\Delta\omega_r$ = انحراف سرعت روتور در مبنای واحد؛

و p = عملگر مشتق d/dt است.

معادلات مدار روتور

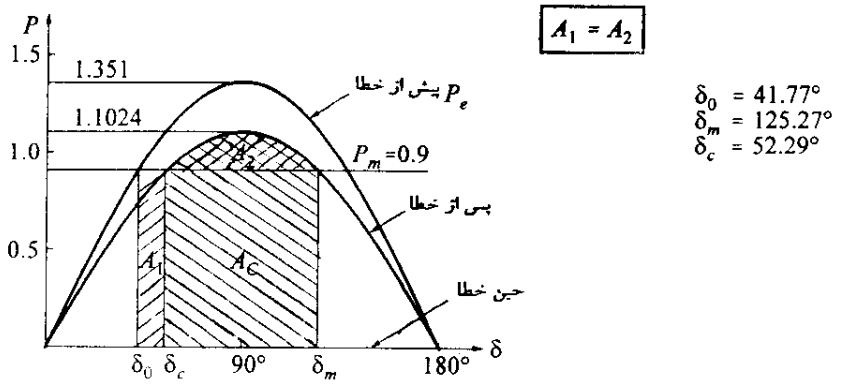
با توصیف جریانهای روتور برحسب شاردورهای متقابل روتور (معادلهٔ ۱۲ ـ ۱۵۹ در فصل ۱۲ را ببینید)، معادلات دینامیکی مدار روتور عبارت است از:

$$p\,\psi_{fd} = \omega_0\left[e_{fd} + \frac{(\psi_{ad} - \psi_{fd})R_{fd}}{L_{fd}}\right]$$
$$p\,\psi_{1d} = \omega_0\left[\frac{\psi_{ad} - \psi_{1d}}{L_{1d}}\right]R_{1d}$$
$$p\,\psi_{1q} = \omega_0\left[\frac{\psi_{aq} - \psi_{1q}}{L_{1q}}\right]R_{1q} \qquad (۲۳ - ۱۳)$$
$$p\,\psi_{2q} = \omega_0\left[\frac{\psi_{aq} - \psi_{2q}}{L_{2q}}\right]R_{2q}$$

شار دورهای متقابل محور d و q با معادلات زیر داده می‌شود:

$$\psi_{ad} = -L_{ads}\,i_d + L_{ads}\,i_{fd} + L_{ads}\,i_{1d}$$
$$= L''_{ads}\left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}}\right) \qquad (۲۴ - ۱۳)$$
$$\psi_{aq} = L''_{aqs}\left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}}\right) \qquad (۲۵ - ۱۳)$$

$1.1024 \sin\delta_m = 0.9$ hence, $\delta_m = 125.27°$



شکل ۱۳ ـ ۵ م نمودار توان ـ زاویه

بنابراین باتوجه به نمودار، نتیجه می‌شود:

$$۰/۹\,(۱۲۵/۲۷ - ۴۱/۷۷)\frac{\pi}{۱۸۰} = \int_{\delta_c}^{۱۲۵/۲۷} ۱/۱۰۲۴ \sin\delta \, d\delta$$

$$۱/۳۱۱۶ = ۱/۱۰۲۴\,(\cos\delta_c + ۰/۵۷۸۱)$$

از این‌رو زاویهٔ بحرانی رفع خطا عبارت است از:

$$\delta_c = ۵۲/۲۹°$$

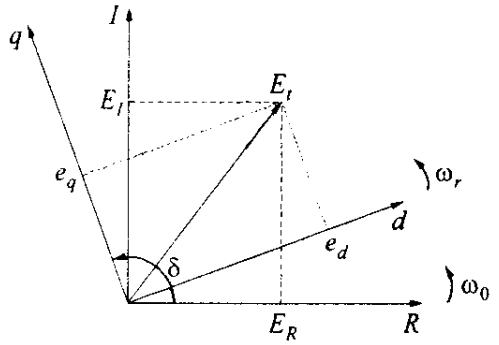
که این زاویه با مقدار تعیین شده از پاسخهای زمانی، مطابقت دارد.

۱۳ ـ ۳ شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سیستم قدرت

۱۳ ـ ۳ ـ ۱ ساختار مدل سیستم قدرت

تحلیل پایداری‌گذاری سیستمهای قدرت، شامل محاسبهٔ پاسخ دینامیکی غیرخطی آنها به اغتشاشهای بزرگ می‌باشد، این اغتشاشها، معمولاً به شکل بروز خطای شبکهٔ انتقال، و به دنبال آن جداسازی عنصر تحت خطا با رله‌های حفاظتی می‌باشد.

$\bar{\omega} = \omega/\omega_0 = 1/0$ است. درنتیجه داریم، $\bar{\omega} L''_d = X''_d$ و $\bar{\omega} L''_q = X''_q$. معادلات بالا در چارچوب مرجع d-q ی هر ماشین منفردی است که با روتور ماشین می‌چرخد. برای به دست آوردن پاسخ معادلات شبکهٔ انتقال به هم پیوسته، از یک مرجع R-I ی مشترک دوار با سرعت سنکرون، استفاده می‌شود. علاوه بر این، از روابط نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۱۰ برای تبدیل متغیرها از یک چارچوب مرجع به چارچوب دیگر، استفاده می‌شود. همچنین محور R چارچوب مرجع مشترک به عنوان مرجعِ اندازه‌گیری زاویهٔ روتور δ هر ماشین به کار گرفته می‌شود.



$$\begin{aligned} e_d &= E_R \sin\delta - E_I \cos\delta \\ e_q &= E_I \sin\delta + E_R \cos\delta \\ E_R &= e_d \sin\delta + e_q \cos\delta \\ E_I &= e_q \sin\delta - e_d \cos\delta \end{aligned} \qquad (۳۱ - ۱۳)$$

شکل ۱۳ ـ ۱۰ تبدیل چارچوب مرجع و تعریف زاویهٔ روتور δ

برای سهولت در دسته‌بندی مجموعهٔ کامل معادلات جبری، مطابق شکل ۱۳ ـ ۸ معادلات ولتاژ استاتور در چارچوب مرجع R-I ی مشترک بیان می‌شود. از بکارگیری معادلهٔ ۱۳ ـ ۳۱ برای تبدیل معادلات ولتاژ استاتور (معادلات ۱۳ ـ ۲۸) نتیجه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} E_R \\ E_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_{RR} & X_{RI} \\ -X_{IR} & -R_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_R \\ I_I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E''_R \\ E''_I \end{pmatrix} \qquad (۳۲ - ۱۳)$$

که عناصر ماتریس امپدانس به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{aligned} R_{RR} &= (X''_d - X''_q)\sin\delta\cos\delta + R_a \\ R_{II} &= (X''_q - X''_d)\sin\delta\cos\delta + R_a \\ X_{RI} &= X''_d \cos^2\delta + X''_q \sin^2\delta \\ X_{IR} &= X''_d \sin^2\delta + X''_q \cos^2\delta \end{aligned} \qquad (۳۳ - ۱۳)$$

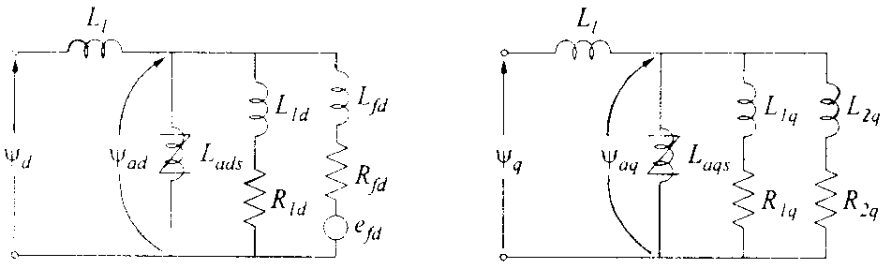
باید مدل استفاده شده برای هر عنصر برای تحلیل پایداری گذرا، مناسب باشد و باید معادلات سیستم را به شکل مناسبی برای اعمال روشهای عددی، دسته‌بندی کرد.

همان‌طور که در بخش بعد خواهیم دید، مدل کامل سیستم شامل دسته‌ای از معادلات دیفرانسیل معمولی و معادلات بزرگ جبری پراکنده است. از این‌رو تحلیل پایداری گذرا، یک مسألهٔ جبری ـ دیفرانسیلی با مقدار اولیه است.

۱۳ ـ ۳ ـ ۲ نمایش ماشین سنکرون

مدلسازی ماشین سنکرون در فصلهای سوم تا پنجم ارائه شد. معادلات در مبنای واحد ماشین سنکرون در بخش ۳ ـ ۴ ـ ۹ خلاصه شده است و اصلاحات لازم بر روی این معادلات به منظور نمایش در مطالعات پایداری، در بخش ۵ ـ ۱ مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور به کارگیری مدل ژنراتور در تحلیل پایداری گذرا، فرض می‌کنیم که ژنراتور به کمک مدلی با یک سیم‌پیچ میراکننده در محور d و دو سیم‌پیچ میراکننده در محور q، مطابق شکل ۱۳ ـ ۹، نمایش داده شده است؛ اگرچه می‌توان معادلات نشان داده شده در اینجا را بسادگی برای در نظر گرفتن مدلی با تعداد دلخواه از سیم‌پیچهای میراکننده اصلاح کرد.



شکل ۱۳ ـ ۹ مدارهای معادل ماشین سنکرون

در زیر خلاصه‌ای از معادلات ماشین سنکرون، به صورت مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول، با زمان t برحسب ثانیه، زاویهٔ روتور δ برحسب رادیان الکتریکی، و سایر کمیتها در مبنای واحد آورده شده است.

از آنجا که در معادلات ولتاژ استاتور فرض کرده‌ایم pu ۱/۰ = ω_m/ω_0 = ω_r است، لذا گشتاور فاصلهٔ هوایی در مبنای واحد برابر با توان فاصلهٔ هوایی (فصل ۵، بخش ۵-۱-۲ را ببینید) است. از این‌رو:

$$T_e = P_e = P_t + R_a I_t^2 \qquad (۳۷ - ۱۳ \text{ ب})$$

جریان تحریک در سیستم مبنای واحد متقابل به صورت زیر داده می‌شود:

$$i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{ad}}{L_{fd}} \qquad (۳۸ - ۱۳)$$

جریان مبنای واحد خروجی تحریک‌کننده I_{fd} (فصل ۸، بخش ۸ - ۶ را ببینید) عبارت است از:

$$I_{fd} = L_{adu}\, i_{fd} \qquad (۳۹ - ۱۳)$$

در اینجا مدل ژنراتوری را با یک مدار سیم‌پیچ میراکنندهٔ محور d و دو مدار سیم‌پیچ میراکنندهٔ محور q درنظر گرفته‌ایم. برای مدلهای با تعداد متفاوت از مدارهای روتور، تغییرات فرمولبندی معادلات ماشین بسیار سرراست می‌باشد. لیکن ما اندوکتانسهای متقابل بین مدارهای آرمیچر و روتور در هر محور را مساوی فرض کرده‌ایم. مرجع ۸ با استفاده از روش کلی بالا توصیفی از کاربرد مدلی با تعداد نابرابر اندوکتانسهای متقابل را ارائه می‌کند.

مقادیر اولیهٔ متغیرهای ژنراتور. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، تحلیل پایداری گذرا، حل مجموعه‌ای بزرگ از معادلات دیفرانسیل و جبری را با شرایط اولیهٔ معلوم دربر می‌گیرد. تحلیل پخش بار قبل از خطا، مقادیر اولیهٔ متغیرهای شبکه، شامل خروجیها توان حقیقی و راکتیو ولتاژ پایانه‌های ژنراتور را فراهم می‌آورد.

مراحل محاسبهٔ مقادیر اولیهٔ کمیتهای ژنراتور، در وضعیت مشخص پایانه‌ها، در بخش ۳ - ۶ - ۵ از فصل سوم، آورده شده است.

مدل کلاسیک ژنراتور و شین بینهایت

برای ماشین نمایش داده‌شده با مدل کلاسیک، $X_{RI} = X_{IR} = X'_d$ است و E'' با E' جایگزین می‌شود. زاویهٔ روتور δ، زاویه‌ای است که E' از محور R جلوتر است. مقدار E' در طول حل، ثابت است. مؤلفه‌های R و I از E'، همان‌طور که با حل معادلهٔ تاب (نوسان) تعیین شد با δ تغییر می‌کنند. برای گرهی متناظر با یک شین بینهایت، هر دو دامنه و زاویهٔ ولتاژ گره ثابت باقی می‌مانند.

که در آن:

$$L''_{aqs} = \frac{1}{\frac{1}{L_{aqs}} + \frac{1}{L_{1d}} + \frac{1}{L_{2d}}}$$
$$L''_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} \qquad (۲۶ - ۱۳)$$

در اینجا L_{ads} و L_{aqs} مقادیر اشباع شدهٔ اندوکتانسهای متقابلِ محور d و q است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$L_{ads} = K_{sd} L_{adu}$$
$$L_{aqs} = K_{sq} L_{aqu} \qquad (۲۷ - ۱۳)$$

و K_{sd} و K_{sq} نیز به صورت تابعی از شاردور فاصلهٔ هوایی، ψ_{at} (مطابق فصل سوم بخش ۳ - ۸ - ۲) محاسبه می‌شوند.

معادلات ولتاژ استاتور

با نادیده گرفتن گذراهای استاتور ($p\psi_q$ و $p\psi_d$) و انحرافهای سرعت (ω/ω_0)، مطابق فصل پنجم (بخش ۵ - ۱)، می‌توان ولتاژ استاتور را به صورت زیر نوشت:

$$e_d = -R_a i_d + (\bar{\omega} L''_q) i_q + E''_d$$
$$e_q = -R_a i_q + (\bar{\omega} L''_d) i_d + E''_q \qquad (۲۸ - ۱۳)$$

با:

$$E''_d = -\bar{\omega} L''_{aqs} \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right)$$
$$E''_q = \bar{\omega} L''_{ads} \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \qquad (۲۹ - ۱۳)$$

$$L''_d = L_l + L''_{ads}$$
$$L''_q = L_l + L''_{aqs} \qquad (۳۰ - ۱۳)$$

از آنجا که اثر انحراف سرعت بر روی ولتاژ استاتور را نادیده گرفته‌ایم، در معادلات بالا

از بلوکهای ۳ و ۴، داریم:

$$p\nu_2 = K_{STAB}\, p\,\Delta\omega_r - \frac{1}{T_W}\nu_2 \qquad (۴۲ - ۱۳)$$

که $p\,\Delta\omega_r$ از معادلهٔ ۱۳ ـ ۲۲ به دست می‌آید. از بلوک ۵، نتیجه می‌شود:

$$p\nu_3 = \frac{1}{T_2}\left[T_1\, p\nu_2 + \nu_2 - \nu_3\right] \qquad (۴۳ - ۱۳)$$

که $p\nu_2$ از معادلهٔ ۱۳ ـ ۴۲، محاسبه می‌شود. خروجی پایدارساز عبارت است از:

$$\nu_s = \nu_3 \qquad (\text{۱۳ ـ ۴۴ الف})$$

با:

$$\nu_{smax} \geq \nu_s \geq \nu_{smin} \qquad (\text{۱۳ ـ ۴۴ ب})$$

از بلوک ۲، ولتاژ خروجی تحریک کننده برابر است با:

$$E_{fd} = K_A\left[V_{ref} - \nu_1 + \nu_s\right] \qquad (\text{۱۳ ـ ۴۵ الف})$$

با:

$$E_{Fmax} \geq E_{fd} \geq E_{Fmin} \qquad (\text{۱۳ ـ ۴۵ ب})$$

هر دو حد درنظر گرفته شده، حدود *خارج از بلوک*[1] هستند. مدلسازی حدود *روی بلوک*[2] در فصل هشتم بحث شده است.

ولتاژ تحریک ژنراتور e_{fd} در سیستم مبنای واحد متقابل، به شکل زیر به ولتاژ خروجی تحریک کننده (E_{fd}) وابسته است (فصل ۸، بخش ۸ ـ ۶ را ببینید):

$$e_{fd} = \frac{R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} \qquad (۴۶ - ۱۳)$$

روش دیگری برای برخورد با بلوکهای ۴ و ۵، که در آن مشتقات متغیرهای ورودی موردنیاز نیست، در فصل دوازدهم بخش ۱۲ ـ ۳ ـ ۴، توضیح داده شده است.

مقادیر اولیهٔ متغیرهای سیستم تحریک

برای هر خروجی حالت ماندگارِ ژنراتور، ولتاژ تحریک e_{fd} از معادلات ژنراتور تعیین می‌شود

1. Windup Limits 2. Non - Windup Limits

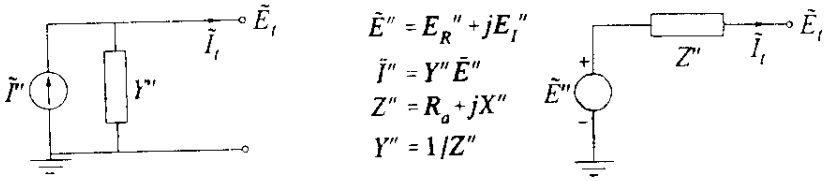
همان‌طور که قبلاً شاره شد، $\bar{\omega}$ برابر با ۱/۰ pu فرض می‌شود. مؤلفه‌های ولتاژ داخلی به صورت زیر داده می‌شوند:

$$E''_R = E''_d \sin\delta + E''_q \cos\delta \qquad (۳۴ - ۱۳)$$
$$E''_I = E''_q \sin\delta - E''_d \cos\delta$$

اگر برجستگی قطبِ زیرگذرا، *قابل صرفنظر کردن* باشد، داریم: $L''_d = L''_q$. آنگاه:

$$R_{RR} = R_{II} = R_a$$
$$X_{RI} = X_{IR} = \bar{\omega}\, L''_d = X''_d = X''_q = X''$$

در این حالت، $E''_R + j\,E''_I$، ولتاژ متصل به امپدانس زیرگذرای $R_a + j\,X''$ را نشان می‌دهد. برای حل شبکه، می‌توان ژنراتور را به صورت هریک از مدارهای معادل نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۱۱ نشان داد.



(ب) معادل نورتون (الف) معادل تونن

شکل ۱۳ ـ ۱۱ مدارهای معادل ماشین سنکرون با برجستگی زیرگذرای قابل صرفنظرکردن

ممکن است تغییرات ناشی از اشباع L_{ads} و L_{aqs} موجب شود طی حالت گذرا، مقدار کمی برجستگی قطب زیرگذرا پدید آید. که معمولاً مقدار آن ناچیز است و در صورتی که بخواهیم از مزایای سادگیِ محاسبات با مدارهای معادل بالا استفاده کنیم، می‌توان آن را نادیده گرفت.

توان حقیقی و توان راکتیو در پایانه‌های استاتور ژنراتور عبارت است از:

$$P_t = e_d\, i_d + e_q\, i_q \qquad (۳۵ - ۱۳)$$

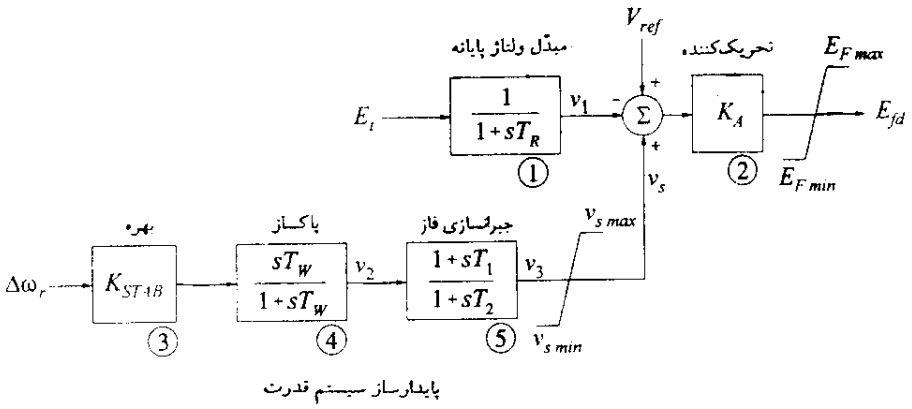
$$Q_t = e_q\, i_d - e_d\, i_q \qquad (۳۶ - ۱۳)$$

گشتاور فاصلهٔ هوایی موردنیاز برای حل معادلهٔ تاب معادلهٔ ۱۳ ـ ۲۲ عبارت است از:

$$T_e = \psi_d\, i_q - \psi_q\, i_d$$
$$= \psi_{ad}\, i_q - \psi_{aq}\, i_d \qquad (۳۷ \text{ الف} - ۱۳)$$

۱۳ ـ ۳ ـ ۳ نمایش سیستم تحریک

مدل انواع مختلف سیستم‌های تحریک در فصل هشتم توضیح داده شد. در اینجا روش وارد کردن این مدلها را در برنامهٔ پایداری گذرا، با درنظر گرفتن مدل سیستم تحریکِ شکل ۱۳ ـ ۱۲، نشان خواهیم داد. مدل، یک سیستم تحریک تریستوری تغذیه از شین را (که در فصل ۸ تحت عنوان نوع ST1A دسته‌بندی شده است) همراه با یک تنظیم‌کنندهٔ خودکار *ولتاژ* (AVR) و یک *پایدارساز سیستم قدرت* (PSS) نشان می‌دهد. علاوه بر این از تحریک کننده‌ای با بهرهٔ زیاد (K_A) و بدون کاهش گذرای بهره یا فیدبک مشتق استفاده شده است. مدل شکل ۱۳ ـ ۱۲ همانند مدل سیستم تحریک درنظر گرفته شده در فصل ۱۲ (شکل ۱۲ ـ ۱۴ را ببینید) است، با این تفاوت که در این مدل حدهای روی خروجیهای تحریک کننده و PSS نیز درنظر گرفته شده است.



شکل ۱۳ ـ ۱۲ سیستم تحریک تریستوری با AVR و PSS

برای تحریک کنندهٔ تریستوری تغذیه از شین (منبع ولتاژ)، ولتاژها با ولتاژ پایانهٔ ژنراتور (E_t) و جریان خروجی تحریک کننده (I_{fd}) تغییر می‌کند:

$$E_{Fmax} = V_{Rmax} E_t - K_c I_{fd}$$
$$E_{Fmin} = V_{Rmin} E_t \qquad (۴۰ - ۱۳)$$

از بلوک ۱ شکل ۱۳ ـ ۱۲، می‌توان نوشت:

$$p\,v_1 = \frac{1}{T_R}(E_t - v_1) \qquad (۴۱ - ۱۳)$$

و ولتاژ (مدولاسیون دامنه)[1] را در تحلیل پایداری مد نظر قرار داد. برای تحلیل حالت متعادل، نمایشی تک‌فاز از سه‌فاز به کار گرفته می‌شود. همان‌طور که در بخش ۱۳ ـ ۴ توضیح داده شده است، خطاهای نامتعادل به کمک مؤلفه‌های متقارن شبیه‌سازی می‌شوند.

تحلیل پایداری سیستم بزرگ قدرت، بدون نمایش حالت ماندگارِ متعادل شبکهٔ انتقال، غیرعملی خواهد بود. در مسائل الکترومکانیکیِ خاص که نیاز دارند شبکهٔ انتقال و گذراهای استاتور ژنراتور، و نمایش سه‌فاز نیز وارد شوند، می‌توان از برنامه‌ای مانند برنامه گذراهای الکترومغناطیسی (EMTP)[2] کمک گرفت [۹]. برای تحلیل پایداری گذرای مرسوم، نمایش شبکه همانند نمایش برای تحلیل پخش بار است. همان‌طور که در فصل ششم (بخش ۶ـ۴ـ۱) توضیح داده شد، مناسبترین صورتِ نمایش شبکه برحسب ماتریسِ ادمیتانسِ گره می‌باشد. ساختار و فرموله کردن این ماتریس در بخش ۶ـ۴ـ۱ آورده شده است.

مشخصه‌ها و مدلسازی بارها در فصل هفتم آورده شده است. بارهای دینامیکی به صورت موتورهای القایی یا سنکرون نمایش داده می‌شوند، و نحوهٔ برخورد با آنها همانند ماشینهای سنکرون است.

بارهای استاتیکی به عنوان قسمتی از معادلات شبکه، نمایش داده می‌شوند. بارهای با مشخصهٔ امپدانس ثابت، ساده‌ترین نوع بار در بررسی است که در ماتریس ادمیتانس گره لحاظ می‌شوند. بارهای غیرخطی به صورت توابع چندجمله‌ای یا نمایی از دامنه و فرکانس ولتاژ شین مدل می‌شوند و اثر کلی آنها، این است که با یک مدل بار استاتیکی ـ غیرخطی به صورت تزریق جریان در گره مناسب در معادلهٔ شبکه، برخورد می‌شود. مقدار جریان گره از زمین به شبکه برابر است با:

$$\tilde{I}_L = -\frac{P_L - jQ_L}{\tilde{V}_L^*} \qquad (۴۹ - ۱۳)$$

که در آن $\tilde{V}_L^*$ مزدوج ولتاژ شین بار است، P_L و Q_L قسمتهایی از مؤلفه‌های حقیقی و راکتیو بار هستند که به صورت توابع غیرخطی از V_L و انحراف فرکانس تغییر می‌کنند. برای بارهای القایی، Q_L مثبت است. نمایش کلی شبکه و یا بار از یک ماتریس ادمیتانس گره‌ای پراکنده و بزرگ با ساختاری مشابه مسألهٔ پخش بار (فصل ۶، بخش ۶ ـ ۴) تشکیل می‌شود. معادلهٔ شبکه، همان معادلهٔ ۶ ـ ۸۷ است، که می‌توان آن را به شکل ماتریسیِ زیر نوشت:

$$\tilde{I} = Y_N \tilde{V} \qquad (۵۰ - ۱۳)$$

1. Amplitude Modulation
2. Electro Magnetic Transients Program

(بخش ۱۳ ـ ۳ ـ ۲ را ببینید). کمیتهای سیستم تحریک به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$E_{fd} = \frac{L_{adu}}{R_{fd}} e_{fd}$$

$$\nu_1 = E_t \qquad \nu_2 = 0 \qquad \nu_5 = 0 \qquad (۴۷ - ۱۳)$$

مرجع AVR عبارت است از:

$$V_{ref} = \frac{E_{fd}}{K_A} + \nu_1 \qquad (۴۸ - ۱۳)$$

بنابراین V_{ref} مقداری مناسب با وضعیت بارگذاری ژنراتور قبل از اغتشاش، اختیار می‌کند.

نمایش مدار اتصال کوتاه کنندهٔ تحریک [۸]

درصورت وجود یک تحریک کنندهٔ جریان متناوب یا استاتیکی، معمولاً جریان تحریک کننده نمی‌تواند منفی باشد. بنابراین، از یک مدار مخصوص اتصال کوتاه کنندهٔ تحریک[1] به صورت یک «اهرم»[2] یا یک وریستور[3] برای کنارگذر کردن تحریک کننده استفاده می‌شود تا بدین ترتیب به جریان منفی تحریک اجازه دهد جاری شود (فصل ۸، بخش ۸ ـ ۵ ـ ۸ را ببینید).

اثر مدارهای اتصال کوتاه کنندهٔ تحریک را می‌توان با تنظیم ولتاژ تحریک روی مقدار صفر و سپس افزایش مقاومت تحریک (R_{fd}) به میزان مناسب، در حین دوره‌ای که جریان تحریک منفی است، شبیه‌سازی کرد. مقاومت افزوده برای حالت اهرم ثابت است. در حالت وریستور، مقاومت، تابعی غیرخطی از ولتاژ اعمالی است. وقتی که جریان تحریک مثبت می‌شود، مقاومت مدار تحریک به مقدار طبیعی‌اش برمی‌گردد، و ولتاژ تحریک به کمک خروجی تحریک کننده برقرار می‌شود.

۱۳ ـ ۳ ـ ۴ نمایش شبکهٔ انتقال و بار

گذراهای مربوط به شبکهٔ انتقال بسرعت از میان می‌روند. درواقع، گذراهای شبکه، زمانی که پاسخ معادلهٔ تاب (نوسان) یک گام زمانی جلو رود، از بین رفته‌اند. بنابراین، معمولاً کفایت می‌کند که شبکه را، درحین شرایط گذرای الکترومکانیکی، چنان درنظر بگیریم که مستقیماً از یک حالت ماندگار به حالت دیگر انتقال پیدا می‌کند. تغییرات فرکانس اصلی (۵۰ یا ۶۰ هرتز) را می‌توان به عنوان فرایندهای میکرو[4] درنظر گرفت، و فقط تغییراتِ پوش شکل موجهای جریان

1. Field - Shorting 2. Crowbar 3. Varistor 4. Microprocesses

کندانسورهای سنکرون. مدلهایی از این وسایل در فصلهای هفتم، دهم و یازدهم توصیف شده است.

معادلات هر یک از واحدهای تولید و وسایل دینامیکی دیگر را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{f}_d(\mathbf{x}_d, \mathbf{V}_d) \qquad (۵۱ - ۱۳)$$

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{g}_d(\mathbf{x}_d, \mathbf{V}_d) \qquad (۵۲ - ۱۳)$$

که در آن:

$\mathbf{x}_d$ = بردار حالت وسیله؛

$\mathbf{I}_d$ = مؤلفه‌های R و I تزریق جریان از وسیله به شبکه؛

و $\mathbf{V}_d$ = مؤلفه‌های R و I ولتاژ شین است.

معادلات کلی سیستم، شامل معادلات دیفرانسیل ۱۳ ـ ۵۱ برای کلیهٔ وسایل و معادلات جبری ترکیب شده برای وسایل (۱۳ ـ ۵۲) و شبکه (۱۳ ـ ۵۰)، به صورت کلی زیر شامل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل مرتبهٔ اول:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \qquad (۵۳ - ۱۳)$$

و مجموعه‌ای از معادلات جبری

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V} \qquad (۵۴ - ۱۳)$$

مجموعه‌ای از شرایط اولیهٔ نامعلوم ($\mathbf{x}_0$, $\mathbf{V}_0$) بیان می‌شود، که در آن:

$\mathbf{x}$ = بردار حالت سیستم؛

$\mathbf{V}$ = بردار ولتاژ شین؛

و $\mathbf{I}$ = بردار تزریق جریان است.

زمان t به صورت صریح در معادلات بالا ظاهر نمی‌شود. روشهای متنوع فراوانی برای حل این معادلات، وابسته به روشهای عددی و جزئیات مدلسازی کاربردی، در مراجع ذکر شده است. مرجع ۱۰ مروری بر این روشها را ارائه می‌کند. طرحهای ممکن برای حل معادلات ۱۳ ـ ۵۳ و ۱۳ ـ ۵۴ با عوامل زیر مشخص می‌شوند:

الف) نحوهٔ ارتباط بین معادلات دیفرانسیل ۱۳ ـ ۵۳ و معادلات جبری ۱۳ ـ ۵۴. می‌توان

ماتریس ادمیتانس گره Y_N، به جز برای عدم تقارنی که به علت ترانسفورمرهای تغییر دهندهٔ فاز ایجاد می‌شود، متقارن است (بخش ۶-۲-۳ را ببینید). در چارچوب زمانی شبیه‌سازیهای پایداری گذرا، تپ مبدل و زوایای تغییر فاز ترانسفورمرها تغییری نمی‌کنند. بنابراین، عناصر ماتریس به جز برای تغییرات ناشی از عملیات کلیدزنی شبکه، ثابت هستند.

اثر ژنراتورها، بارهای استاتیکی غیرخطی، بارهای دینامیکی، و سایر وسایل مانند کنورتورهای HVDC و جبرانسازهای قابل تنظیم توان راکتیو به صورت شرایط مرزیِ فراهم‌کنندهٔ روابط اضافی بین $\bar{V}$ و $\bar{I}$ در گره‌های متناظر، منعکس می‌شود.

برخلاف تحلیل پخش بار (فصل ۶ را ببینید) در تحلیل پایداری گذرا، لازم نیست حتماً کنترل توان انتقالی خط ارتباطی، حدهای روی توان خروجی راکتیو ژنراتور، و شین مبنا را که تلفات نامعلوم را جبران می‌کند، درنظر گرفت.

شبیه‌سازی خطاها. خطا در یک شین یا نزدیکی آن با تغییر مناسب ادمیتانس خودی شین، شبیه‌سازی می‌شود.

روشهای شبیه‌سازی انواع مختلف خطا در بخش ۱۳-۴-۵ مورد بررسی قرار می‌گیرند. بسته به نوع خطا، امپدانس‌های معادل مؤلفهٔ منفی و مؤلفهٔ صفر از دیدگاه نقطهٔ خطا محاسبه شده به طور مناسب با هم ترکیب می‌شوند و بین نقطهٔ خطا و زمین وارد می‌گردند. این کار فقط ادمیتانس خودی گره نشان‌دهندهٔ شین خطا را تغییر می‌دهد.

در حالت خطای سه فاز، امپدانس خطا صفر است و شین تحت خطا ولتاژی مشابهِ زمین دارد، که شامل جایگذاری یک ادمیتانس شنت بینهایت است. در عمل، از یک ادمیتانس شنت - به اندازهٔ کافی بزرگ (به عبارت دیگر، یک امپدانس شنت بسیار کوچک) استفاده می‌شود، به گونه‌ای که ولتاژ شین عملاً صفر بماند. به عنوان مثال، انتخاب هدایت G مساوی با 10^6 pu بر پایهٔ ۱۰۰ MVA به طور مؤثری، ولتاژ شین را به صفر کاهش می‌دهد. خطا، با برگرداندن ادمیتانس شنت به مقدار مناسب بسته به ترکیب سیستم بعد از خطا از بین برده می‌شود.

۱۳ - ۳ - ۵ معادلات کلی سیستم

در بخشهای ۱۳-۳-۲ و ۱۳-۳-۳، دسته‌بندی معادلات ژنراتور سنکرون و سیستم تحریک را توضیح دادیم. مدلسازی سیستم کنترل توربین در فصل نهم آورده شده است. طرز عمل این مدلها مشابه مدل سیستم تحریک است.

وسایل دیگری که دینامیک آنها در مطالعات پایداری گذرا نمایش داده می‌شود، عبارتند از موتورها، کنورتورهای HVDC و کنترلهای آنها، جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو، و

مقادیر به ترتیب در معادلهٔ ۱۳ ـ ۱۷ برای محاسبهٔ $\mathbf{k}_2$، $\mathbf{x}_2$ و $\mathbf{q}_2$ به کار گرفته می‌شوند. این فرایند، که شامل پاسخهای متوالی معادلات دیفرانسیل و جبری است، با $\mathbf{x}_4$ (که نشان‌دهندهٔ پاسخ در انتهای هر مرحلهٔ زمانی است) مرتباً اعمال می‌شود. در حین عمل کلیدزنی، متغیرهای شبکه بلافاصله تغییر می‌کنند، لیکن متغیرهای حالت به طور آنی تغییر نخواهند کرد.

از آنجا که حل معادلات دیفرانسیل تنها مقادیر متغیرهای شبکه و حالت را از مرحلهٔ قبل نیاز دارد، معادلات دیفرانسیل را می‌توان به هر نحو مطلوبی تفکیک کرد. برای مثال، معادلات دیفرانسیل مربوط به هر وسیله را می‌توان به صورت مستقلی حل کرد. به این ترتیب، برنامه‌ریزی قابلیت انعطاف فراوانی خواهد داشت.

برای حل شبکه‌های مربوط به سیستمهای بزرگ به هم پیوسته، مؤثرترین روش استفاده از فاکتورگیری مثلثی مبتنی بر خاصیت پراکندگی ماتریس است.

روند تفکیک شده با انتگرالگیری صریح، روندی سنتی است که به طور وسیع در برنامه‌های تجارتی پایداری مورد استفاده قرار گرفته است. مزایای آن انعطاف‌پذیری و سادگی برنامه‌ریزی، قابلیت اعتماد، و مقاومت است. عیب اصلی روند، امکان ناپایداری عددی آن است. برای یک سیستم سخت، به گامهای زمانی کوچکی در طول دورهٔ حل نیاز است که این گام با کوچکترین ثابت زمانی (یا مقدار ویژه) تعیین می‌شود.

ب) حل همزمان با انتگرالگیری صریح [۱۴]

در این روند، متغیرهای حالت و متغیرهای شبکه به طور همزمان حل می‌شوند. این روند با استفاده از قاعدهٔ ذوزنقه‌ای نشان داده می‌شود.

با $\mathbf{x} = \mathbf{x}_n$ و $\mathbf{V} = \mathbf{V}_n$ در $t = t_n$، حل $\mathbf{x}$ در $t = t_{n+1} = t_n + \Delta t$، با اعمال قاعدهٔ ذوزنقه‌ای (معادلهٔ ۱۳ ـ ۲۱) برای حل معادله ۱۳ ـ ۵۳، داده می‌شود:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2}[\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{V}_n)] \qquad (۵۵ - ۱۳)$$

از معادلهٔ ۱۳ ـ ۵۴، حل $\mathbf{V}$ در $t = t_{n+1}$ عبارت است از:

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{Y}_n \mathbf{V}_{n+1} \qquad (۵۶ - ۱۳)$$

بردارهای $\mathbf{x}_{n+1}$ و $\mathbf{V}_{n+1}$ مجهول هستند، بنابراین فرض می‌کنیم:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n - \frac{\Delta t}{2}[\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{V}_n)] \qquad (۵۷ - ۱۳)$$

یک روند تفکیک شده[1] یا همزمان را به کار گرفت.

ب) روش انتگرالگیری مورد استفاده، به عبارت دیگر، روش ضمنی یا روش صریح.

ج) روش کاربردی در حل معادلات جبری. همانند تحلیل پخش بار توصیف شده در فصل ششم، می‌توان یکی از روشهای زیر را به کار برد: ۱) روش گوس ـ سایدل بر مبنای فرموله کردن ماتریس ادمیتانس، ۲) حل مستقیم با استفاده از فاکتورگیری مثلثی مبتنی بر خاصیت پراکندگی ماتریس، و ۳) حل تکراری با استفاده از روش نیوتن ـ رافسن.

کلیهٔ روندها و یا روشهای بالا به طور موفقیت‌آمیزی در برنامه‌های تجارتی پایداری‌گذرا، به کار گرفته شده‌اند. در بخش بعد، دو طرح حل مقدماتی توضیح داده می‌شوند. یک طرح، حل تفکیک شده را به همراه روش انتگرالگیری صریح به کار می‌بندد، و طرح دیگر، از حل همزمان با روش انتگرالگیری ضمنی استفاده می‌کند.

۱۳ ـ ۳ ـ ۶ پاسخ معادلات کلی سیستم

الف) حل تفکیک شده با انتگرالگیری صریح

در این روند، معادلات جبری و دیفرانسیل به طور مجزا حل می‌شوند. نخست، در $t = 0^-$، مقادیر متغیرهای حالت $\mathbf{x}$ و متغیرهای شبکه $\mathbf{V}$ و $\mathbf{I}$ معلوم هستند، و مجموعهٔ سازگار را تشکیل می‌دهند. یعنی آنکه، سیستم در حالت ماندگار است و مشتقات زمانی ($\mathbf{V}$ و $\mathbf{f}(\mathbf{x}$ مساوی صفر می‌باشند.

به دنبال بروز اغتشاش مثلاً خطای شبکه، متغیرهای حالت نمی‌توانند بلافاصله تغییر کنند. اول معادلات جبری ۱۳ ـ ۵۴ برای تعیین $\mathbf{V}$ و $\mathbf{I}$، و توانهای انتقالی متناظر و سایر متغیرهای غیرحالت موردنظر در $t = 0^+$ حل می‌شوند. سپس مشتقات زمانی $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V})$ با استفاده از مقادیر معلوم $\mathbf{x}$ و $\mathbf{V}$ در معادلات ۱۳ ـ ۵۳ محاسبه می‌شوند. آنگاه می‌توان از آنها برای آغاز حل متغیرهای حالت با استفاده از هر یک از روشهای انتگرال‌گیری صریحِ بخش ۱۳ ـ ۲، استفاده کرد.

این روش با درنظر گرفتن صورت گیلِ روش R-Kی مرتبهٔ چهارم نمایش داده خواهد شد. چهار مرحله (j = ۱ تا ۴) در هر مرحلهٔ زمانی Δt وجود دارد. با بکارگیری مقادیر محاسبه شده $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V})$ در آغاز هر مرحلهٔ زمانی، $\mathbf{k}_1$، $\mathbf{x}_1$ و $\mathbf{q}_1$ براساس معادلهٔ ۱۳ ـ ۱۷، با j = ۱ محاسبه می‌شوند. آنگاه معادلات جبری ۱۳ ـ ۵۴ برای محاسبهٔ $\mathbf{V}_1$ و $\mathbf{I}_1$ با $\mathbf{x} = \mathbf{x}_1$، حل می‌شوند. این

1. Partitioned

$$\mathbf{A}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_{dm} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{B}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{d1} \\ \mathbf{B}_{d2} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{dm} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{Y}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{Y}_{dm} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_D = [\mathbf{C}_{d1} \quad \mathbf{C}_{d2} \quad \cdots \quad \mathbf{C}_{dm}]$$

پاسخ معادلات ۱۳ ـ ۵۹ و ۱۳ ـ ۶۰ برحسب ماتریسهای بالا به صورت زیر داده می‌شود:

$$\mathbf{A}_D \Delta \mathbf{x}^k_{n+1} + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{V}^k_{n+1} = -\mathbf{F}(\mathbf{x}^k_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1})\underline{\Delta} - \mathbf{F}^k_{n+1} \qquad (۶۴ ـ ۱۳)$$

$$\mathbf{C}_D \Delta \mathbf{x}^k_{n+1} + (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)\Delta \mathbf{V}^k_{n+1} = -\mathbf{G}(\mathbf{x}^k_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1})\underline{\Delta} - \mathbf{G}^k_{n+1} \qquad (۶۵ ـ ۱۳)$$

در معادلات بالا، k شمارهٔ تکرار است و مقادیر مناسب شروع کننده $(\mathbf{x}^0_{n+1}, \mathbf{V}^0_{n+1})$ با برونیابی به دست می‌آید. همچنین $\mathbf{F}^k_{n+1}$ و $\mathbf{G}^k_{n+1}$، به ترتیب ماندهٔ بردارهای حالت و تزریق جریان هستند. از معادلهٔ ۱۳ ـ ۶۴ می‌توان $\Delta \mathbf{x}^k_{n+1}$ را به صورت تابعی از $\Delta \mathbf{V}^k_{n+1}$ بیان کرد:

$$\Delta \mathbf{x}^k_{n+1} = -\mathbf{A}_D^{-1}[\mathbf{F}^k_{n+1} + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{V}^k_{n+1}] \qquad (۶۶ ـ ۱۳)$$

با جایگزینی از معادلهٔ ۱۳ ـ ۶۶ در معادلهٔ ۱۳ ـ ۶۵ نتیجه می‌شود:

$$(\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D - \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{B}_D)\Delta \mathbf{V}^k_{n+1} = -\mathbf{G}^k_{n+1} + \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{F}^k_{n+1} \qquad (۶۷ ـ ۱۳)$$

اکنون $\Delta \mathbf{V}^k_{n+1}$ و $\Delta \mathbf{x}^k_{n+1}$ را می‌توان با حل معادلات ۱۳ ـ ۶۶ و ۱۳ ـ ۶۷ محاسبه کرد و پس از آن $\mathbf{x}^{k+1}_{n+1}$ و $\mathbf{V}^{k+1}_{n+1}$ از معادلهٔ ۱۳ ـ ۶۱ به دست می‌آیند.

برخورد با ناپیوستگیها. معادلات ۱۳ ـ ۶۴ و ۱۳ ـ ۶۵ فقط هنگامی اعتبار دارند که توابع داده شده با معادلات ۱۳ ـ ۵۷ و ۱۳ ـ ۵۸ پیوسته و مشتق پذیر باشند. در نقاط ناپیوستگی، همانند کلیدزنی شبکه یا وجود حد بر روی متغیرهای حالت، فرموله کردن دقیق با روش نیوتن یا هر روش دیگرِ نیازمند به مشتقات، پیچیده خواهد بود [۱۳]. با این مسأله در مرجع ۱۴ به صورت زیر برخورد شده است:

- برای ناپیوستگیهای بزرگ شبکه، از قبیل خطای شبکه یا عمل کلیدزنی، روش انتگرالگیری به طور موقت به روش رانگ ـ کوتا برای یک مرحله در نقطهٔ ناپیوستگی تغییر داده می‌شود. این مرحلهٔ زمانی، گامی به اندازه صفر دارد و فقط برای محاسبهٔ وضعیت بعد از

POWEREN.IR

و:

$$G(x_{n+1}, V_{n+1}) = Y_N V_{n+1} - I(x_{n+1}, V_{n+1}) \qquad (۵۸ - ۱۳)$$

در حل،

$$F(x_{n+1}, V_{n+1}) = 0 \qquad (۵۹ - ۱۳)$$

$$G(x_{n+1}, V_{n+1}) = 0 \qquad (۶۰ - ۱۳)$$

هر دو معادلهٔ ۱۳ ـ ۵۹ و ۱۳ ـ ۶۰ معادلات جبری غیرخطی هستند. بنابراین ملاحظه می‌شود معادلات دیفرانسیل با استفاده از یک فرمول صریح، جبری شده‌اند. این معادلات بسیار پراکنده هستند لذا برای افزایش کارآیی محاسباتی لازم است از ساختار خاص آنها سود جُست. با اعمال روش نیوتن (فصل ۶ را ببینید) برای حل معادلات ۱۳ ـ ۵۹ و ۱۳ ـ ۶۰ می‌توان برای $(k+1)$ اُمین تکرار نوشت:

$$\begin{pmatrix} x_{n+1}^{k+1} \\ V_{n+1}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{n+1}^{k} \\ V_{n+1}^{k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x_{n+1}^{k} \\ \Delta V_{n+1}^{k} \end{pmatrix} \qquad (۶۱ - ۱۳)$$

معادلهٔ زیر برای به دست آوردن Δx_{n+1}^{k} و V_{n+1}^{k} حل می‌گردد:

$$\begin{pmatrix} -F(x_{n+1}^{k}, V_{n+1}^{k}) \\ -G(x_{n+1}^{k}, V_{n+1}^{k}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial V} \\ \frac{\partial G}{\partial x} & \frac{\partial G}{\partial V} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_{n+1}^{k} \\ \Delta V_{n+1}^{k} \end{pmatrix} \qquad (۶۲ - ۱۳)$$

ژاکوبین معادلهٔ فوق در $x = x_{n+1}^{k}$ و $V = V_{n+1}^{k}$ محاسبه می‌شود که دارای ساختار زیر است:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial V} \\ \frac{\partial G}{\partial x} & \frac{\partial G}{\partial V} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_D & B_D \\ C_D & (Y_N + Y_D) \end{pmatrix} \qquad (۶۳ - ۱۳)$$

ماتریسهای A_D، B_D، C_D و Y_D مربوط به مدل وسایل دینامیکی و بارهای استاتیکی غیرخطی هستند. برای سیستمی با m تا از چنین وسایلی، این ماتریس‌ها ساختارهای زیر را دارند:

ژنراتورها با تحریک کننده‌های تریستوری با AVR و PSS دارای پارامترهای زیر مجهز شده‌اند:

$K_A = ۲۰۰$ $T_R = ۰/۰۱۵$ (ثانیه) $E_{Fmax} = ۷/۰$ $E_{Fmin} = -۶/۴$

$K_{STAB} = ۹/۵$ $T_W = ۱/۴۱$ (ثانیه) $T_۱ = ۰/۱۵۴$ (ثانیه) $T_۲ = ۰/۰۳۳$ (ثانیه)

$\nu_{s\,max} = ۰/۲$ $\nu_{s\,min} = -۰/۲$

فرض می‌شود که تحریک کننده از آلترناتور[1] تغذیه می‌شود. بنابراین، $E_{F\,max}$ و $E_{F\,min}$ مستقل از E_t هستند.

وضعیت سیستم قبل از خطا در مبنای واحد بر پایهٔ ۲۲۲۰ MVA و ۲۴ KV، عبارت است از:

$P = ۰/۹$ $Q = ۰/۴۳۶$ (فوق تحریک)

$\tilde{E} = ۱/۰ \angle ۲۸/۳۴^\circ$ $\tilde{E}_B = ۰/۹۰۰۸۱ \angle ۰$

اغتشاش. خطای سه فاز روی مدار ۲ در نقطهٔ F با جداسازی مدار تحت‌خطا به طور همزمان در هر دو سر رفع می‌شود. پایداری سیستم را با صورتهای گوناگون کنترل تحریکِ زیر بررسی کنید:

۱. کنترل دستی، به عبارت دیگر E_{fd} ثابت؛

۲. AVR بدون PSS؛

۳. AVR با PSS

زمانهای رفع خطا را به شکل زیر در نظر بگیرید:

الف) ۰/۰۷ ثانیه؛

ب) ۰/۱۰ ثانیه.

حل

ژنراتورهای این مثال همان مشخصه‌های ژنراتورهای درنظر گرفته شده در مثالهای فصل ۳ و ۴ را دارند.

همان‌طور که در مثال ۴ ـ ۱ بیان شد، پارامترهای اساسی در مبنای واحد عبارتند از:

$L_{adu} = ۱/۶۶$ $L_{aqu} = ۱/۶۱$ $L_l = ۰/۱۵$ $R_a = ۰/۰۰۳$

$L_{fd} = ۰/۱۶۵$ $R_{fd} = ۰/۰۰۰۶$ $L_{1d} = ۰/۱۷۱۳$ $R_{1d} = ۰/۰۲۸۴$

$L_{1q} = ۰/۷۲۵۲$ $R_{1q} = ۰/۰۰۶۲$ $L_{2q} = ۰/۱۲۵$ $R_{2q} = ۰/۰۲۳۷$

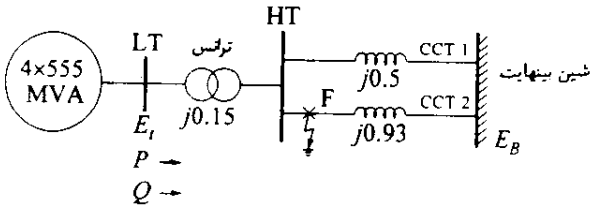
1. Alternator

خطای شبکه استفاده می‌شود (بردار حالت بهنگام آوری نمی‌شود). بعد از این، دوباره از انتگرالگیری معمولی ذوزنقه‌ای استفاده می‌شود.

● برای توابع محلیِ مشتق ناپذیر از قبیل حدود مربوط به کنترل‌کننده‌ها، ژاکوبین‌های وسیله، بدون درنظر گرفتن اثر آنها محاسبه می‌شود. این عمل به این علت قابل قبول است که ژاکوبین‌ها فقط اثر محلی دارند و همگرایی کلی به صورت محسوسی تأثیر نمی‌پذیرد.

مثال ۱۳ ـ ۲

در این مثال، پایداری گذرای سیستم شکل ۱۳ ـ ۱ م را (درنظر گرفته شده در مثال ۱۳ ـ ۱) شامل اثر دینامیک مدار روتور و کنترل تحریک، تحلیل می‌کنیم و برای مراجعه دوباره نمودار سیستم را به صورت شکل ۱۳ ـ ۶ م، ذکر می‌کنیم.



شکل ۱۳ ـ ۶ م راکتانسهای شبکه در مبنای واحد بر پایهٔ ۲۲۲۰ MVA

پارامترهای ژنراتور. چهار ژنراتور نیروگاه به شکل ژنراتوری معادل که پارامترهای آن بر پایهٔ ۲۲۲۰ MVA در مبنای واحد بیان شده است، در زیر آورده شده:

$X_d = ۱/۸۱$ $X_q = ۱/۷۶$ $X'_d = ۰/۳۰$ $X'_q = ۰/۶۵$

$X''_d = ۰/۲۳$ $X''_q = ۰/۲۵$ $X_l = ۰/۱۵$ $R_a = ۰/۰۰۳$

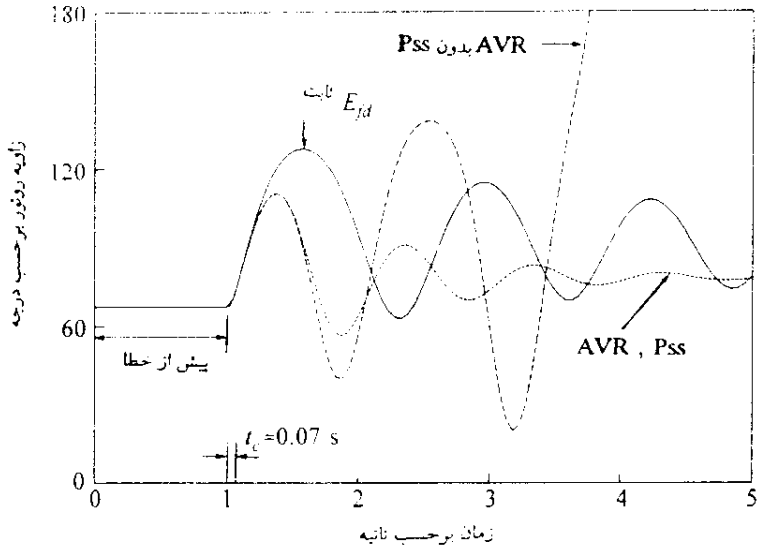
$T_{d0}'' = ۸/۰$ (ثانیه) $T_{q0}' = ۱/۰$ (ثانیه) $T_{d0}'' = ۰/۰۳$ (ثانیه) $T_{q0}'' = ۰/۰۷$ (ثانیه)

$H = ۳/۵$ $K_D = ۰$

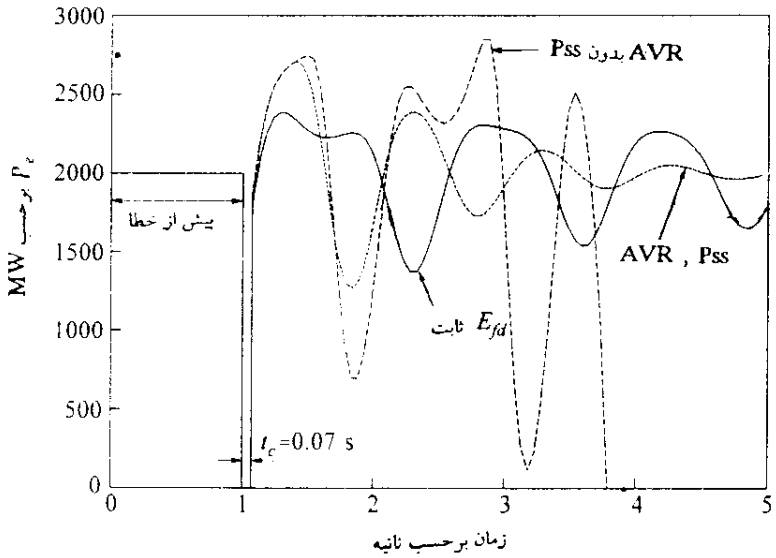
پارامترهای بالا، مقادیر اشباع نشده هستند. اثر اشباع، با فرض آنکه محورهای d و q مشخصه‌های اشباع مشابه دارند به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$A_{sat} = ۰/۰۳۱ \qquad B_{sat} = ۶/۹۳ \qquad \psi_{T1} = ۰/۸ \qquad \psi_{T2} = \infty$$

پارامترهای سیستم تحریک. همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۱۲ م نشان داده شده است،



شکل ۱۳ ـ ۷ م (الف) پاسخ زاویهٔ روتور با خطای رفع شده در ۰/۰۷ ثانیه



شکل ۱۳ ـ ۷ م (ب) پاسخ توان حقیقی با خطای رفع شده در ۰/۰۷ ثانیه

مقادیر مبنای واحد اولیهٔ متغیرهای ژنراتور براساس نتایج مثالهای ۳ ـ ۲ و ۳ ـ ۳ عبارتند از:

$K_{sd} = K_{sq} = ۰/۸۳۵$ $\delta_1 = ۳۹/۱^\circ$

$e_d = ۰/۶۳۱$ $e_q = ۰/۷۷۶$ $i_d = ۰/۹۰۶$ $i_q = ۰/۴۲۳$

$i_{fd} = ۱/۵۶۵$ $e_{fd} = ۰/۰۰۰۹۳۹$

مقادیر مبنای واحد اولیهٔ جریان و ولتاژهای خروجی تحریک کننده برابر است با:

$$I_{fd} = L_{adu} i_{fd} = ۱/۶۶ \times ۱/۵۶۵ = ۲/۵۹۸$$
$$E_{fd} = (L_{adu} / R_{fd})\, e_{fd} = (۱/۶۶ / ۰/۰۰۰۶) \times ۰/۰۰۰۹۳۹ = ۲/۵۹۸$$

با فرض هم‌فاز بودن E_B با محور R، مقدار اولیهٔ زاویهٔ روتور، برابر است با:

$$\delta = \delta_1 + ۲۸/۳۴^\circ = ۳۹/۱^\circ + ۲۸/۳۴^\circ = ۶۷/۴۴^\circ$$

الف) *پاسخ گذرا با زمان رفع خطای t_c برابر با ۰/۰۷ ثانیه.* نتایج پاسخهای زمانی محاسبه شده با سه کنترل تحریک گوناگون در شکلهای ۱۳ ـ ۷ م «الف» تا ۱۳ـ ۷ م «د» نشان داده شده است، که به ترتیب پاسخهای زمانی δ، P_e، E_t و E_{fd} را نشان می‌دهند. این نتایج با استفاده از صورت گیلِ روش انتگرال‌گیریِ R—K و با گام زمانیِ ۰/۰۲ ثانیه محاسبه شده‌اند.

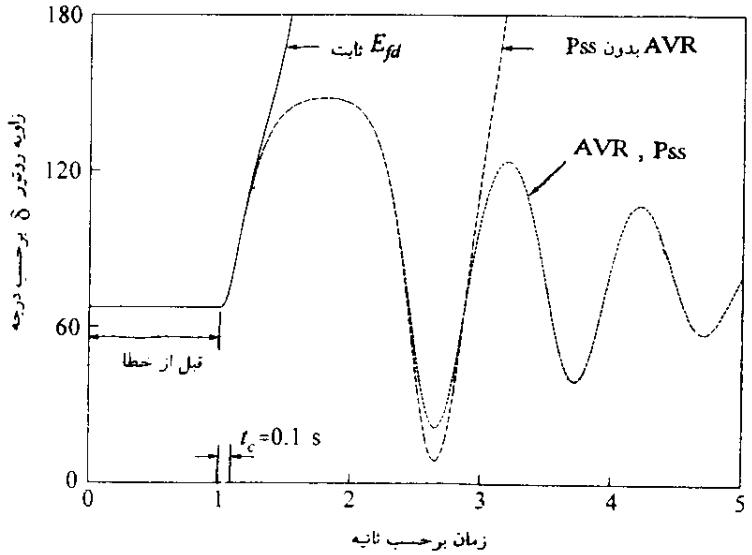
از شکل ۱۳ ـ ۷ م «الف» مشاهده می‌کنیم که با E_{fd} ثابت، سیستم پایدار گذرا است، لیکن، میزان میرایی نوسانهای آن کم است. با استفاده از AVR عمل کنندهٔ سریع[1] و یک ولتاژ سقف بالای تحریک کننده، اولین نوسان زاویهٔ روتور به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. لیکن، نوسانهای بعدی میراییِ منفی خواهند داشت به طوری که سیستم در سومین نوسان، سنکرونیزم را از دست می‌دهد.

با استفاده از PSS، نوسانهای روتور بدون مصالحه‌ای در پایداری اولین نوسان، بخوبی میرا می‌شوند.

1. Fast - Acting

نتایج مربوط به پایداری نوسانی (به عبارت دیگر، میرایی نوسانهای روتور) با نتایج مربوط به مثالهای ۱۲ ـ ۴ و ۱۲ ـ ۵ در فصل دوازدهم سازگار است.

ب) *پاسخ گذرا با زمان رفع خطای t_c برابر با ۰/۱ ثانیه*. پاسخهای گذرای زاویهٔ روتور δ با سه صورت کنترل تحریک گوناگون در شکل ۱۳ ـ ۸ م نشان داده شده است. با E_{fd} ثابت، ژنراتور در اولین نوسان، ناپایدار است. با یک تحریک کنندهٔ عمل کنندهٔ سریع و AVR، ژنراتور در اولین نوسان، پایداری خود را حفظ می‌کند ولی در دومین نوسان سنکرونیزم خود را از دست می‌دهد. اضافه کردن PSS به میرایی دومین نوسان و نوسانهای بعدی کمک می‌کند.

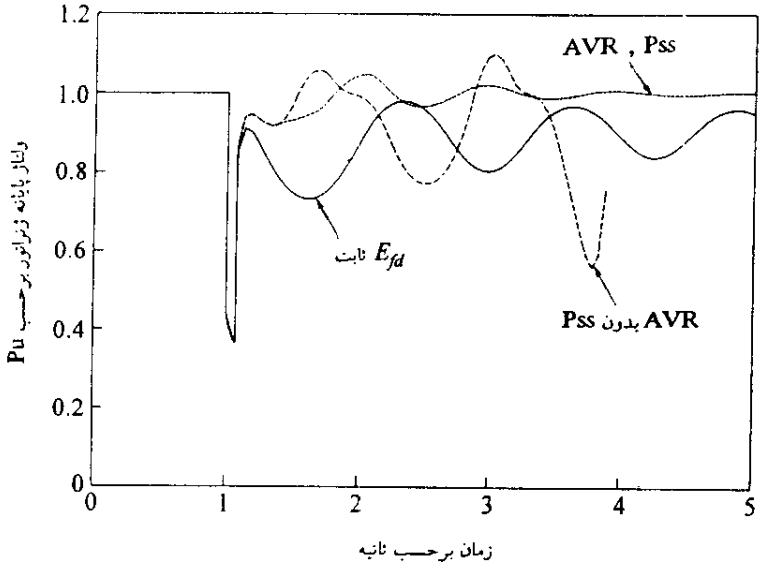


شکل ۱۳ ـ ۸ م پاسخ زاویهٔ روتور با خطای رفع شده در ۰/۱ ثانیه

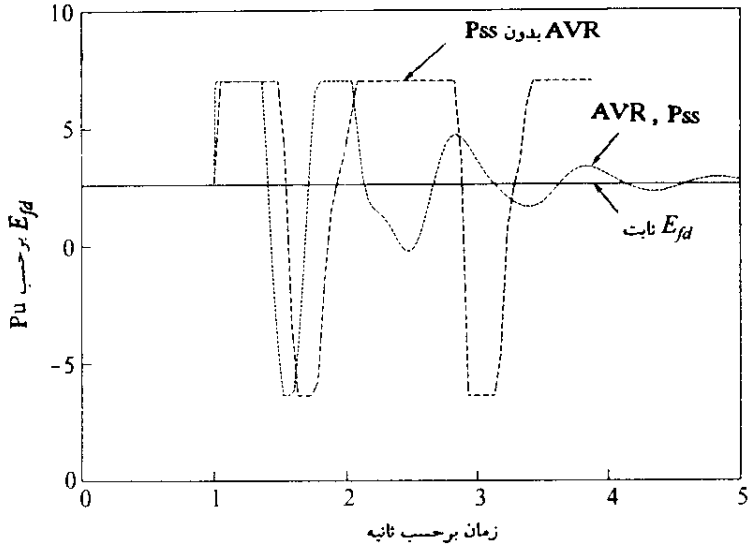
از نتایج به دست آمده واضح است که بکارگیری تحریک کنندهٔ سریع دارای ولتاژ سقف بالا و مجهز به PSS به افزایش پایداری کلی سیستم کمک می‌کند.

مثال ۱۳ ـ ۳

برای سیستم درنظر گرفته شده در مثال ۱۳ ـ ۲، دقت و پایداری عددی صورت گیلِ روش R−Kی مرتبهٔ چهارم و قاعدهٔ ذوزنقه‌ای را بررسی کنید. مسأله را با PSS و AVR، و خطای رفع شده در ۰/۰۷ ثانیه درنظر بگیرید.



شکل ۱۳ ـ ۷ م (ج) پاسخ ولتاژ پایانه با خطای رفع شده در ۰/۰۷ ثانیه



شکل ۱۳ ـ ۷ م (د) پاسخ ولتاژ خروجی تحریک کننده با خطای رفع شده در ۰/۰۷ ثانیه

جدول ۱۳ ـ ۱ م دقت نتایج به دست آمده با روش R-K

زمان (ثانیه)	زاویهٔ روتور (درجه)		خطای جمع‌شده (درجه)
	$\Delta t = ۰/۰۱\ s$	$\Delta t = ۰/۰۲\ s$	
۱/۴	۱۱۰/۴۵۷۷	۱۱۰/۴۶۰۷	−۰/۰۰۰۲
۱/۶	۸۷/۲۸۰۱	۸۷/۱۵۷۵	+۰/۰۰۸۲
۱/۸	۵۸/۷۶۹۶	۵۸/۶۷۰۹	+۰/۰۰۶۶
۲/۰	۶۳/۷۳۳۷	۶۴/۱۷۵۲	−۰/۰۲۹۴
۲/۲	۸۴/۸۰۱۶	۸۵/۴۳۶۲	−۰/۰۴۲۳
۲/۴	۹۰/۵۶۵۳	۹۰/۵۲۹۲	+۰/۰۰۲۴
۲/۶	۷۹/۵۲۳۱	۷۸/۹۶۵۹	+۰/۰۳۷۱
۲/۸	۷۰/۰۹۰۰	۶۹/۹۴۶۵	+۰/۰۰۹۶
۳/۰	۷۳/۵۲۹۶	۷۳/۹۳۷۰	−۰/۰۲۷۲
۳/۲	۸۱/۱۶۹۴	۸۱/۴۳۴۲	−۰/۰۱۷۶
۳/۴	۸۲/۵۹۰۷	۸۲/۳۸۶۲	+۰/۰۱۳۶
۳/۶	۷۸/۲۷۶۳	۷۷/۹۷۳۵	+۰/۰۲۰۲
۳/۸	۷۵/۳۶۰۱	۷۵/۳۹۴۷	−۰/۰۰۲۳
۴/۰	۷۶/۹۴۷۹	۷۷/۱۹۳۸	−۰/۰۱۶۴
۴/۲	۷۹/۵۸۴۷	۷۹/۶۶۶۹	−۰/۰۰۵۵
۴/۴	۷۹/۷۸۴۳	۷۹/۶۳۷۸	+۰/۰۰۹۸
۴/۶	۷۸/۱۵۳۱	۷۸/۰۲۵۰	+۰/۰۰۸۵
۴/۸	۷۷/۲۸۳۵	۷۷/۳۳۵۷	−۰/۰۰۳۵
۵/۰	۷۷/۹۷۰۹	۷۸/۰۸۸۳	−۰/۰۰۷۸

$$\text{خطای جمع‌شده} = \frac{۱}{۱۵}\left[\delta(\Delta t = ۰/۰۱) - \delta(\Delta t = ۰/۰۲)\right]$$

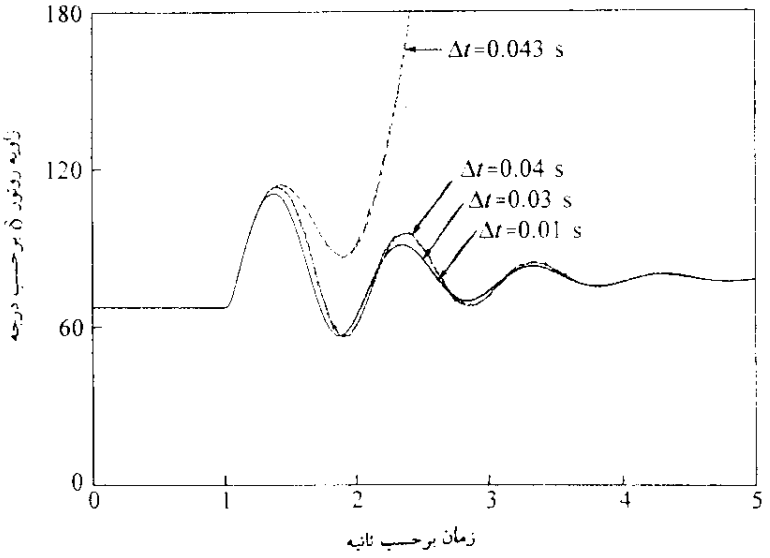
قاعدهٔ ذوزنقه‌ای. نتایج به دست آمده با اندازه‌های گام ۰/۰۱ ثانیه، ۰/۰۵۹ ثانیه، ۰/۰۹ ثانیه و ۰/۰۹۳ ثانیه در شکل ۱۳ ـ ۱۰ م نشان داده شده است.

با اندازه‌های گام ۰/۰۱ ثانیه و ۰/۰۵۹ ثانیه، نتایج عملاً یکسان است. با افزایش اندازهٔ گام به ۰/۰۹ ثانیه، خطای زیادی به وجود می‌آید. لیکن، مشخّصه‌های عمومی پاسخ کلّی همچنان باقی مانده‌اند. با اندازهٔ گام ۰/۰۹۳ ثانیه، خطاها چنان بزرگ می‌شوند که پاسخ بعد از ۱/۷ ثانیه به مقایر بسیار بزرگی می‌رسد.

حل

سیستم درنظر گرفته شده در این مثال، اثر دینامیک مدار روتور و تحریک کنندهٔ سریع با PSS را نیز شامل می‌شود. همان‌طور که از مقادیر ویژهٔ محاسبه شده در مثال ۱۲ ـ ۵ م از فصل دوازدهم (جدول ۱۲ ـ ۲ م) مشهود است، سیستم بسیار سخت است.

روش $R-K$. شکل ۱۳ ـ ۹ م نمودارهای پاسخهای گذرای زاویهٔ روتور را که با چهار گام زمانی (Δt) متفاوت: ۰/۰۱ ثانیه، ۰/۰۳ ثانیه، ۰/۰۴ ثانیه و ۰/۰۴۳ ثانیه، محاسبه شده، نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ ـ ۹ م اثر اندازهٔ گام انتگرالگیری بر نتایج روش R-K

با گامهای زمانی ۰/۰۱ ثانیه و ۰/۰۳ ثانیه، نتایج عملاً یکسان است. با افزایش گام زمانی به ۰/۰۴ ثانیه، خطاها زیاد خواهند شد. با گام زمانی ۰/۰۴۳ ثانیه، پاسخ ناپایدار عددی است.

در جدول ۱۳ ـ ۱ م، دقت نتایج به دست آمده با روش R-K، با اعمال فرمول ریچاردسون (معادلهٔ ۱۳ ـ ۸) به نتایج به دست آمده با گامهای زمانی ۰/۰۱ ثانیه و ۰/۰۲ ثانیه، بررسی شده است. اندازهٔ خطا هیچگاه از °۰/۰۵ بیشتر نمی‌شود. جدول، نحوهٔ انتشار خطا را نشان می‌دهد. واضح است که خطای جمع شده به طور متناوب بین مقادیر مثبت و منفی نوسان می‌کند.

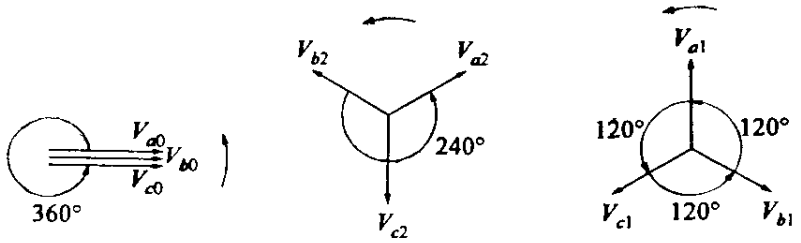
در سیستم سه‌فاز می‌توان مجموعه‌ای از سه فازورهای نامتعادل را به صورت زیر به سه سیستم متعادلِ فازوری تجزیه کرد:

الف) مؤلفه‌های توالی مثبت[1]. شامل سیستمی متعادل از سه فازور که دارای توالی فاز یکسان همانند فازورهای اصلی هستند؛

ب) مؤلفه‌های توالی منفی[2]. شامل سیستمی متعادل از سه فازور که دارای توالی فاز مخالف فازورهای اصلی هستند؛

ج) مؤلفه‌های توالی صفر[3]. شامل سه فازور مساوی هم از نظر دامنه و هم فاز.

شکل ۱۳ ـ ۱۳ سه مجموعه از فازورهای متعادل را نشان می‌دهد که مؤلفه‌های متقارن سه فازور نامتعادل را تشکیل می‌دهند.



الف) مؤلفه‌های توالی مثبت

$V_{b۱} = a^۲ V_{a۱}$

$V_{c۱} = a V_{a۱}$

(نشان داده شده با زیرنویس ۱)

ب) مؤلفه‌های توالی منفی

$V_{b۲} = a V_{a۲}$

$V_{c۲} = a^۲ V_{a۲}$

(نشان داده شده با زیرنویس ۲)

ج) مؤلفه‌های توالی صفر

$V_{b۰} = V_{a۰}$

$= V_{c۰}$

(نشان داده شده با زیرنویس ۰)

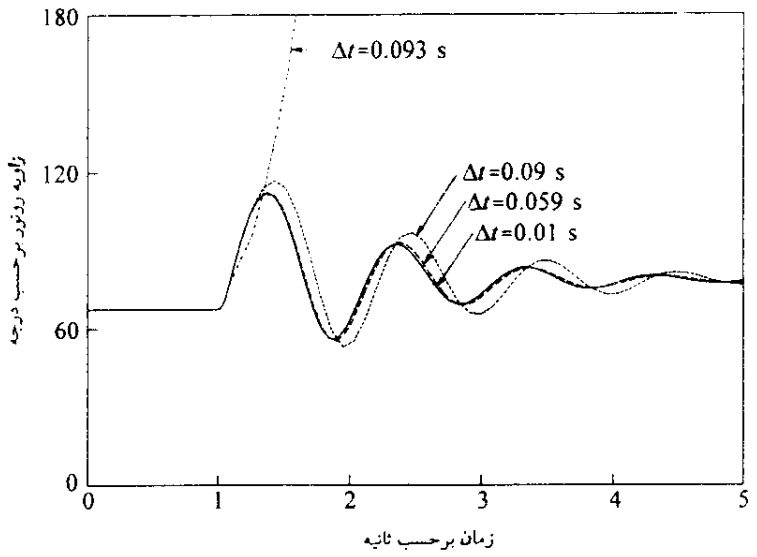
شکل ۱۳ ـ ۱۳ مؤلفه‌های متقارن سه فازور متعادل

تعریف عملگر a

عملگر a انتقال فاز °۱۲۰ را نشان می‌دهد. این عملگر برابر با بردار واحد $e^{j۱۲۰°}$ است. باتوجه به اینکه $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$، بردار واحدِ نشان‌دهندهٔ a به صورت زیر داده می‌شود:

$$a = e^{j۱۲۰°} = \cos ۱۲۰° + j \sin ۱۲۰°$$
$$= -۰/۵ + j\, ۰/۸۶۶$$

1. Positive - Sequence Components
2. Negative - Sequence Components
3. Zero - Sequence Components



شکل ۱۳ ـ ۱۰ م اثر اندازهٔ گام بر نتایج قاعدهٔ ذوزنقه‌ای

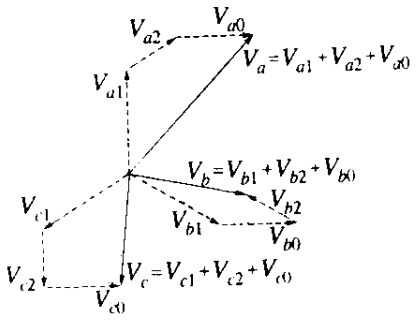
۱۳ ـ ۴ تحلیل خطاهای نامتعادل

تاکنون تنها عملکرد متعادل سیستم قدرت را درنظر گرفته‌ایم؛ با این فرض، تحلیل عملکرد سیستم با حل متغیرها در تنها یکی از فازها مشابه مدارهای تکفاز، امکان‌پذیر شد. حل مدارهای سه فازِ نامتعادل این ساده‌سازی را اجازه نمی‌دهد. می‌توان از یک نمایش سه فاز به جای نمایش به کار گرفته شده، استفاده کرد. لیکن این کار به میزان زیادی مسأله را مشکل می‌کند. از این‌رو روش مؤلفه‌های متقارن، به علت اینکه سادگی زیادی را در تحلیل مسائل پایداری سیستم قدرت با خطاهای نامتعادل به همراه دارد، ترجیح داده می‌شود.

۱۳ ـ ۴ ـ ۱ مقدمه‌ای بر مؤلفه‌های متقارن [۱۵ ـ ۱۸]

مفهوم کلی مؤلفه‌های متقارن را نخستین بار سی . ال . فورتسکیو[1] در سال ۱۹۱۸ میلادی مطرح کرد [۱۹]. او نشان داد که یک سیستم نامتعادل متشکل از n فازورِ به هم مرتبط را می‌توان به n سیستم متشکل از فازورهای متعادل به نام مؤلفه‌های متقارنِ فازورهای اصلی تجزیه کرد.

1. C. L. Fortescue



شکل ۱۳ ـ ۱۴ مجموعهٔ نامتعادل فازورهای دوباره تشکیل شده از مؤلفه‌های توالی

تبدیلهای مشابهی نیز به جریانها اعمال می‌شود. مجموع جریانهای سه خط با جریان خنثی، مساوی است. بنابراین:

$$\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c = \mathbf{I}_n \qquad (۷۲ - ۱۳)$$

از این‌رو:

$$\mathbf{I}_n = ۳\,\mathbf{I}_{a۰} \qquad (۷۳ - ۱۳)$$

اثر تبدیل بر امپدانسها

امپدانسهای عناصر سیستم، معادلهٔ زیر را برآورده می‌سازند:

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{Z}_{abc}\,\mathbf{I}_{abc} \qquad (۷۴ - ۱۳)$$

که در آن $\mathbf{Z}_{abc}$ ماتریس امپدانس است که امپدانسهای خودی و متقابل در بین فازها را می‌دهد.

با استفاده از تبدیل معادلهٔ ۱۳ ـ ۷۰، معادلهٔ ۱۳ ـ ۷۴ را می‌توان برحسب مؤلفه‌های توالی ولتاژها و جریانها بیان کرد:

$$\mathbf{T}\mathbf{V}_{۰۱۲} = \mathbf{Z}_{abc}\,\mathbf{T}\mathbf{I}_{۰۱۲} \qquad (۷۵ - ۱۳)$$

یا:

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_{۰۱۲} &= \mathbf{T}^{-۱}\,\mathbf{Z}_{abc}\,\mathbf{T}\,\mathbf{I}_{۰۱۲}\\ &= \mathbf{Z}_{۰۱۲}\,\mathbf{I}_{۰۱۲}\end{aligned} \qquad (۷۶ - ۱۳)$$

عملگرهای a^2 و a^3 به ترتیب، انتقالهای فاز °۲۴۰ و °۳۶۰ را نشان می‌دهند. از این‌رو می‌توان نوشت:

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -0/5 - j\,0/866$$

و:

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1/0 + j\,0/0$$

رابطهٔ بین فازورهای اولیهٔ نامتعادل و مؤلفه‌ها متقارن آنها

ولتاژ کل هر فاز مساوی است با مجموع مؤلفه‌های متناظر از توالیهای متفاوت در آن فاز. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ &= a^2 V_{a1} + aV_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \\ &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \end{aligned} \qquad (۶۸ - ۱۳)$$

و یا به صورت ماتریسی؛

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} \qquad (۶۹ - ۱۳)$$

یا:

$$V_{abc} = TV_{012} \qquad (۷۰ - ۱۳)$$

شکل ۱۳ ـ ۱۴ ترکیب مجموعه‌ای از سه فازور نامتعادل را برحسب معادلات بالا، به صورت ترسیمی نشان می‌دهد.

تبدیل معکوس به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \qquad (۷۱ - ۱۳)$$

و یا بازکردن یک فاز.

از آنجا که در سیستم متقارن، هیچ تداخلی بین کمیتها از توالی‌های متفاوت وجود ندارد، جریانهای هر توالی را می‌توان چنان درنظر گرفت که فقط در شبکهٔ مستقلِ متناظر با آن توالی جریان داشته باشند. به مدار معادل تکفاز تشکیل شده از امپدانسها به جریانهای هر توالی، شبکهٔ توالی[1] برای آن توالی خاص گفته می‌شود. به منظور تحلیل عملکرد سیستم در جایی که خطای نامتعادلی وجود دارد، و برای نمایش تداخل بین کمیتهای متفاوت ناشی از عدم تعادلِ حاصل از خطا، شبکه‌های توالی به هم متصل می‌شوند.

تجزیه مسأله به مؤلفه‌های توالی مزیت دیگری نیز دارد و آن این است که *کمیتها را به مؤلفه‌هایی تجزیه می‌کند که معیار بهتری از عوامل کنترل‌کننده را در بعضی پدیده‌ها نمایش می‌دهند*. برای مثال، در بررسیهای پایداری، نیروی سنکرونیزه‌کننده بین ماشینها به‌طور عمده از کمیتهای توالی مثبت تأثیر می‌پذیرند. اثر گرمایی ناشی از جریانهای نامتعادل به جریانهای توالی منفی بستگی دارد، و رله‌های زمین و پدیده‌های مربوط به زمین کردن به صورت تنگاتنگی با مؤلفه‌های توالیِ صفر ارتباط دارند. بنابراین، تحلیل بسیاری از مسائل نه تنها ساده‌تر است، بلکه نتایج به عواملی تجزیه می‌شود که می‌توانند به طور مجزا مورد مطالعه قرار گیرند.

امپدانسهای توالی

هنگامی که فقط جریانهای توالیِ مثبت جاری باشند، امپدانس مدار را امپدانس به جریانهای توالی‌مثبت یا *امپدانس توالی مثبت*[2] می‌نامند. به طور مشابه، امپدانس به جریانهای توالی منفی را *امپدانس توالی منفی*[3] و امپدانس به جریانهای توالی صفر را *امپدانس توالی صفر*[4] می‌نامند.

اطلاع از امپدانسهای توان عناصر سیستم قدرت در تحلیل عملکرد سیستم حین بروز خطاهای نامتعادل بسیار مهم است.

۱۳ - ۴ - ۲ امپدانسهای توالی ماشینهای سنکرون [۱۵]

امپدانس توالی مثبت

در بخش ۱۳-۳-۲، نمایش تفصیلی ماشینهای سنکرون را در شبکهٔ توالی مثبتِ مناسب برای مطالعات پایداری بررسی کردیم. چنان مدلی برای تمام دورهٔ مطالعه شامل زیرگذرا، گذرا و حالت ماندگا، دقیق است.

1. Sequence Network
2. Positive - Sequence Impedance
3. Negative - Sequence Impedance
4. Zero - Sequence Impedance

برای سیستمهای قدرت نوعی، Z_{abc} قطری نیست لیکن *تقارنهای خاصی* را داراست. این تقارنها به گونه‌ای است که ماتریس امپدانس توالی Z_{012}، دقیقاً یا تقریباً *قطری* است. امپدانسهای توالیِ انواع مختلف عناصر سیستم در بخش ۱۳-۴-۲ بحث خواهد شد.

توصیف توان برحسب مؤلفه‌های توالی

توان سه فاز مختلط به صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{aligned} S_{3phase} &= V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \\ &= \mathbf{V}_{abc}^T \mathbf{I}_{abc}^* \\ &= (\mathbf{T}\mathbf{V}_{012})^T (\mathbf{T}\mathbf{I}_{012})^* \\ &= \mathbf{V}_{012}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T}^* \mathbf{I}_{012}^* \\ &= 3\, \mathbf{V}_{012}^T \mathbf{I}_{012}^* \\ &= 3\,(\mathbf{V}_{a0} \mathbf{I}_{a0}^* + \mathbf{V}_{a1} \mathbf{I}_{a1}^* + \mathbf{V}_{a2} \mathbf{I}_{a2}^*) \end{aligned} \qquad (۱۳ - ۷۷)$$

در بالا، جریانها مقادیرِ خط و ولتاژها مقادیر خط به خنثی هستند. توجه کنید که هیچ جمله یا مؤلفهٔ «تقاطعی»[1] ناشی از تداخل بین ولتاژهای یک توالی و جریانهای توالی دیگر وجود ندارد. هنگامی که برحسب ۹ مؤلفه فکر کنیم حضور ضریب ۳ در معادله، منطقی به نظر می‌رسد که همچنین بدان معناست که تبدیل، تغییرناپذیر توان نمی‌باشد.

چرا مؤلفه‌های متقارن؟

تجزیهٔ سه فازور نامتعادل به مؤلفه‌های متقارن به سه سیستم متعادل منجر می‌شود. در سیستمهای قدرت متقارن (سیستمهایی که در آنها سه فاز، یکسان هستند)، جریانها و ولتاژهای توالی متفاوت، یکدیگر را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند و به عبارت دیگر، جریانهای یک توالی تنها افتهای ولتاژی از توالی همانند را القاء می‌کنند.

از سوی دیگر در عمل بیشتر ابزار بکار گرفته شده از نوع متقارن هستند. که به ساده سازی فراوانی در بسیاری از مسائل نامتعادل منجر می‌شود، از قبیل مسائل ناشی از خطاهای نامتعادل

1. Cross term or Component

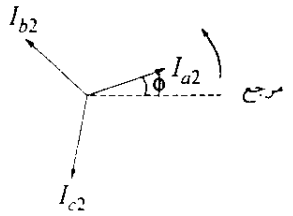
بسته به آنکه آیا جریانهای سینوسی درگردش هستند یا ولتاژهای سینوسی اعمال شده‌اند منجر می‌شود.

با درنظر گرفتن زمان برحسب ثانیه، جریانهای توالی منفی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$i_{a۲} = I_{a۲}\cos(\omega t + \phi)$$

$$i_{b۲} = I_{a۲}\cos\left(\omega t + \phi + \frac{۲\pi}{۳}\right)$$

$$i_{c۲} = I_{a۲}\cos\left(\omega t + \phi - \frac{۲\pi}{۳}\right)$$



از تبدیل به مؤلفه‌های d، q، ۰ (فصل ۳، بخش ۳ ـ ۳ را ببینید)، داریم:

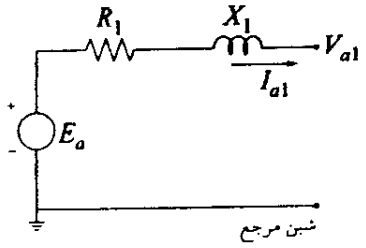
$$i_d = I_{a۲}\cos(۲\omega t + \phi)$$
$$i_q = -I_{a۲}\sin(۲\omega t + \phi)$$
$$i_۰ = ۰$$

میدان حاصل از جریانهای توالی منفی استاتور، با سرعت سنکرون و مخالف جهت روتور می‌چرخد. بنابراین، همان‌طور که از روتور مشاهده می‌شود، جریانهای استاتور به صورت جریانهای با فرکانس دو برابر i_d و i_q ظاهر می‌شوند. جریانهایی با دو برابر فرکانس نامی در مدارهای روتور القاء می‌شوند و شاردورهای مدارهای روتور را تقریباً ثابت نگه می‌دارند (زیرا مقاومت به میزان زیادی کمتر از اندوکتانس است). شارِ ناشی از جریانهای استاتور، به اجبار به مسیرهایی با رلوکتانس زیاد، که با هیچ مدار روتوری ارتباط برقرار نمی‌کند، رانده می‌شود. این مسیرهای شار همانند آنهایی هستند که در محاسبهٔ اندوکتانسهای زیرگذرا با آنها مواجه شدیم. بنابراین، مؤلفه‌های محور d و qی جریانهای استاتور در فرکانس ۱۲۰ هرتز با اندوکتانسهای زیرگذرای L''_d و L''_q (فصل ۴، بخش ۴ ـ ۲ را ببینید) مواجه می‌شوند. شاردورهای متناظر استاتور در مبنای واحد عبارت است از:

$$\psi_d = -L''_d i_d = -X''_d i_d$$
$$\psi_q = -L''_q i_q = -X''_q i_q$$

با نادیده گرفتن مقاومت استاتور، زمان t برحسب ثانیه و ω_r مساوی با ۱ pu، ولتاژهای استاتور

شکل ۱۳ ـ ۱۵ مدار معادل توالی مثبت ساده شدهٔ یک ماشین سنکرون را نشان می‌دهد. همان‌طور که در فصل پنجم (بخش ۵ ـ ۳ ـ ۳) بحث شد، مقدار *راکتانس توالی مثبتِ* X_1 به چارچوب زمانی موردعلاقه بستگی دارد: زیرگذرا، گذرا و حالت ماندگار.



شکل ۱۳ ـ ۱۵ مدار معادل توالی مثبت ماشین سنکرون

برای چارچوب زمانی نشان دهنده:

- شرایط زیرگذرای اولیه، $X_1 = X''_d$؛
- شرایط گذرای اولیه، $X_1 = X'_d$؛
- شرایط حالت ماندگار، $X_1 = X_d$.

شرایط بالا فرض می‌کنند که اثر برجستگی قطب قابل صرفنظرکردن است.

مقاومت توالی مثبت R_1، مقاومت جریان متناوب آرمیچر است.

مدار معادل شکل ۱۳ ـ ۱۵ یک فاز از مدارهای توالی مثبت متعادل را نمایش می‌دهد که شین مرجع آن، نقطهٔ خنثای ژنراتور است.

امپدانس توالی منفی

راکتانس توالی منفی (X_2). هنگامی که به سیم‌پیچهای آرمیچر یک ماشین، با روتور درحال کار در سرعت سنکرون و سیم‌پیچ تحریک اتصال کوتاه شده از طریق تحریک‌کننده، جریانهای توالی منفی (توالی معکوس فاز) با فرکانس اصلی اعمال شود، نسبت ولتاژهای فرکانس اصلی توالی منفی به جریانها، امپدانس توالی منفی را می‌دهد. قسمت راکتیو این امپدانس راکتانس توالی منفی X_2 است.

در آنچه به دنبال می‌آید، نشان خواهیم داد که راکتانس توالی منفی X_2 برابر با میانگینِ راکتانسهای زیرگذرای محور d و q، X''_d و X''_q است. اثر برجستگی قطب به مقادیر متفاوتی از X_2،

و به‌طور مشابه:

$$e_{b۲} = \frac{X''_d + X''_q}{۲} I_{a۲} \sin(\omega t + ۱۲۰° + \phi) + \frac{۳}{۲}(X''_d - X''_q) I_{a۲} \sin(۳\omega t + \phi)$$

$$e_{c۲} = \frac{X''_d + X''_q}{۲} I_{a۲} \sin(\omega t - ۱۲۰° + \phi) + \frac{۳}{۲}(X''_d - X''_q) I_{a۲} \sin(۳\omega t + \phi)$$

مشاهده می‌کنیم که ولتاژها یک مؤلفه توالی منفی از سومین هارمونیک دارند که تابعی از برجستگی قطب زیرگذرا ($X''_d - X''_q$) است. این مؤلفه، کوچک است و فقط در صورتی نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد که سیستم در نزدیکی این هارمونیک تشدید گردد. تا آنجا که به جریانهای توالی منفی فرکانس اصلی مربوط می‌شود، راکتانس مساوی با میانگین راکتانسهای زیرگذرا می‌باشد؛ یعنی:

$$X_۲ = \frac{X''_d + X''_q}{۲} \qquad (۷۸ - ۱۳)$$

از آنجا که موج mmf ناشی از جریانهای استاتور توالی منفی در دو برابر سرعت سنکرون نسبت به روتور حرکت می‌کند، به طور متناوب با رلاکتانس دو محور روتور متناظر با X''_d و X''_q برخورد می‌کند. از این‌رو مقدار $X_۲$ بین X''_d و X''_q قرار دارد. *با اعمال جریانهای توالی منفی سینوسی*، راکتانس توالی منفی، *میانگین حسابی*[1] X''_d و X''_q می‌باشد. این موضوع هنگامی اعمال می‌شود که مدار خارجی، یک راکتانس بزرگ به صورت سری داشته باشد.

اگر *ولتاژهای توالی منفی سینوسی* به استاتور اعمال شوند می‌توان نشان داد که جریانهای حاصل در سیم‌پیچهای استاتور دارای مؤلفهٔ فرکانس اصلی متناسب با: $۱/۲\,[۱/X''_d + ۱/X''_q]$ و مؤلفهٔ سومین هارمونیک متناسب با: $۳/۲\,[۱/X''_d - ۱/X''_q]$ می‌باشند. اگر فقط مؤلفهٔ اصلی درنظر گرفته شود، راکتانس توالی منفی مؤثر برابر است با:

$$X_۲ = ۲\frac{X''_d X''_q}{X''_d + X''_q} \qquad (۷۹ - ۱۳)$$

هنگامی که $X''_d = X''_q$ باشد، سومین هارمونیک هیچ مؤلفه‌ای ندارد. در این حالت، ولتاژها و جریانها تنها مؤلفه‌های فرکانس اصلی را خواهند داشت و $X_۲ = X''_d = X''_q$ است.

مقاومت توالی منفی ($R_۲$). توان مربوط به جریان توالی منفی را می‌توان به صورت حاصل‌ضرب مقدار یک مقاومت در مربع جریان بیان کرد. این مقاومت به عنوان مقاومت توالی

1. Arithmetic Mean

در مبنای واحد با معادلات زیر داده می‌شود:

$$e_d = \frac{1}{\omega_0}\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q$$

$$= \frac{1}{\omega_0}\frac{d}{dt}[-X''_d I_{a2}\cos(2\omega t + \phi)] - X''_q I_{a2}\sin(2\omega t + \phi)$$

$$= 2\frac{\omega}{\omega_0}X''_d I_{a2}\sin(2\omega t + \phi) - X''_q I_{a2}\sin(2\omega t + \phi)$$

برای جریانهای توالی منفی فرکانس اصلی، $\omega = \omega_0$ است. از این‌رو می‌توان نوشت:

$$e_d = (2X''_d - X''_q)I_{a2}\sin(2\omega_0 t + \phi)$$

و به‌طور مشابهی:

$$e_q = (2X''_q - X''_d)I_{a2}\cos(2\omega_0 t + \phi)$$

و:

$$e_0 = 0$$

ولتاژهای متناظر فاز (توالی منفی) را می‌توان با اعمال تبدیل معکوس پارک (فصل ۳، بخش ۳-۳ را ببینید) تعیین کرد:

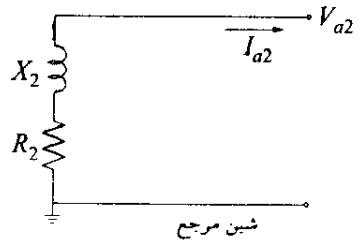
$$e_a = e_d\cos\theta + e_q(-\sin\theta) + e_0$$

با نشان دادن ولتاژ استاتور توالی منفی با e_{a2} و باتوجه به اینکه $\theta = \omega t$ است در سرعت سنکرون، داریم:

$$e_{a2} = e_d\cos(\omega t) - e_q\sin(\omega t) + 0$$

$$= \underbrace{\frac{X''_d + X''_q}{2}I_{a2}\sin(\omega t + \phi)}_{\text{فرکانس اصلی}} + \underbrace{\frac{3}{2}(X''_d - X''_q)I_{a2}\sin(3\omega t + \phi)}_{\text{سومین هارمونیک}}$$

می‌دهد. از آنجا که ولتاژهای تولید شده در ماشین فقط ناشی از توالی مثبت هستند، مدار معادل توالی منفی emf نخواهد داشت، لیکن با امپدانس ($R_2 + jX_2$) در مقابل ریزش جریانهای توالی منفی نشان داده می‌شود. شین مرجع مدار معادل، نقطهٔ خنثای ژنراتور است.



شکل ۱۳ ـ ۱۷ مدار معادل توالی منفی ماشین سنکرون

امپدانس توالی صفر. ماشین باید به شکل اتصال ستاره باشد در غیر این صورت، عبارت امپدانس توالی صفر مفهومی نخواهد داشت زیرا هیچ جریان توالی صفری نمی‌تواند جاری شود.

راکتانس توالی صفر (X_0). هنگامی که جریانهای توالی صفر به آرمیچر اعمال می‌شوند، مقادیر لحظه‌ای جریانها در هر سه فاز یکسان است. با سیم‌پیچهای کاملاً توزیع شدهٔ آرمیچر به گونه‌ای که هر فاز، یک توزیع فضایی سینوسی از mmf را تولید کند، میدان خالص تولید شده ناشی از سه فاز با جریانهای لحظه‌ای یکسان برابر با صفر است و هیچ شاری در طول فاصلهٔ هوایی تولید نمی‌شود و فقط راکتانس مربوط به هر سیم‌پیچ فاز، ناشی از شار نشتی شکاف[1] و شار نشتی انتهای سیم‌پیچ وجود دارد. لیکن در یک ماشین واقعی، توزیع سیم‌پیچی به شکل سینوسی ایده‌ال نیست و شار ناشی از سه فاز، مقدار کمی خواهد داشت. بنابراین X_0 واقعی کمی بالاتر از حالت ایده‌ال است و به ضرایب کمانه و پهنای[2] سیم‌پیچ بستگی دارد.

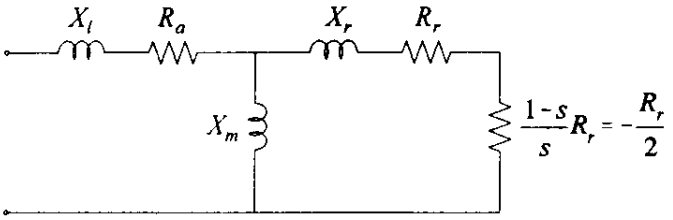
مقاومت توالی صفر (R_0). به دلایلی که در زیر می‌آید، مقاومت توالی صفر یک ماشین سنکرون از مقاومت توالی مثبت بزرگتر است:

توزیع فضایی سیم‌پیچهای استاتور معمولاً سینوسی خالص نیست، و هارمونیکهای بالاتری را نیز دربر می‌گیرند. سهم سومین هارمونیک فضایی در mmf ناشی از جریانهای استاتور

1. Slot 2. Breadth

منفی ($R_۲$) معرفی می‌گردد.

تا آنجا که به جریانهای استاتور توالی منفی مربوط می‌شود، مدارهای روتور به صورت سیستم پیچهای اتصال کوتاه ظاهر می‌شوند. این مسأله شبیه ماشین القایی است. بنابراین، طبیعت فیزیکی مقاومت توالی منفی به بهترین وجه با تحلیل عملکرد موتور القایی، مجسم می‌گردد. شکل ۱۳ ـ ۱۶ مدار معادل یک موتور القایی متقارن در هر دو محور را نشان می‌دهد. برای حالتی که عدم تقارن در دو محور وجود دارد، مدار میانگین دو محور را نشان می‌دهد. با جریانهای استاتور توالی منفی، لغزش برابر با ۲ است. بنابراین، مقاومت معادل نشان‌دهندهٔ انتقال توان از روتور به محور برابر با $-R_r/۲ = R_r(۱-s)/s$ است.



X_m = راکتانس مغناطیس کننده؛ X_l = راکتانس نشتی استاتور؛
X_r = راکتانس نشتی روتور؛ R_r = مقاومت روتور؛
R_a = مقاومت استاتور؛ s = لغزش،

شکل ۱۳ ـ ۱۶ مدار معادل موتور القایی

مجموع تلفات مسی روتور[1] با R_r نشان داده می‌شود. *نیمی از تلفات روتور از استاتور و نیمه دیگر از گشتاور محور (نشان داده شده با $-R_r/۲$) و از طریق روتور با تبدیل توان مکانیکی فراهم می‌شود.*

قسمت حقیقی امپدانس معادلی که از پایانه‌های استاتور مشاهده می‌شود، مقاومت توالی منفی $R_۲$ است. از آنجا که X_m بزرگ است، می‌توان از آن صرفنظر کرد. از این‌رو، داریم:

$$R_۲ \approx R_a + \frac{R_r}{۲} \qquad (۸۰ - ۱۳)$$

شکل ۱۳ ـ ۱۷ مدار معادل ماشین سنکرون را برای استفاده در شبکه‌های توالی منفی نشان

1. Copper Loss

POWEREN.IR

سنکرون نشان می‌دهد. مدار معادل (تکفاز) متناظر در شکل ۱۳ ـ ۱۸ «ب» نشان داده شده است.

امپدانس خنثی Z_n، جریانی برابر با مجموع جریانهای توالی صفر را در سه فاز حمل می‌کند. این موضوع در مدار معادل شکل ۱۳ ـ ۱۸ «ب» به صورت $3Z_n$ آورده شده است، که تنها یک فاز را نشان می‌دهد. شین مرجع برای مدار معادل توالی صفر زمینِ ژنراتور است. اگر نقطهٔ خنثی از زمین جداسازی شود، $Z_n = \infty$ و $I_{a0} = 0$ خواهند بود.

۱۳ ـ ۴ ـ ۳ امپدانسهای توالی خطوط انتقال

امپدانسهای توالی مثبت و منفی

در مدارهای استاتیک سه فاز متقارن، امپدانسهای توالی مثبت و منفی یکسانند زیرا امپدانس هر مدار مستقل از ترتیب فاز ولتاژهای اعمالی است. بنابراین مدارهای معادل خطوط انتقال مطرح شده در فصل ششم، به هر دو شبکهٔ توالی مثبت و توالی منفی قابل اعمال می‌باشد.

امپدانس توالی صفر

هنگامی که فقط جریانهای توالی صفر در خط انتقال جریان دارد، جریانهای هر سه فاز یکسان هستند. مجموع این جریانها از طریق زمین و یا سیستمهای زمین ـ هوایی باز می‌گردند. از آنجا که جریانهای سه فاز همفاز هستند، میدان مغناطیسی تولید شده با میدان مغناطیسی ناشی از جریانهای توالی مثبت یا منفی، بسیار متفاوت است. از این‌رو لازم است به توزیع جریان در زمین توجه شود. اثر کلی این موضوع آن است که راکتانس توالی صفر خطوط انتقال به ۲ تا ۳ برابر مقدار راکتانس توالی مثبت می‌رسد [۱۵ ـ ۱۷].

جریانهای توالی صفر که از طریق زمین جریان پیدا می‌کنند به افت ولتاژ ناشی از امپدانس زمین منجر می‌شود. بدیهی است زمین لزوماً در کلیهٔ نقاط، هم پتانسیل نیست. شین مرجع شبکهٔ توالی صفر پتانسیل زمین را در یک نقطهٔ خاص نشان نمی‌دهد، لیکن مرجع زمین برای ولتاژهای توالی صفر از طریق سیستم می‌باشد. بنابراین، امپدانس‌های زمین و سیمهای زمین در امپدانسهای توالی صفرِ خطوط انتقال لحاظ می‌گردند. این موضوع تضمین می‌کند هنگامی که ولتاژهای توالی صفر پایانه به شین مرجع ارجاع می‌شود، مقادیر آن به طور صحیح داده شوند.

۱۳ ـ ۴ ـ ۴ امپدانسهای توالی ترانسفورمرها

امپدانسهای توالی مثبت و منفی

ترانسفورمرها، همانند خطوط انتقال، غیرچرخشی یا استاتیک هستند. با فرض وجود تقارن بین

i_a، i_b و i_c برابر است با:

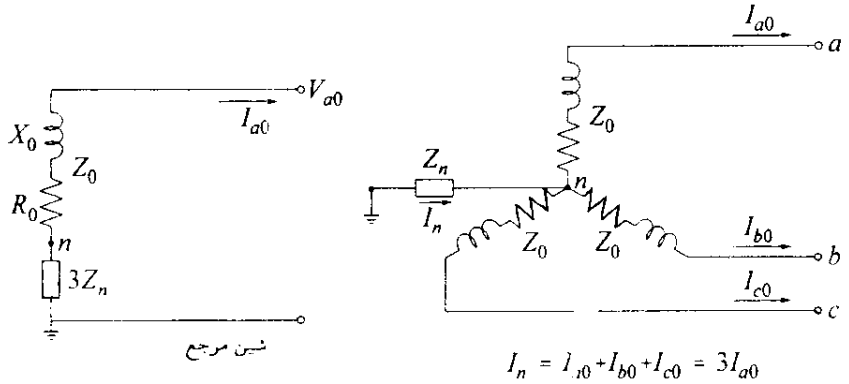
$$MMF = K\,[\,i_a \cos 3\theta + i_b \cos 3(\theta - 120^\circ) + i_c \cos 3(\theta + 120^\circ)\,]$$

هنگامی که جریانهای استاتور مجموعه‌ای متعادل مانند توالی منفی یا مثبت را تشکیل می‌دهند، mmf کلی ناشی از هارمونیکهای فضایی توزیع سیم‌پیچ برابر با صفر است. لیکن برای جریانهای توالی صفر، با $i_a = i_b = i_c = I_m \cos\omega t$ و حرکت روتور با سرعت سنکرون $(\theta = \omega t)$، mmf ناشی از توزیع فضایی سومین هارمونیک عبارت است از:

$$MMF = \frac{3}{2} I_m\,[\cos(3\theta + \omega t) + \cos(3\theta - \omega t)]$$
$$= \frac{3}{2} I_m\,[\cos(4\omega t) + \cos(2\omega t)]$$

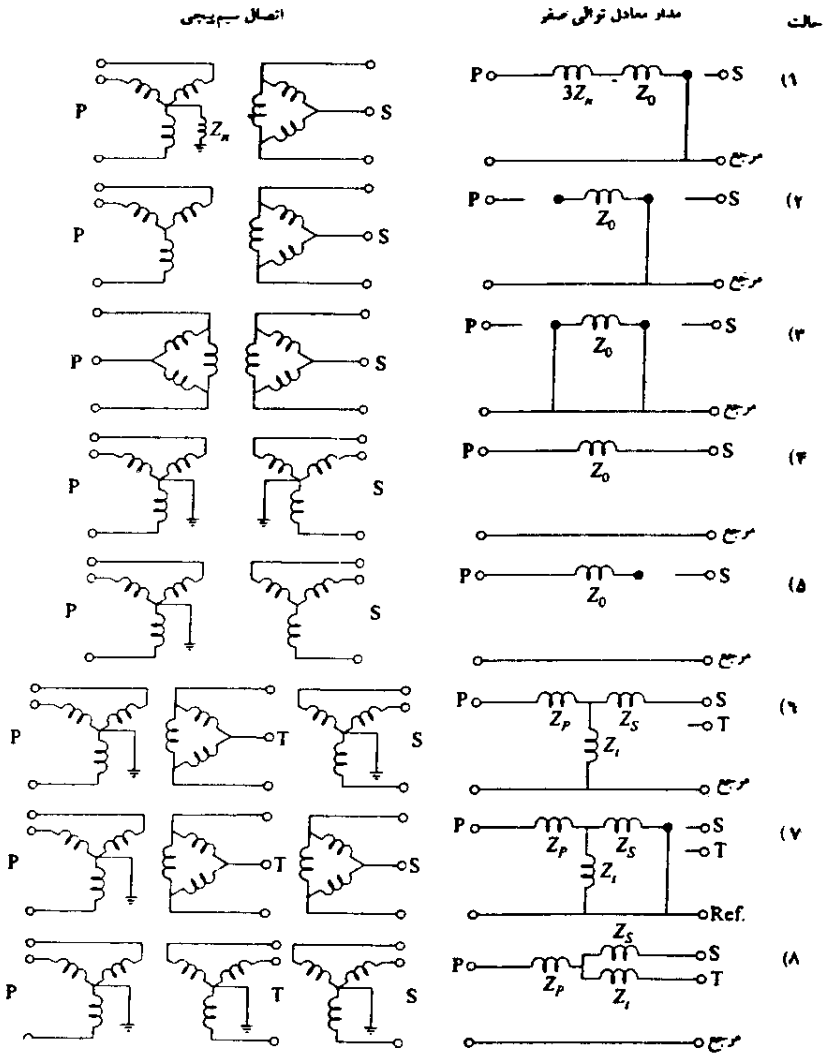
بنابراین mmf ناشی از سومین هارمونیک توزیع فضایی سیم‌پیچ، هنگامی که جریانهای توالی صفر در سیم‌پیچهای استاتور جریان پیدا می‌کند، از مؤلفه‌های دومین و چهارمین هارمونیک تشکیل می‌شود. که جریانهایی را در روتور القا کرده، موجب گرم شدن روتور می‌شوند. بنابراین، مقاومت توالی صفر (R_0) کمی بیشتر از مقاومت توالی مثبت (R_1) است اما اغلب تفاوت آنها معمولاً قابل توجه نیست.

شکل ۱۳ ـ ۱۸ «الف» عبور جریانهای توالی صفر را در سه فاز و نقطهٔ خنثای ماشین



(الف) مسیرهای جریان (ب) مدار معادل

شکل ۱۳ ـ ۱۸ مسیرهای جریان توالی صفر و مدار معادل ماشین سنکرون



شکل ۱۳ ـ ۱۹ معادل توالی صفر گروههای ترانسفورمر دو و سه سیم پیچه.

فازهای مختلف، امپدانس در مقابل جریانهای سه فازِ متعادل، به توالی فاز بستگی ندارد. بنابراین، مدارهای معادل و امپدانسهای خاص از فصل ششم برای ترانسفورمرهای دو و سه سیم‌پیچه به طور مساوی برای شبکه‌های توالی مثبت و توالی منفی نیز معتبر هستند.

امپدانسهای توالی صفر

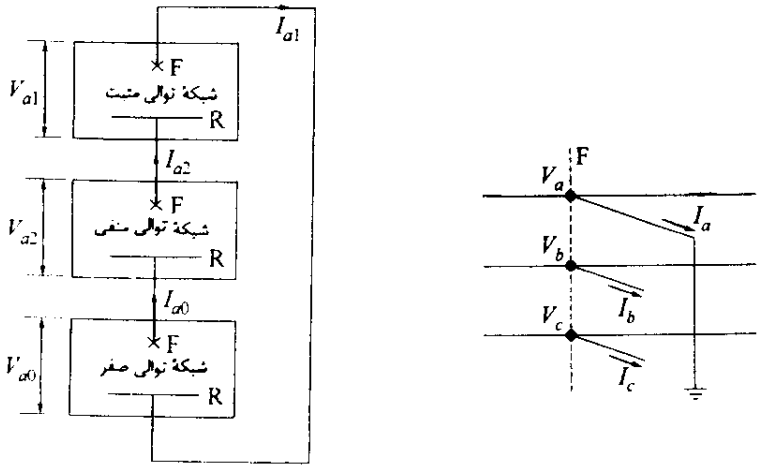
امپدانس ترانسفورمر به گذر جریان توالی صفر از اتصالات سیم‌پیچ بستگی دارد. شکل ۱۳ ـ ۱۹ مدارهای معادل توالی صفر را برای اتصالات سیم‌پیچی مختلف، قابل اعمال به ترانسفورمرهای دو و سه سیم‌پیچه نشان می‌دهد.

برای عبور جریانهای توالی صفر از طریق سیم‌پیچهای یک طرف ترانسفورمر و به داخل خطوط متصل، باید مسیری بازگشتی وجود داشته باشد تا از طریق آن یک مدار کامل به دست آید. به علاوه، باید مسیری برای جریان متناظر در سیم‌پیچهای ترویجی در طرف دیگر وجود داشته باشد.

به‌منظور نمایش، اتصالات سیم‌پیچی برای حالت ۱ در شکل ۱۳ ـ ۱۹ را درنظر بگیرید. سیم‌پیچهای اولیهٔ (P) به شکل ستاره متصل شده و نقطهٔ خنثی زمین شده است به گونه‌ای که راهی برای مسیر به زمین فراهم می‌کند. سیم‌پیچهای ثانویه (S) مسیری برای جریانهای توالی صفر، که در داخل Δ گردش می‌کند، فراهم می‌کند. که برای متعادل کردن جریانها در سیم‌پیچهای اولیه به کار می‌رود. لیکن، جریانهای توالی صفرِ گردش کننده در داخل سیم‌پیچهای ثانویه نمی‌توانند در خطوط متصل به آنها جریان پیدا کنند. امپدانس Z_0، مجموع راکتانسها و مقاومتهای سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه را به ازای هر فاز نشان می‌دهد و با امپدانس توالی مثبت برابر است. نقطهٔ خنثای مربوط به اولیهٔ اتصال ستاره از طریق امپدانس Z_n زمین شده است، بنابراین امپدانس توالی صفر مؤثر که از طرف اولیه مشاهده می‌شود برابر با $Z_0 + 3Z_n$ می‌باشد. چون مدار اتصال Δ هیچ مسیری برای جریانهای توالی صفرِ جاری در خط فراهم نمی‌کند، امپدانسی که از طرف ثانویه مشاهده می‌شود بینهایت است.

اگر سیم‌پیچهای یک طرف به شکل اتصال ستاره با نقطهٔ خنثای زمین نشده باشند (مشابه حالتهای ۲ و ۵)، جریانهای توالی صفر نمی‌توانند در سیم‌پیچهای طرف دیگر جریان پیدا کنند. لذا امپدانس توالی صفر، چه از طرف اولیه و چه از طرف ثانویه مشاهده شود بینهایت است.

حالتهای ۶ تا ۸ در شکل ۱۳ ـ ۱۹ ترانسفورمرهای سه سیم‌پیچه‌ای را نشان می‌دهد که اثر نشتیِ راکتانسها و مقاومتهای سه سیم‌پیچ با یک مدار معادل اتصال ستاره (فصل ۶ را ببینید) مدل شده است. مطابق شکل، اتصال این مدار معادل به پایانه‌های اولیه (P)، ثانویه (S) و ثالثیه



(الف) نمایش نمادین خطا (ب) اتصال شبکهٔ توالی

شکل ۱۳ ـ ۲۱ شبیه‌سازی خطای تکفاز خط به زمین

اتصال شبکه‌های توالی برای برآورده ساختن روابط بالا در شکل ۱۳ ـ ۲۱ «ب» نشان داده شده است. سه شبکه توالی در نقطهٔ خطا (F) و شین مرجع (R) از هر شبکهٔ توالی به هم متصل شده‌اند تا یک اتصال سری را تشکیل دهند.

ب) خطای خط به خط

از شکل ۱۳ ـ ۲۲ «الف»، داریم:

$$V_b = V_c \qquad I_a = 0 \qquad I_b + I_c = 0$$

برحسب مؤلفه‌های متقارن، می‌توان نوشت:

$$V_{a1} = V_{a2} \qquad I_{a1} + I_{a2} = 0 \qquad I_{a0} = 0$$

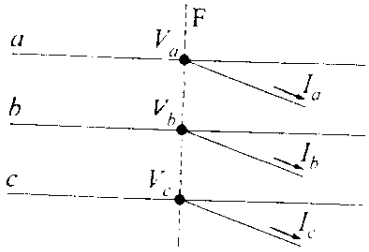
اتصال شبکهٔ توالی که روابط بالا را منعکس کند در شکل ۱۳ ـ ۲۲ «ب» نشان داده شده است. از آنجا که خطا زمین را دربر نمی‌گیرد، شبکهٔ توالی صفر غایب است.

(T)، و شین مرجع به اتصالات سیم‌پیچ بستگی دارد.

۱۳ ـ ۴ ـ ۵ شبیه‌سازی انواع مختلف خطا

در این بخش، شبیه‌سازی سیستم قدرتی را درنظر می‌گیریم که در عمل، متقارن است، ولی به علت خطایی که در موقعیت خاصی در سیستم رخ داده، نامتعادل شده است. چنین خطاهایی را می‌توان با اتصال مناسب شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر در محل خطا به صورت زیر، تحلیل کرد.

شکل ۱۳ ـ ۲۰، جریانهای خطا و ولتاژها را در موقعیت خطای F شناسایی می‌کند. *جریانهای جاری در خطا* ناشی از سه فاز a، b و c به ترتیب با I_a، I_b و I_c نشان داده شده است، V_a، V_b و V_c نیز *ولتاژ هر فاز را نسبت به زمین در F* نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ ـ ۲۰ معرفی جریانها و ولتاژهای خطا

الف) خطای تکفاز خط به زمین

فرض کنید همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۲۱ «الف» نشان داده شده است، فاز a در نقطهٔ F با زمین اتصال پیدا کرده است. از شکل مشاهده می‌کنیم که:

$$V_a = ۰ \quad , \quad I_b = I_c = ۰$$

برحسب مؤلفه‌های متقارن (معادلات ۱۳ ـ ۶۹ و ۱۳ ـ ۷۱ را ببینید)، داریم:

$$V_{a۱} + V_{a۲} + V_{a۰} = V_a = ۰$$

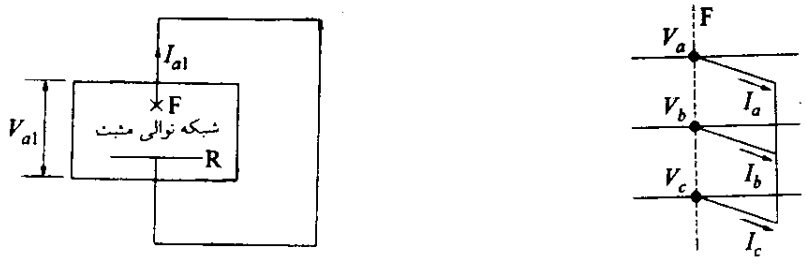
$$I_{a۱} = I_{a۲} = I_{a۰} = \frac{I_a}{۳}$$

د) خطای سه فاز

برای کامل کردن تصویری که از شبیه‌سازی انواع مختلف خطا برحسب شبکه‌های توالی داریم، خطای سه فاز متقارن را مطابق شکل ۱۳ ـ ۲۴ بررسی می‌کنیم.

از شکل ۱۳ ـ ۲۴ داریم:

$$V_a = V_b = V_c = 0$$
$$I_a + I_b + I_c = 0$$



(الف) نمایش نمادین خطا

(ب) اتصال شبکهٔ توالی

شکل ۱۳ ـ ۲۴ شبیه‌سازی خطای سه فاز

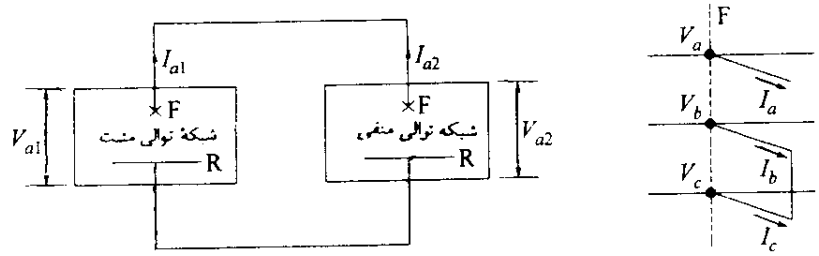
برحسب مؤلفه‌های متقارن، داریم:

$$I_{a0} = 0$$
$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} = 0$$

در اینجا emf‌های توالی صفر یا توالی منفی وجود ندارند، و ولتاژهای V_{a0} و V_{a2} هرکدام در نقطهٔ خطا F صفر هستند. بنابراین، جریانهای توالی صفر و منفی در هیچ جای سیستم، جریان ندارند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، تنها شبکهٔ توالی مثبت درگیر است. همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۲۴ «ب» نشان داده شده است، خطا با اتصال کوتاه کردن نقطهٔ خطا F و شین مرجع R شبکهٔ توالی مثبت شبیه‌سازی می‌شود.

تشکیل شبکه‌های توالی

از تحلیل بالا مشاهده می‌شود که می‌توان بروز خطا روی سیستم قدرت را به طور مناسبی با اتصال شبکه‌های توالی ـ سیستم تحلیل کرد. حل شبکهٔ حاصل، مؤلفه‌های متقارن ولتاژها و جریانهای داخل سیستم را به دست می‌دهد.



(الف) نمایش نمادین خطا (ب) اتصال شبکهٔ توالی

شکل ۱۳ ـ ۲۲ شبیه‌سازی خطای خط به خط

ج) خطای دو خط به زمین

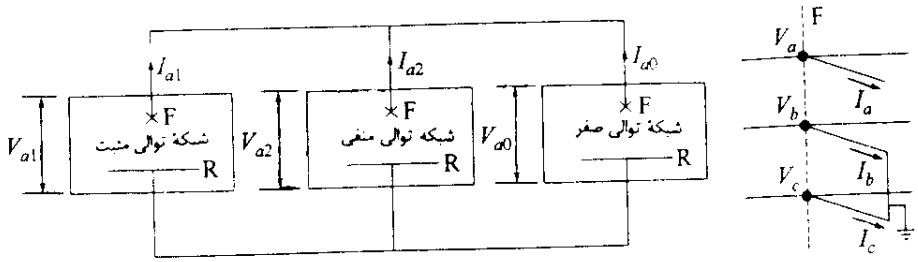
از شکل ۱۲ ـ ۲۳ «الف» داریم:

$$V_b = V_c = 0 \qquad I_a = 0$$

برحسب مؤلفه‌های متقارن، می‌توان نوشت:

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0}$$
$$I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0$$

اتصال شبکهٔ توالی متناظر در شکل ۱۳ ـ ۲۳ «ب» نشان داده شده است.



(الف) نمایش نمادین خطا (ب) اتصال شبکهٔ توالی

شکل ۱۳ ـ ۲۳ شبیه‌سازی خطای دو خط به زمین

نشان داده شده، وارد می‌گردد. این نمایش، ولتاژها و جریانهای صحیح را در شبکهٔ توالی مثبت نشان می‌دهد.

هیچ ولتاژ توالی منفی یا صفری در سیستم تولید نمی‌شود. جریانهای توالی منفی و توالی صفر که در حین خطاهای نامتعادل جاری می‌شوند، به وسیلهٔ منابع ولتاژ توالی مثبت تولید می‌شوند. خروجیهای توانِ توالی مثبت محاسبه شده، توان واقعی فراهم آمده توسط ماشینها را نمایش می‌دهند. که کلیهٔ تلفات مقاومتی الکتریکی توالی صفر و منفی را شامل می‌گردد.

گشتاور ترمزکنندهٔ توالی منفی

همان‌طور که در بخش ۱۳ ـ ۴ ـ ۲ توضیح داده شد، در ماشینهای سنکرون، فقط نیمی از تلفات روتور توالی منفی به طور الکتریکی تغذیه می‌شود. نیمهٔ دیگر به صورت مکانیکی با توان محور یا گشتاور تأمین می‌شود. این مؤلفه، مجموع گشتاور مکانیکی را که برای تأمین تلفات روتور تبدیل شده است نشان می‌دهد که برای کم کردن شتاب روتور عمل می‌کند و گشتاور ترمزکنندهٔ[1] توالی منفی نامیده می‌شود. ممکن است این اثر، برای ماشینهای نزدیک خطا مشهود باشد، خصوصاً ماشینهای با روتورهای صلب یا روتورهای قطب برجسته با سیم‌پیچهای میراکنندهٔ مقاومت زیاد. روش درنظرگرفتن این گشتاور ترمزکننده در اینجا توضیح داده می‌شود.

با مراجعه به شکل ۱۳ ـ ۱۶، با نادیده گرفتن راکتانس مغناطیس کنندهٔ X_m، گشتاور ترمزکنندهٔ توالی منفی برابر است با:

$$\begin{aligned} T_{b۲} &= \frac{R_r}{۲} I_{a۲}^{۲} \\ &= (R_۲ - R_a) I_{a۲}^{۲} \end{aligned} \qquad (۸۱ - ۱۳)$$

که در آن $R_۲$ مقاومت توالی منفی ماشین و R_a مقاومت استاتور آن است.

جریان توالی منفی ماشین $I_{a۲}$ را می‌توان از شبکهٔ توالی منفی آن تعیین کرد. بسته به ترکیب شبکه، $I_{a۲}$ را می‌توان به صورت کسری از جریان توالی مثبت ماشین تخمین زد [۲۰].

مجموع گشتاور شتاب‌دهنده که بر روتور عمل می‌کند برابر است با:

$$T_a = T_m - T_e - K_D \Delta\omega_r - T_{b۲}$$

1. Braking torque

سیستمهای توالی مثبت، منفی و صفر، سیستمهایی متقارن را نشان می‌دهند. بنابراین، هرکدام از این سیستمها را می‌توان با یک شبکه تکفازِ معادل نمایش داد. هر عنصر سیستم قدرت با مدلی، که به اندازهٔ کافی دقیق است نمایش داده می‌شود.

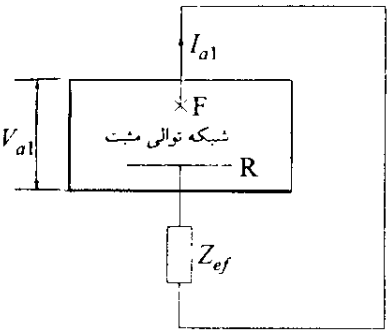
در هر شبکهٔ توالی، ولتاژهای توالی به شین مرجع شبکه (یا با پتانسیل صفر) رجوع داده می‌شود. در سیستمهای توالی مثبت یا منفی، کلیهٔ نقاط خنثی هم پتانسیل هستند. بنابراین، نقاط خنثای هرکدام از این سیستمها را می‌توان به یک شین مشترک، که شین مرجع (یا با پتانسیل صفر) برای شبکه توالیِ خودش است متصل کرد.

همچنان که قبلاً بیان شد، لزوماً کلیهٔ نقاط زمین هم پتانسیل نیستند. بنابراین، شین مرجع برای شبکه توالی صفر نشان‌دهندهٔ زمین در نقطهٔ بخصوصی نمی‌باشد. به جای آن، شین مرجع به عنوان مرجعی برای ولتاژهای توالی صفر در کلیهٔ نقاط سیستم عمل می‌کند. مدلهای تک‌تک وسایل چنان ساخته می‌شود تا ولتاژهای توالی صفر به زمین را هنگامی که به شین مرجع شبکه رجوع داده می‌شود، درست نمایش دهند.

نمایش در مطالعات پایداری

شبکهٔ توالی مثبت به طور تفصیلی با مدلهای وسایل (فصلهای ۳ تا ۱۱) نمایش داده شده است.

معمولاً در مطالعات پایداری، ولتاژها و جریانهای توالی منفی و توالی صفرِ سیستم اهمیت ندارند. بنابراین، شبیه‌سازی کامل شبکه‌های توالی منفی و صفر در شبیه‌سازیهای پایداری سیستم لزومی ندارد و می‌توان اثر آنها را با امپدانسهای معادل (Z_2 و Z_0)، همان‌طور که در نقطهٔ خطا F مشاهده‌می‌شود، نمایش داد. بسته به نوع خطا، این امپدانسها به طور مناسبی ترکیب شده و به صورت امپدانس خطای مؤثر Z_{ef} در شبکهٔ توالی مثبت، همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۲۵



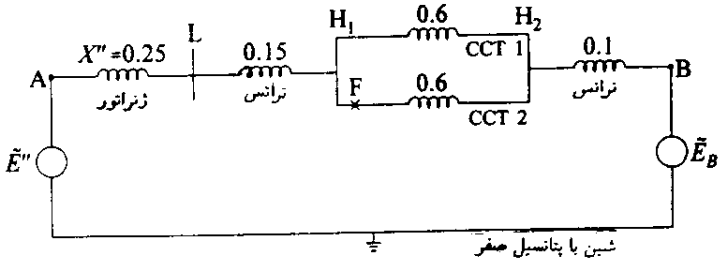
نوع خطا	Z_{ef}
خط به زمین	Z_2+Z_0
خط به خط	Z_2
دو خط به زمین	$\frac{Z_2Z_0}{Z_2+Z_0}$
سه فاز	0

شکل ۱۳ ـ ۲۵ نمایش خطاها در مطالعات پایداری سیستم

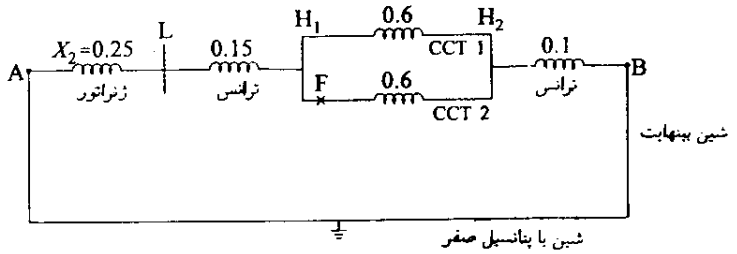
ب) اگر یک خطای خط به زمین یا خط به خط در نقطهٔ F رخ دهد، چه تغییراتی در نتایج بالا به وجود خواهد آمد؟

حل

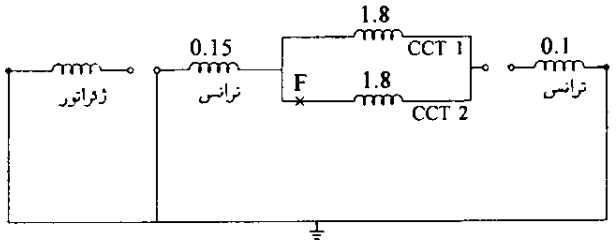
بلافاصله بعد از رخداد خطا، راکتانس مؤثر توالی مثبت ماشین عبارت است از $X'' = X''_d = X''_q$. سه شبکهٔ توالی سیستم در شکل ۱۳ ـ ۱۲ م نشان داده شده است. از آنجا که $X''_d = X''_q = X_2$ است، لذا



(الف) شبکه توالی مثبت



(ب) شبکه توالی منفی



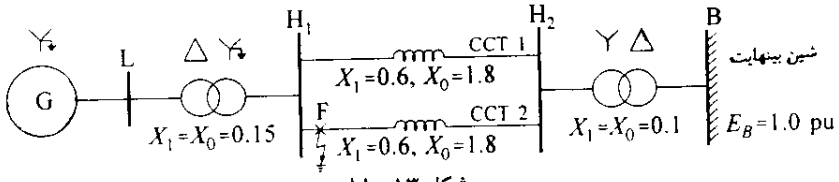
(ج) شبکه توالی صفر

شکل ۱۳ ـ ۱۲ م

معادلهٔ نوسان (معادلهٔ ۱۳ ـ ۲۲)، به طور مناسبی برای وارد کردن $T_{b۲}$ اصلاح شده است.

مثال ۱۳ ـ ۴

شکل ۱۳ ـ ۱۱ م، نمایش سیستم قابل اعمال به یک واحد تولیدی MVA ۱۰۰۰، KV ۲۰، Hz ۶۰ را نشان می‌دهد. داده‌های انتقالِ نشان داده شده بر روی شکل در مبنای واحد بر پایهٔ MVA ۱۰۰۰، KV ۲۰ است. مقاومتهای شبکه قابل صرفنظر کردن فرض شده‌اند.



شکل ۱۳ ـ ۱۱ م

داده‌های ژنراتور در مبنای واحد بر پایهٔ ظرفیت واحد به صورت زیر است:

$X_d = ۱/۸۱$	$X_q = ۱/۷۶$	$X'_d = ۰/۳$	$X'_q = ۰/۶۵$
$X''_d = X''_q = ۰/۲۵$	$X_۲ = ۰/۲۵$	$X_۰ = ۰/۰۴$	$R_a = ۰/۰۰۳$
$R_۲ = ۰/۰۶۳$	$R_۰ = ۰/۰۰۵$	$T'_{d۰} = ۸/۰$ (ثانیه)	$T'_{q۰} = ۱/۰$ (ثانیه)
$T''_{d۰} = ۰/۰۳$ (ثانیه)	$T''_{q۰} = ۰/۰۷$ (ثانیه)	$H = ۳/۵$	$K_D = ۰$

نقاط خنثای استاتور ژنراتور و سیم پیچهای فشار قوی ترانسفورمرِ بالابرنده به طور صلب، زمین شده‌اند. نقطهٔ خنثی سیم پیچ اتصال ستاره ترانسفورمر نزدیک شین بی‌نهایت زمین نشده است.

الف) مطابق شکل ۱۳ ـ ۱۱ م، یک *خطای* دو خط به زمین (LLG) بر روی مدار ۲ در نقطهٔ F رخ می‌دهد.

۱. با چشم‌پوشی از کلیهٔ مقاومتها، مقدار مؤثر امپدانس خطای Z_{eq} را بیابید، این مقدار نشان‌دهندهٔ خطای نامتعادل است، هنگامی که در شبکهٔ توالی مثبت وارد می‌شود.

۲. اگر وضعیت اولیهٔ خروجی ژنراتور برابر باشد با:

$$P_۰ = ۰ \quad Q_۰ = ۰ \quad E_t = ۱/۰$$

با صرفنظر کردن از مقاومت ژنراتور، بلافاصله بعد از رخداد خطا اندازهٔ جریانهای توالی مثبت، منفی و صفر را در شبکه محاسبه کنید.

۳. گشتاور ترمز کنندهٔ توالی منفی متناظر با شرط بالا را محاسبه کنید.

امپدانس خطاهای مؤثرِ نشان‌دهنده خطای G − L − L، عبارت است از:

$$Z_{ef} = \frac{Z_۲ Z_۰}{Z_۲ + Z_۰}$$

$$= \frac{j\,(۰/۲ \times ۰/۱۵)}{۰/۳۵}$$

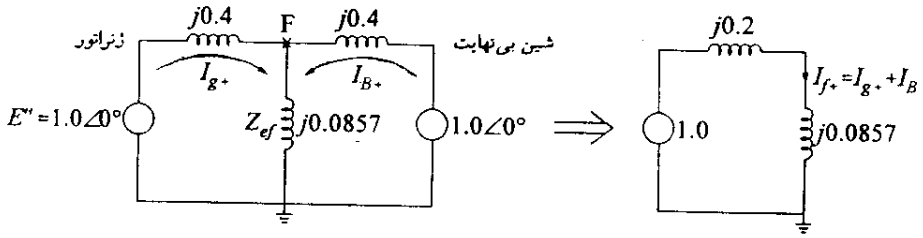
$$= j\,۰/۰۸۵۷ \qquad pu$$

۲. از آنجا که قبل از خطا، $P = Q = ۰$ است، می‌توان نوشت:

$$E'' = E_t = E_B = ۱/۰ \qquad Pu$$

شبکهٔ توالی مثبت با امپدانس خطای مؤثر وارد شده در F، به صورت نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۱۵ م «الف» تقلیل می‌یابد. به علت تقارن شبکه، پاسخ به میزان قابل توجهی ساده می‌شود. مؤلفهٔ توالی مثبت جریان خطا، عبارت است از:

$$I_{f^+} = \frac{۱/۰}{j\,۰/۲۸۵۷} = -j\,۳/۵ \quad pu$$



شکل ۱۳ ـ ۱۵ م «الف»

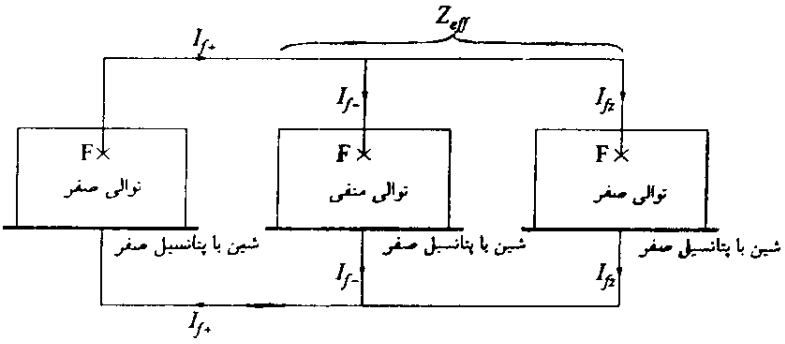
همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۱۵ م «ب» نشان داده شده است، مجموع جریان خطای توالی مثبت به مؤلفه‌های توالی منفی و صفر تقسیم می‌شود.

به علت تقارن شبکه در نقطهٔ F، نیمی از جریان خطا از هر مؤلفهٔ توالیِ ژنراتور جریان می‌یابد، و نیم دیگر از شین بینهایت. نظر به اتصالات سیم‌پیچ ترانسفورمر بالابرندهٔ ژنراتور، جریان توالی صفر به ترانسفورمر محدود می‌شود و لذا هیچ جریان توالی صفری از ژنراتور جریان نمی‌یابد. شکل ۱۳ ـ ۱۶ م عبور جریان در قسمتهای مختلف شبکه‌های توالی را نشان می‌دهد.

راکتانسهای توالی منفی و مثبت برای هر کدام از عناصرِ سیستم مساوی می‌باشد.

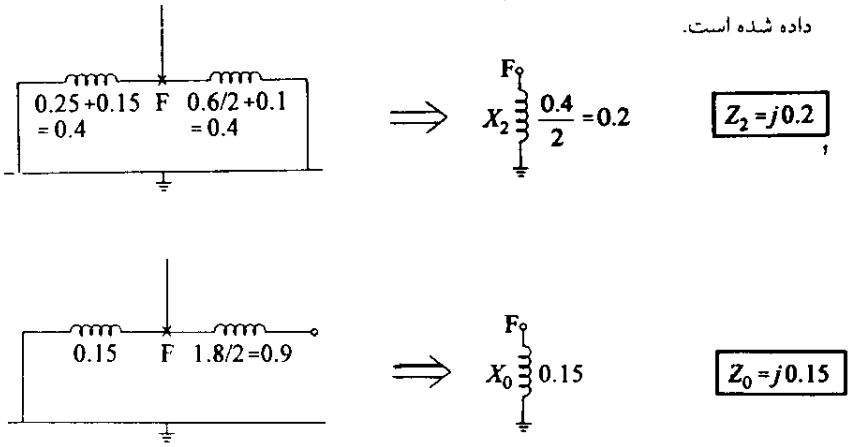
الف) خطای دو خط به زمین.

۱. هر شبکهٔ توالی، یک سیستم متعادل را نشان می‌دهد. اثر خروج از تعادل به واسطهٔ خطا در موقعیت F با وصل کردن شبکه‌های توالی، همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۱۳ م نشان داده شده، نمایش داده می‌شود.

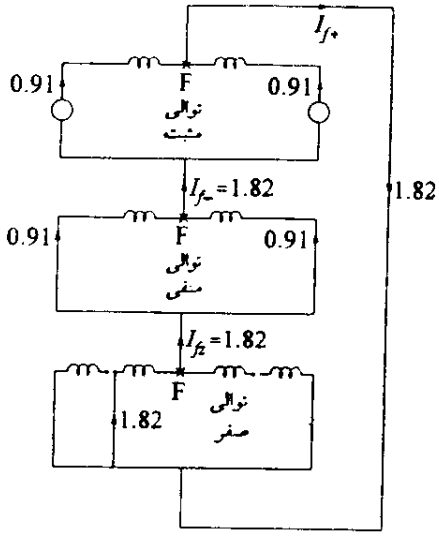


شکل ۱۳ ـ ۱۳ م

امپدانسهای توالی منفی و توالی صفرِ مؤثر اندازه‌گیری شده در نقطهٔ F، در شکل ۱۳ ـ ۱۴ م نشان داده شده است.



شکل ۱۳ ـ ۱۴ م



$$I_{f+} = I_{f-} = I_{f0}$$
$$= \frac{۱/۰}{z_۱ + z_۲ + z_۰}$$
$$= \frac{۱/۰}{j(۰/۲ + ۰/۲ + ۰/۱۵)}$$
$$= -j۱/۸۲pu$$

شکل ۱۳ ـ ۱۷ م

۳. گشتاور ترمز کنندهٔ توالی منفی برابر است با:

$$T_{b۲} = (R_۲ - R_a) I_۲^۲$$
$$= (۰/۰۶۳ - ۰/۰۰۳) ۰/۹۱^۲$$
$$= ۰/۰۵ \text{ pu}$$

خطای خط به خط.

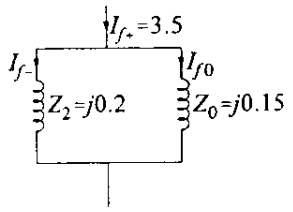
۱. امپدانس مؤثر خطا عبارت است از:

$$Z_{ef} = Z_۲ = j\,۰/۲$$

۲. شکل ۱۳ ـ ۱۸ م عبور جریان در شبکه‌های توالی را نشان می‌دهد.

۳. گشتاور ترمز کنندهٔ توالی منفی عبارت است از:

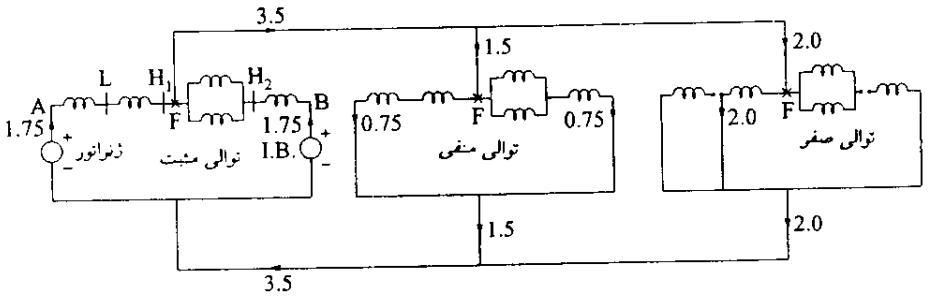
$$T_{b۲} = (R_۲ - R_a) I_۲^۲ = (۰/۰۶۳ - ۰/۰۰۳) ۱/۲۵^۲$$
$$= ۰/۰۹۴ \text{ pu}$$



$$I_{f-} = \frac{۰/۱۵ \times ۳/۵}{۰/۳۵} = ۱/۵ \text{ pu}$$

$$I_{f0} = I_{f+} - I_{f-} = ۳/۵ - ۱/۵ = ۲/۰ \text{ pu}$$

شکل ۱۳ ـ ۱۵ م «ب»



شکل ۱۳ ـ ۱۶ م

۳. گشتاور ترمز کنندهٔ توالی منفی به صورت زیر داده می‌شود:

$$T_{b۲} = (R_۲ - R_a) I_{g۲}^۲$$
$$= (۰/۰۶۳ - ۰/۰۰۳)\, ۰/۷۵^۲ = ۰/۰۳۴ \text{ pu}$$

ب) خطای خط به زمین.

۱. امپدانس خطای مؤثر عبارت است از:

$$Z_{ef} = Z_۲ + Z_۰ = j\,(۰/۲ + ۰/۱۵)$$
$$= j\,۰/۳۵ \text{ pu}$$

۲. شکل ۱۳ ـ ۱۷ م عبور جریان را در قسمتهای مختلف شبکه‌های دنباله نشان می‌دهد.

نشان می‌دهد. فرض کنید که v_a، v_b، و v_c به ترتیب افت ولتاژ در فازها بین X و Y در فازهای a، b، و c باشند؛ I_a، I_b و I_c نیز جریانهای خط هستند. از شکل ۱۳ ـ ۲۶ «الف» داریم:

$$v_b = v_c = 0 \quad I_a = 0$$

برحسب مؤلفه‌های متقارن، می‌توان نوشت:

$$v_{a1} = v_{a2} = v_{a0} = \frac{1}{3} v_a$$

$$I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0$$

اتصالات شبکه‌های توالی به‌منظور برآورده ساختن معادلات بالا در شکل ۱۳ ـ ۲۶ «ب» نشان داده شده‌اند.

ب) دو هادی باز

اکنون حالتی را با فازهای b و c باز بین نقاط X و Y، در نظر می‌گیریم، همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۲۷ «الف» نشان داده شده است. معادلات قابل اعمال عبارتند از:

$$v_a = 0 \quad I_b = I_c = 0$$

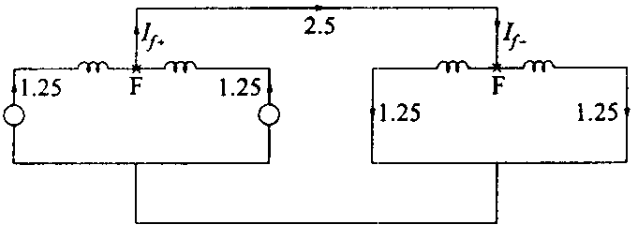
و برحسب مؤلفه‌های متقارن:

$$v_{a1} + v_{a2} + v_{a0} = 0$$
$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} I_a$$

اتصالات شبکه توالی که معادله‌های بالا را برآورده می‌سازند، در شکل ۱۳ ـ ۲۷ «ب» نشان داده شده است.

از شکل ۱۳ ـ ۲۶ مشاهده می‌کنیم که، برای حالت یک فاز مدار باز، سه شبکهٔ توالی به صورت موازی در نقاط x و y متصل می‌شوند؛ بنابراین حتی اگر مدار شبکهٔ صفر همانطور که از X و Y مشاهده می‌شود امپدانس بینهایت داشته باشد، مقداری توان از طریق خط بین X و Y منتقل خواهد شد.

برای حالتِ با دو فاز مدار باز، همانطور که در شکل ۱۳ ـ ۲۷ آمده است، سه شبکهٔ توالی به صورت سری متصل خواهند شد و هیچ توانی از طریق خط منتقل نخواهد شد، مگر آنکه مدار توالی صفر مسیری دارای امپدانس محدود را فراهم آورد.



$$I_{f+} = -I_{f-} = \frac{1.0}{Z_1 + Z_2}$$

$$= \frac{1.0}{j0.4} = -j2.5 \quad \text{pu}$$

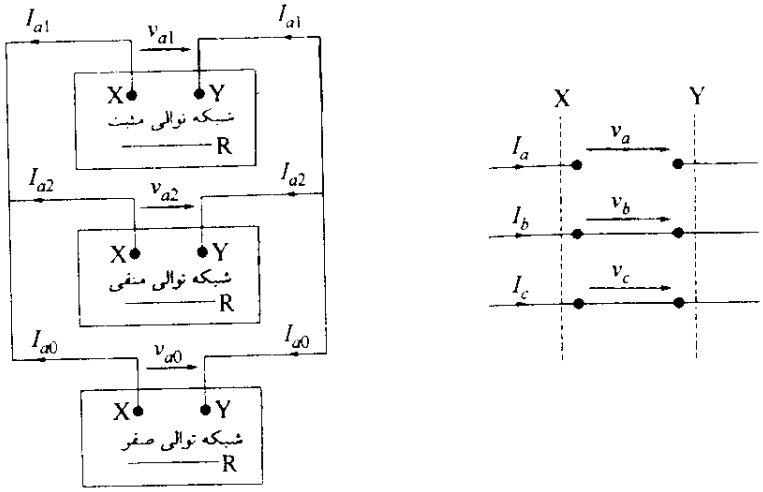
شکل ۱۳ ـ ۱۸ م

۱۳ ـ ۴ ـ ۶ نمایش شرایط هادی ـ باز

شرایط هادی ـ باز ممکن است به واسطهٔ هادیهای شکسته شده یا عملیات کلید زنی عمدی تکفاز ایجاد شود. چنین خطاهایی ممکن است شامل بازکردن یک یا دو فاز از یک مدار سه فاز باشد.

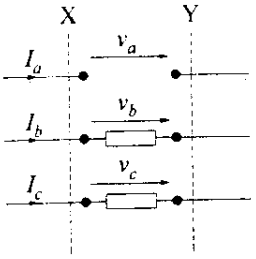
الف) یک هادی باز

شکل ۱۳ ـ ۲۶ «الف» قسمتی از یک سیستم سه فاز را با فاز a ی باز بین نقاط X و Y،



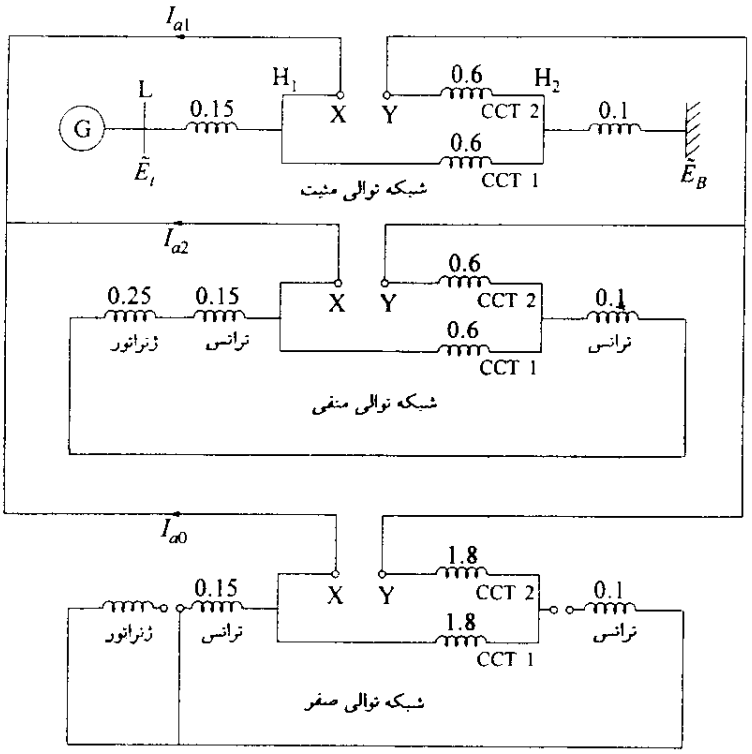
الف) نمایش نمادین ب) اتصال شبکه‌های توالی

شکل ۱۳ ـ ۲۶ شبیه‌سازی موقعیت هادی ـ باز

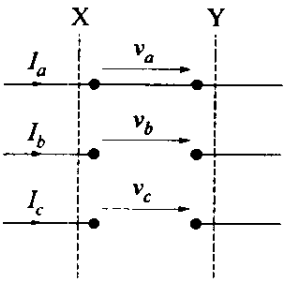


شکل ۱۳ ـ ۱۹ م

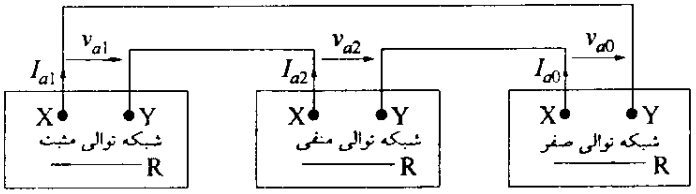
شکل ۱۳ ـ ۲۰ م، شبکه‌های توالی سیستم شکل ۱۳ ـ ۱۱ م و اتصالات آنها را برای نمایش حالتی که یک فاز از مدار ۲ در هر دو سر باز باشد نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ ـ ۲۰ م



(الف) نمایش نمادین



(ب) اتصال شبکه‌های توالی

شکل ۱۳ ـ ۲۷ شبیه‌سازی موقعیت دو هادی باز

مثال ۱۳ ـ ۵

سیستم نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۱۱ م (مثال ۱۳ ـ ۴) تحت یک خطای تک خط به زمین در نقطهٔ F بر روی مدار ۲ قرار گرفته است. خطا با کلیدزنی که هادی خطادار را به طور همزمان از دو سر قطع می‌کند، رفع شده است. نشان دهید چگونه می‌توان شبکه را در مطالعات پایداری، حین دوره‌ای که یک هادی از مدار ۲ خارج شده است، نمایش داد.

حل

وضعیت این مثال با آنچه در شکل ۱۳ ـ ۲۶ آورده شده است، اندکی متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۱۹ م نشان داده شده، باید امپدانسهای هادیها را از فازهای b و c در نظر گرفت. که با وارد کردن امپدانسهای متناظر با مدار ۲ در شبکه‌های توالی به دست می‌آید.

۱۳ ـ ۵ عملکرد رله‌های حفاظتی

رله‌های حفاظتی وجود وضعیت غیر عادی سیستم را با زیر نظر داشتن کمیتهای مناسب آن آشکار می‌کنند و تعیین می‌کنند که کدام کلید مدار باید باز شود، و نیز مدارهای عمل آن کلیدها را انرژی‌دار می‌کنند. برای آنکه رله‌ها وظیفهٔ خود را به صورت رضایتبخشی انجام دهند، باید سه شرط اساسی را برآورده سازند: حُسن انتخاب[1]، سرعت و قابلیت اعتماد.

چون پایداری گذرا مربوط به توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرونیزم به هنگام اغتشاش شدید است، عملکرد مطلوب برخی از سیستمهای حفاظتی دارای اهمیت بسزایی در تضمین پایداری سیستم است. رله‌های حفاظتی باید بتوانند بین حالت خطا، نوسانهای پایدار توان و حالت عدم همگامی، تفاوت قائل شوند. در حالی که رله‌ها باید عملیات کلیدزنی را برای رفع عناصر خطادار آغاز کنند، مهم است که در حین نوسانهای پایدار توان تضمین شود که عملیات حفاظتی دیگری وجود ندارد که باعث باز کردن بی‌مورد عناصر بدون خطا شود. جدا کردن عناصر بدون خطا، سیستم را بیش از پیش ضعیف می‌کند و ممکن است به ناپایداری آن منجر شو.

از طرف دیگر، اگر سیستم ناپایدار باشد باید بدانیم چگونه جدا می‌شود و آیا نقطهٔ جداسازی مورد قبول است یا نه. برای این کار ممکن است عملیات رله‌ای خاصی لازم باشد تا جداسازی مطلوب را نتیجه دهد.

بنابراین یکی از جنبه‌های مهم تحلیل پایداری گذرا، ارزیابی عملکرد سیستمهای حفاظتی، خصوصاً عملکرد رله‌های به کار گرفته شده برای حفاظت خطوط انتقال و ژنراتورها حین دورهٔ گذرا می‌باشد.

۱۳ ـ ۵ ـ ۱ حفاظت خط انتقال [۲۱ ـ ۲۳]

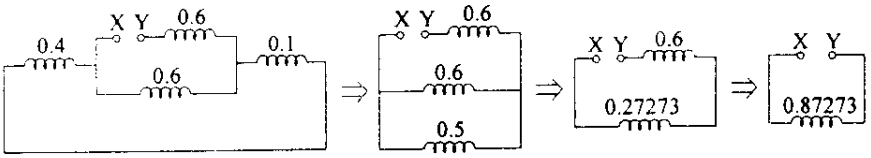
طراحیهاو تجربیات متنوعی از حفاظت خط وجود دارند که شرکتهای مختلف برای برآورده کردن نیازمندیهای خاص از آنها استفاده می‌کنند. عوامل زیر بر انتخاب طرح حفاظتی تأثیر می‌گذارند:

- نوع مدار: تک خط، خط موازی، چند پایانه‌ای، دامنهٔ جریانهای ورودی به خطا و غیره؛
- وظیفهٔ خط: تأثیر آن بر پیوستگی سرویس، سرعتی که با آن خطا باید رفع شود؛
- ملاحظات هماهنگی[2] و تطابق[3].

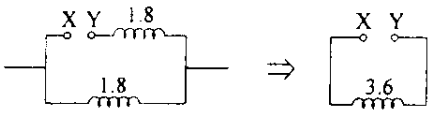
سه نوع اساسی طرحهای رله‌ای برای حفاظت خط به کار گرفته شده است: الف) رلهٔ اضافه جریان[4]، ب) رلهٔ دیستانس[5]، ج) رلهٔ پیلوت[6] [۲۲].

---

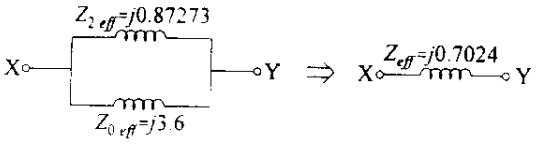
1. Selectivity
2. Coordination
3. Matching
4. Overcurrent Relaying
5. Distance Relaying
6. Pilot Relaying



(الف) تقلیل شبکه توالی منفی



(ب) تقلیل شبکه توالی صفر



(ج) مجموع امپدانس سری موثر

شکل ۱۳ ـ ۲۱ م تقلیل شبکه‌های توالی منفی و صفر

همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۲۱ م نشان داده شده است، امپدانسهای توالی منفی و صفر مؤثر که از نقاط X و Y مشاهده می‌شوند، عبارتند از:

$$Z_{۲eff} = j\,۰/۸۷۲۷۳ \quad pu$$

$$Z_{۰eff} = j\,۳/۶ \quad pu$$

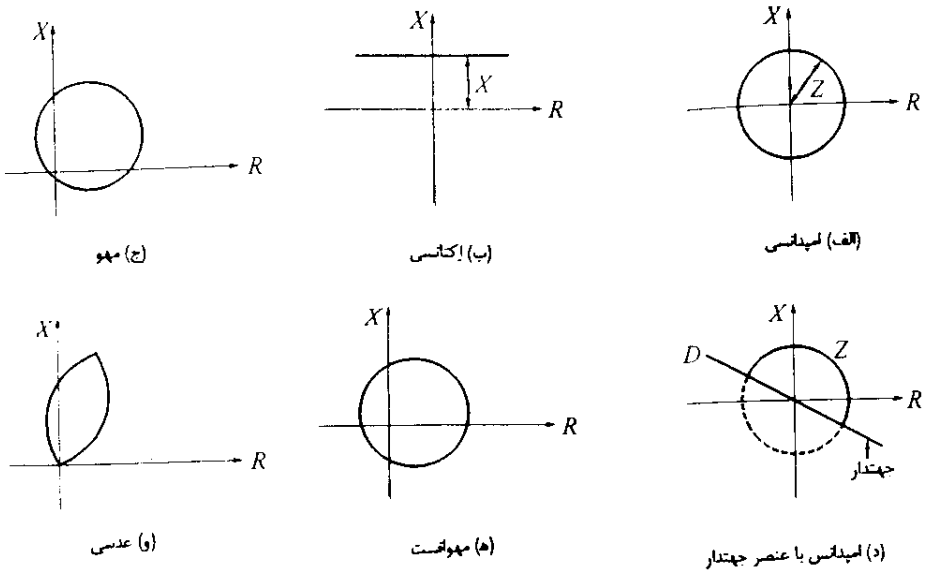
و امپدانس مؤثر کلی که باید بین دو نقطهٔ X و Y از شبکهٔ توالی مثبت وارد شود، برابر است با:

$$Z_{eff} = j\,۰/۷۰۲۴ \quad pu$$

بنابراین، از دیدگاه انتقال قدرت بین ژنراتور و شین بینهایت، اثر باز کردن یک فاز از مدار ۲ همانند افزایش راکتانس مدار به اندازهٔ pu ۰/۷۰۲۴ است.

- رلهٔ مهو[1]؛
- رله‌های اصلاح شدهٔ مهو و امپدانسی، و ترکیبهای آنها.

مشخصه‌های راه‌اندازی[2] رله‌های دیستانس را می‌توان بسادگی، مطابق شکل ۱۳ ـ ۲۸ بر روی صفحهٔ امپدانس مختلط (R−X) نشان داد. مشخصهٔ امپدانسی، دایره‌ای بر روی صفحهٔ R−X، مشخصهٔ راکتانسی خطی افقی بر روی صفحهٔ R−X است و مشخصهٔ مهو خطی مستقیم بر روی صفحه G−B (ادمیتانس)، و دایره‌ای در مبدأ بر روی صفحهٔ R−X (امپدانس) است. هنگامی که امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله در داخل مشخصه می‌افتد، رله عمل می‌کند.



شکل ۱۳ ـ ۲۸ مشخصه‌های رلهٔ دیستانس نمایش داده شده بر روی یک سیستم مختصات با مقاومت (R) به عنوان محور طولی و راکتانس (X) به عنوان محور عرضی.

مشخصهٔ مهو ذاتاً جهتدار[3] است؛ به عبارت دیگر، فقط در یک جهت خطا را آشکار می‌کند. در مقابل، مشخصه‌های راکتانسی و امپدانسی خطا را در هر چهار ربع شناسایی می‌کنند. بنابراین، عموماً نوعی نظارت جهتدار نیز با این رله‌ها به کار گرفته می‌شود. معمولاً از ترکیبهایی

1. Mho 2. Triggering 3. Directional

الف) رلهٔ اضافه جریان

استفاده از رلهٔ اضافه جریان ساده‌ترین و ارزانترین صورت حفاظت خط است. در این کاربرد، دو نوع اساسی از رله‌ها به کار گرفته می‌شوند: رلهٔ اضافه جریان لحظه‌ای[1] و رلهٔ اضافه جریان زمانی[2]. هنگامی که هماهنگی، انتخاب و سرعت مهم است، کاربرد این رله‌ها مشکل است. با تغییر ترکیب سیستم، معمولاً تغییراتی در درجهٔ تنظیم آنها لازم می‌باشد [۲۲].

رلهٔ اضافه جریان نمی‌تواند بین جریانهای بار و خطا تمایز قائل شود. بنابراین، هرگاه برای حفاظت خطای فاز[3] به کار گرفته می‌شود، تنها هنگامی قابل اعمال است که جریان خطای حداقل از جریان بار کامل[4] بیشتر باشد.

از این رله به طور عمده در سیستمهای زیر انتقال[5] و سیستمهای توزیع شعاعی[6] استفاده می‌شود. زیرا معمولاً در چنین سیستمهایی، خطا بر پایداری سیستم اثر ندارد و حفاظت با سرعت بالا مورد نیاز نمی‌باشد.

برای فائق آمدن بر محدودیتهای بالا طرحهای مربوط به رلهٔ اضافه جریان، که کانالهای ارتباطی را برای تبادل اخبار بین پستهای پایانه به کار می‌گیرند، ساخته شده‌اند. دو طرحی که از سایر طرحها متداولتر هستند، طرحهای رلهٔ سیمی پیلوت[7] و رلهٔ مقایسهٔ فاز[8] می‌باشد.

ب) رلهٔ دیستانس

رلهٔ دیستانس به نسبتی از ولتاژ به جریان اندازه‌گیری شده پاسخ می‌دهد. اگر این نسبت که نشان‌دهندهٔ امپدانس مؤثر شبکه است، کمتر از درجهٔ تنظیم رله باشد رله عمل می‌کند. امپدانس مقیاسی از فاصله در طول خط انتقال است و بنابراین، رله را رلهٔ دیستانس می‌نامند.

استفاده از امپدانس راهی عالی را برای به دست آوردن تمایز و انتخاب، با محدود کردن عملیات رله به گسترهٔ معینی از امپدانس فراهم می‌آورد. صورتهای مختلف رله‌های دیستانس عبارتند از:

- رلهٔ امپدانسی؛
- رلهٔ راکتانسی؛

1. Instantaneous Overcurrent Relay
2. Time Overcurrent Relay
3. Phase - Fault Protection
4. Full Load
5. Subtransmission Systems
6. Radial Distribution Systems
7. Pilot wire relaying
8. phase - comparison relaying

ناحیه نسبت به خط **AB** اضافه پوشانی دارند و برای خطاهای بخشی از خط مجاور **CD** عمل می‌کنند، چنان تنظیم شده‌اند که بعد از گذشت زمان تأخیر (معمولاً ۰/۳ تا ۰/۵ ثانیه) عمل کنند و بدین وسیله زمان هماهنگی با رله‌های اولین ناحیه در **C** که خط مجاور **CD** را محافظت می‌کنند، فراهم می‌آورند.

رله‌های سومین ناحیه در **A**، *حفاظت پشتیبان*[1] را برای خط مجاور **CD** فراهم می‌کنند. و چنان تنظیم شده‌اند تا به ورای خط **CD** دسترسی داشته باشند، و از این رو عمل رله برای خطاهای روی خط حتمی خواهد بود. هماهنگی زمانی با حفاظت اولیهٔ خط **CD**، با داشتن زمان تأخیری در حدود ۲ ثانیه برای حفاظت سومین ناحیه به دست می‌آید.

یک طرح حفاظتیِ مشابه **A** در **B** نیز ایجاد می‌شود. با این تفاوت که به گونه‌ای تنظیم می‌شود تا به جهت مخالف دسترسی داشته باشد. از این رو خطایی بر روی خط **AB** کلیدها را در هر دو سرِ خط باز می‌کند.

علاوه بر این باید خطاهای سه فاز، فاز به فاز، فاز به زمین، و دو فاز به زمین با رله‌ها پوشانده شوند و این موضوع تعداد رله‌ها در هر دو سر خط را تعیین می‌کند. معمولاً از دو مجموعه رله استفاده می‌شود: یک مجموعه برای خطاهای فاز و دیگری برای خطاهای زمین.

رله‌های نوع راکتانسی برای خطوط کوتاه، و رله‌های نوع مهو برای خطوط طولانی استفاده می‌شوند. رله‌های نوع لنز[2] هنگامی استفاده می‌شود که به محدود کردن منطقهٔ عمل واحدهای مهو برای حفاظت خطوط طولانی نیاز باشد.

رلهٔ دیستانس مستقیم[3] حفاظت کافی را برای بسیاری از حالتها فراهم می‌کند. لیکن، هنگامی که برای حفظ پایداری به عمل سرعت بالای رله به طور همزمان در هر دو سر خط نیاز باشد، عملکرد آن رضایتبخش نیست. طرحهای رله‌ای پیلوت، که در ادامه توصیف می‌شود، برای چنین کاربردهایی مناسبتر است.

ج) طرحهای رله‌ای پیلوت

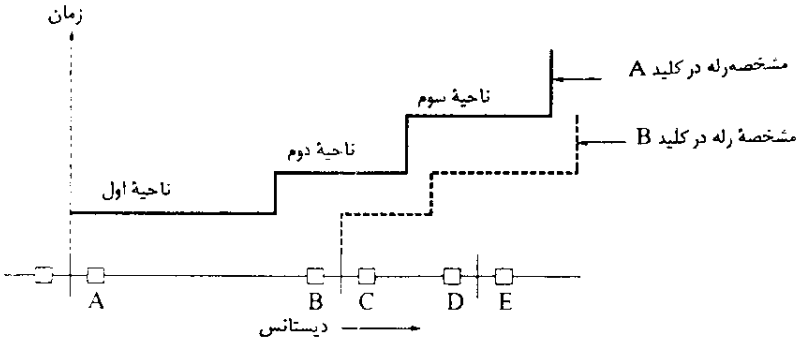
طرحهای رله‌ای پیلوت، از کانالهای مخابراتی (پیلوت) بین پایانه‌های خطی که از آن محافظت می‌کنند، استفاده می‌کنند. رله‌های مستقر در هر یک از پایانه‌ها تعیین می‌کنند که آیا خطا برای خط حفاظت شده داخلی است یا خارجی، و این اطلاعات از طریق کانال مخابراتی بین پایانه‌های خط انتقال داده می‌شود. برای خطای داخلی، کلیدها در کلیهٔ پایانه‌های خط حفاظت

1. Backup Protection
2. Lens
3. Straight - Distance Relaying

از عناصر همانند با درجات تنظیم مختلف و یا عناصر با مشخصه‌های مختلف برای فراهم آوردن حُسن انتخاب و هماهنگی استفاده می‌شود.

رلهٔ دیستانس رایجترین صورت حفاظت برای خطوط انتقال است. این نوع حفاظت بسادگی قابل اعمال و هماهنگی است، حفاظت سریع را فراهم می‌آورد و کمتر تحت تأثیر تغییراتِ سیستم قرار می‌گیرد.

شکل ۱۳ ـ ۲۹ بکارگیری رلهٔ دیستانس را نشان می‌دهد. در هر طرف خط، سه مجموعهٔ جداگانه از رله‌ها برای فراهم آوردن سه ناحیهٔ حفاظتی[1] به صورت نشان داده شده، مرتب شده‌اند. اولین و دومین ناحیهٔ حفاظتی، *حفاظت اولیه*[2] را برای خط حفاظت شده فراهم می‌کنند و سومین ناحیه، پشتیبان راه دور[3] را برای خط مجاور تأمین می‌کند.

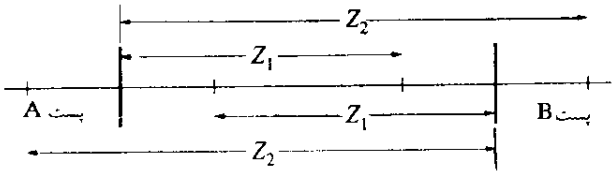


شکل ۱۳ ـ ۲۹ مشخصهٔ رلهٔ دیستانس

برای مثال، رله‌های اولین ناحیه در **A** برای حفاظت حدود ۸۰٪ از خط **AB** بدون تأخیر زمانی تنظیم شده‌اند. چنین عملی، حفاظت سریع از بخشی از خط را با حدود ۲۰٪ حاشیهٔ امنیت فراهم می‌آورد تا بدین ترتیب از عملیات ناصحیح رله که ممکن است به واسطهٔ خطاهای وسایل برای خطاهای بعد از اتمام بخش خط رخ دهد، اجتناب شود.

رله‌های دومین ناحیه در **A** برای دسترسی به بعد از پایان خط تنظیم شده‌اند و تنظیم نوعی آن در حدود ۱۲۰٪ امپدانس خط حفاظت شدهٔ **AB** است. این روش، حفاظتِ ۲۰٪ باقیماندهٔ خط را که با رله‌های اولین ناحیه محافظت نمی‌شوند، تضمین می‌کند. چون رله‌های دومین

1. Protective Zone 2. Primary Protection 3. Remote Backup



شکل ۱۳ ـ ۳۰ رلهٔ پوشانی اجازه دهنده

هر پست پایانهٔ خط، رله‌های زیر را دارد:

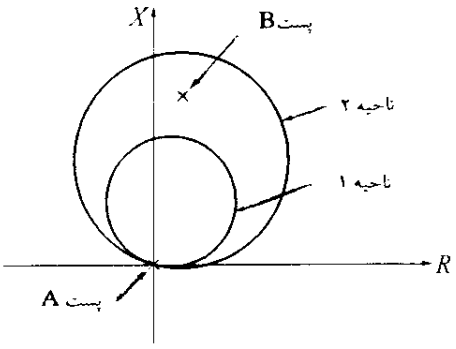
● رله‌های دیستانسی جهتدار زمین و فاز مربوط به *ناحیهٔ کمبود پوشانی*[1]، پوشانندهٔ حدود ۸۰٪ از امپدانس خط حفاظت شده. عملکرد این رله‌ها به عمل کلیدهای محلی منجر می‌شود. این رله‌ها به طور همزمان و بدون نیاز به ارتباط از انتهای راه دور عمل می‌کنند.

● رله‌های دیستانسیِ جهتدار زمین و فاز، مربوط به *ناحیهٔ اضافه پوشانی*[2] پوشانندهٔ حدود ۱۲۰٪ از امپدانس خط حفاظت شده.

عمل این رله‌ها به ارسال یک سیگنال اجازه دهنده به انتهای راه دور منجر می‌گردد. به شرط آنکه یک سیگنال عمل اجازه دهنده از انتهای راه دور دریافت گردد، عملکرد ناحیهٔ ۲ نیز به عمل کردن کلیدهای محلی منجر می‌شود و یک سیگنال عمل انتقال به انتهای راه دور فرستاده می‌شود.

اگر امپدانس ظاهری برای زمان معینی (نوعاً ۰/۴ ثانیه)، در داخل مشخصهٔ رلهٔ ناحیهٔ ۲ باقی بماند، کلیدهای محلی بدون دریافت سیگنال عملِ اجازه دهنده عمل خواهند کرد. در این حالت هیچ سیگنال عملِ انتقالی فرستاده نخواهد شد.

مشخصه‌های نوعی رلهٔ ناحیهٔ ۱ و ناحیهٔ ۲ در هر پست در شکل ۱۳ ـ ۳۱ نشان داده شده



شکل ۱۳ ـ ۳۱ مشخصهٔ رلهٔ در پست A

شده، عمل می‌کنند و برای خطاهای خارجی از عمل رله جلوگیری می‌شود.

برای انتقال سیگنالها بین پایانه‌ها می‌توان از واسطه‌های مخابراتی مانند: سیم پیلوت (سیمهای فلزی[1])، حامل خط توان[2]، مایکروویو[3]، یا فیبر نوری[4] استفاده کرد.

سیستمهای رلهٔ پیلوت را می‌توان بر مبنای نحوهٔ انتقال سیگنال و اساس آشکارسازی خطا طبقه‌بندی کرد:

● ممکن است از سیگنال فرستاده شده برای بلوکه کردن، غیر بلوکه کردن، یا انتقال عمل رله استفاده شود. در یک سیستم *بلوکه کننده*، سیگنال فرستاده شده از عمل رله‌های محلی که معمولاً برای عمل یک کلید تنظیم شده‌اند جلوگیری می‌کند. در یک سیستم *انتقال* عمل رله، سیگنالی توسط رله‌ها در یک طرف خط فرستاده می‌شود تا موجب شود یا اجازه دهد که کلیدها در سر دیگر، عمل کنند. سیستم *غیر بلوکه کننده*، ترکیبی از دو سیستم بالاست. در این سیستم، معمولاً از عمل رله‌های محلی جلوگیری می‌شود و هنگامی که عمل لازم باشد سیگنال ارسالی از پایانه راه دور آنها را راه می‌اندازد. در زمانی که به هر دلیلی کانال مخابراتی قطع شود، رله‌های محلی اجازهٔ عمل کردن پیدا می‌کنند، بدین ترتیب حفاظت در برابر خطایی که ممکن است در این زمان اتفاق افتد، صورت می‌گیرد.

● آشکارسازی موقعیت خطا (به عبارت دیگر، داخلی یا خارجی نسبت به خط حفاظت شده) براساس مقایسهٔ جهتدار یا مقایسهٔ فاز، بسته به نوع رلهٔ حس کننده مورد استفاده، صورت می‌گیرد.

در طرحی که از *مقایسهٔ جهتدار* استفاده می‌کند، از رله‌های دیستانس و رله‌های جهتدار برای آشکارسازی خطاهای داخلی و خارجی بهره گرفته می‌شود.

در طرحی که از *مقایسهٔ فاز* استفاده می‌کند، موقعیت خطا (به عبارت دیگر، اینکه آیا خطا داخلی یا خارجی است) با مقایسهٔ جابجایی نسبی فاز جریانهای داخل و خارج شوندهٔ خط حفاظت شده، تعیین می‌گردد.

چند طرح مختلف رله‌ای پیلوت با استفاده از ترکیبهای موارد بالا امکان‌پذیر است. در اینجا دو طرح را که مورد استفاده قرار گرفته‌اند، توضیح می‌دهیم و برای سادگی تنها خطوط دو پایانه‌ای را در نظر می‌گیریم.

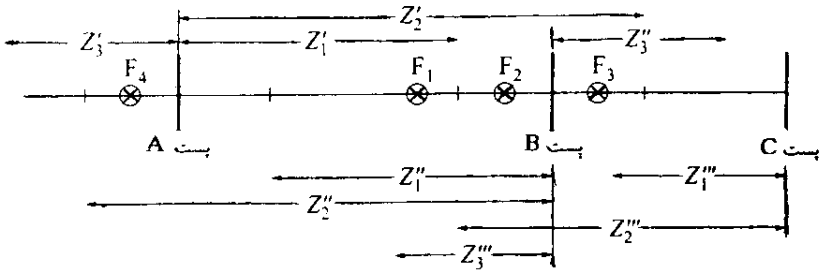
طرح اضافه پوشانی اجازه‌دهنده[5]. شکل ۱۳ ـ ۳۰، اساس عمل این طرح را نشان می‌دهد.

1. Metallic Wires
2. Power - Line Carrier
3. Microwave
4. Fibre Optics
5. Permissive Overreaching

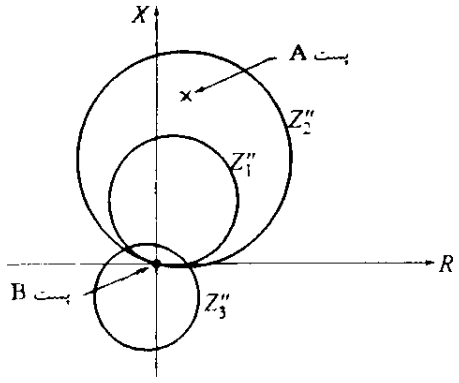
هر پست پایانهٔ خط دارای سه دسته رله است:

● زمین و فاز مربوط به *ناحیهٔ کمبود پوشانی* ۱، پوشانندهٔ حدود ۸۰٪ از امپدانس خط. این رله‌ها به طور همزمان برای وادار به عمل کردن کلیدهای محلی عمل می‌کنند.

● رله‌های دیستانسی جهتدارِ زمین و فاز مربوط به ناحیهٔ اضافه پوشانی ۲ تنظیم شده جهت دسترسی به ورای پایانهٔ راه دور و پوشاندن حدود ۱۲۰٪ از امپدانس خط. این رله تضمین می‌کند همهٔ خطاها آشکار گردند. اگر سیگنال بلوکه کننده‌ای از پایانهٔ راه دور دریافت نگردد، این



(الف) نواحی حفاظتی رله‌ها در پستهای A ، B، حفاظت‌کنندهٔ خط AB، و در پست C حفاظت‌کنندهٔ خط BC

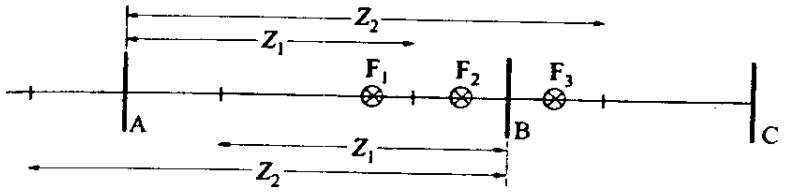


شکل ۱۳ ـ ۳۳ طرح رله‌ای مقایسهٔ جهتدار

است. اگر امپدانس ظاهری اندازه‌گرفته شده توسط رله‌ها در پست در داخل مشخصه‌های ناحیهٔ ۱ باشد، آنگاه کلیدها در آن پست به طور همزمان عمل می‌کنند.

اگر امپدانسهای ظاهری اندازه‌گرفته شده توسط رله‌ها در هر دو طرف در داخل مشخصه‌های ناحیهٔ ۲ باشند، آنگاه کلیدها در هر دو طرف با سرعت زیادی باز می‌شوند.

اگر امپدانس ظاهری، فقط در یک ایستگاه در داخل مشخصهٔ ناحیهٔ ۲ رله‌ها قرار گیرد، به شرط آنکه امپدانس برای ۰/۴ ثانیه در داخل ناحیهٔ ۲ باقی بماند، در آن پست کلیدها با تأخیر زمانی ۰/۴ ثانیه عمل می‌کنند.



شکل ۱۳ ـ ۳۲ موقعیتهای خطای F_1، F_2 و F_3

برای نشان دادن چگونگی عمل این طرح، خطاهای F_1، F_2، و F_3 را به صورت نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۳۲ در نظر بگیرید.

برای خطای F_1 در داخل مشخصه‌های ناحیهٔ ۱ رله‌ها در هر دو انتها، کلیدها در هر دو طرف بدون زمان تأخیر عمدی عمل می‌کنند. برای خطای F_2 در داخل مشخصهٔ ناحیهٔ ۱ مربوط به رلهٔ در **B** و مشخصهٔ ناحیهٔ ۲ ولی خارج از ناحیهٔ ۱ مربوط به رلهٔ در **A**، کلیدها در **B** به طور همزمان عمل می‌کنند و رله‌های ناحیهٔ ۲ در هر دو انتها انتخاب شده و به یکدیگر سیگنالِ اجازه دهنده ارسال می‌کنند. رلهٔ ناحیهٔ ۲ در **A**، با دریافت سیگنال اجازه‌دهنده از **B** اگر زمان کانال بیشتر از ms ۲۰ نباشد، کلید در **A** را وادار به عمل می‌کند.

برای خطای F_3 (خارج از بخش خط)، رلهٔ ناحیهٔ ۲ در **A** انتخاب می‌شود. از آنجا که رلهٔ ناحیهٔ ۱ در **B** انتخاب نشده است، در **B** عملی رخ نمی‌دهد و هیچ سیگنالِ اجازه دهنده‌ای به **A** ارسال نمی‌شود. رلهٔ ناحیهٔ ۲ در **A** تنها در صورتی کلید را وادار به عمل می‌کند که خطا توسط رله‌های حفاظتی بخش خط **BC** در ۰/۴ ثانیه، رفع نشده باشد.

طرح مقایسهٔ جهتدار. اساس عمل طرح مقایسهٔ جهتدار با یک پیلوت نوع بلوکه کننده، در شکل ۱۳ ـ ۳۳ نشان داده شده است. از کانال پیلوت برای جلوگیری از عمل کردن برای خطاهای خارجی نسبت به خط حفاظت شده استفاده می‌شود.

۱۳ ـ ۵ ـ ۲ زمانهای رفع خطا

برای حذف عنصر خطادار به یک سیستم رلهٔ حفاظتی نیاز است تا خطای واقع شده را تشخیص دهد و باز کردن کلیدهای مدار را که عنصر خطادار سیستم را جدا می‌کنند، آغاز کند. بنابراین مجموع زمان رفع خطا، از زمان رله و زمان قطع کلید تشکیل می‌شود. زمان رله زمانی است که از شروع جریان اتصال کوتاه تا شروع سیگنال عمل به کلید به طول می‌انجامد. زمان قطع زمانی است که از شروع سیگنال عمل تا قطع جریان از طریق کلید به طول می‌انجامد. در سیستم انتقال فشار قوی (HV) و فشار بسیار قوی (EHV)، زمانهای معمولی رله بین ۱۵ تا ۳۰ میلی‌ثانیه (۱ تا ۲ سیکل) و زمانهای قطع کلید بین ۳۰ تا ۷۰ میلی‌ثانیه (۲ تا ۴ سیکل)، است.

حفاظت پشتیبان محلی برای از کار افتادن کلید، معمولاً بر روی هر کلید در سیستمهای حساس انتقال فشار قوی وجود دارد. اگر کلیدی در یک پُست محلی عمل نکند، با استفاده از ارسال سیگنالهای عمل به کلیدهای ناحیهٔ مجاور و سیگنالهای عمل انتقالی به کلیدهای انتهای راه دور، جریان تغذیه به کلیدِ معیوب قطع می‌شود.

مثالی از یک *خطای معمولی رفع شده*[1] در شکل ۱۳ ـ ۳۴ داده شده است. شین A، کلیدهای هوای فشرده دو سیکلی، و شین B کلیدهای روغنی سه سیکلی دارد. فرکانس نامی سیستم ۶۰ هرتز و واسطهٔ انتقال، مایکروویو می‌باشد. یک خطا در داخل مشخصهٔ ناحیهٔ ۱ رله در شین A و در داخل مشخصهٔ ناحیهٔ ۲ (ولی خارج از ناحیهٔ ۱) رله در شین B در نظر گرفته شده است. با زمانهای نوعی رله‌ای نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۳۴، خطا از شین A در ۶۴ میلی ثانیه و از شین B در ۱۰۴ میلی ثانیه رفع شده است.

مثالی از *خطای کلید معیوب*[2] رفع شده به وسیلهٔ حفاظت پشتیبان در شکل ۱۳ ـ ۳۵ نشان داده شده است. خطا بر روی خط BC در داخل مشخصهٔ ناحیهٔ ۱ مربوط به رلهٔ شین B و در داخل مشخصهٔ ناحیهٔ ۲ (ولی خارج از ناحیهٔ ۱) مربوط به رلهٔ شین C در نظر گرفته می‌شود. کلید ۴ در شین B عمل نمی‌کند، و خطا از شین B با ارسال سیگنالهای عمل به کلید ۳ در شین B (پشتیبان محلی) و کلیدهای ۱ و ۲ در شین A (پشتیبان راه دور) رفع می‌شود. با زمانهای نوعی رله و قطع کلید نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۳۵، خطا از شین C در ۱۰۴ میلی ثانیه، از شین B در ۱۵۷ میلی ثانیه و از شین A در ۱۸۰ میلی ثانیه، رفع می‌شود. از این مثال مشاهده می‌کنیم که اثر خرابی کلید نه تنها در تأخیر انداختن رفع خطا، بلکه در جداسازی عناصر اضافی مجاور به عناصر خطادارِ سیستم نیز ظاهر می‌شود.

1. Normally Cleared Fault
2. Stuck Breaker Fault

رله‌ها کلیدهای محلی را بعد از یک تأخیر ۲۵ میلی‌ثانیه‌ای (زمان انتخاب زمان بند[1] هماهنگ کننده) وادار به عمل می‌کنند. رله‌های ناحیهٔ ۲ کلیدهای محلی را در صورتی که خطا پس از ۰/۴ ثانیه، رفع نشود بدون توجه به اینکه سیگنال بلوکه کننده‌ای از انتهای راه دور دریافت کرده یا خیر، وادار به عمل می‌کنند.

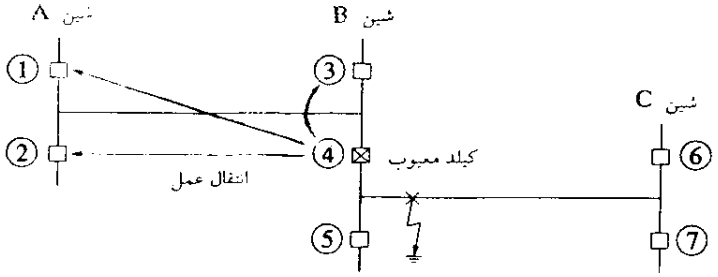
● رله‌های دیستانسی جهتدار *بلوکه کنندهٔ معکوس ناحیهٔ ۳* تنظیم شده در جهت مخالفِ خط حفاظت شده. این رله‌ها خطاهای خارجی را آشکار می‌کنند و برای جلوگیری از عمل، سیگنال بلوکه کننده‌ای را به انتهای راه دور ارسال می‌کنند.

عمل این طرح را برای چهار موقعیت مختلف خطا F_1، F_2، F_3 و F_4 نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۳۳ «الف»، بررسی می‌کنیم. برای خطایی در موقعیت F_1 نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۳۳، رله‌های ناحیهٔ ۱ در هر دو پست **A** و **B** عمل می‌کنند و کلیدها را در هر دو سر بدون تأخیر باز می‌کنند.

برای خطایی در F_2، رله‌های ناحیهٔ ۱ (Z''_1) در پست **B** کلیدهای محلی را فوراً وادار به عمل می‌کنند و رله‌های ناحیهٔ ۲ در پست **A**، با دریافت نکردن سیگنال بلوکه کننده از رله‌های ناحیه ۳ (Z''_3) در پست **B**، بعد از یک زمان تأخیر کوتاه در حدود ۲۵ میلی ثانیه مربوط به زمان‌بند هماهنگ کننده، کلیدهای **A** را وادار به عمل می‌کنند. این زمان تأخیر، دوره انتظاری است که ممکن است در آن سیگنال بلوکه کننده‌ای از طرف دیگر ارسال شود. رله‌های ناحیهٔ ۲ (Z''_2) در پُست **C** نیز خطا در F_2 را آشکار می‌کنند، اما به کمک سیگنال بلوکه کننده دریافتی از رله‌های حس کنندهٔ معکوس ناحیه ۳ (Z''_3) در پست **B** از عمل با سرعت زیاد منع می‌شوند. لیکن، در صورتی که خطا رفع نشده باشد و رلهٔ ناحیهٔ ۲ در پست **C** بعد از حدود ۰/۴ ثانیه همچنان خطا را تشخیص دهد، یک عمل زماندار محلی انجام خواهد شد.

برای خطایی در F_3، رله‌های ناحیهٔ ۲ (Z'_2) در پست **A** خطا را آشکار می‌کنند ولی با سیگنال بلوکه کنندهٔ دریافتی از رله‌های ناحیهٔ ۳ (Z''_3) در پست **B** از عمل کردن منع می‌شوند. به‌طور مشابهی، خطایی در F_4 به وسیلهٔ رله‌های ناحیهٔ ۲ (Z''_2) در پست **B** آشکار می‌گردد لیکن با سیگنالهایی از رله‌های ناحیهٔ ۳ (Z'_3) در **A** از عمل آن جلوگیری می‌شود.

1. Timer



کلید ۴ معیوب، فرض شده است، کلیدهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ کلیدهای هوای فشرده دو سیکلی (۳۳ میلی‌ثانیه) فرض شده است. کلیدهای ۶ و ۷ کلیدهای روغنی سه سیکلی (۵۰ میلی ثانیه) فرض شده‌اند.

	کلید محلّی	کلیدهای دور	کلیدپشتیبان محلّی	کلیدهای‌پشتیبان
	۵	۶ و ۷	۳	راه دور ۱ و ۲
زمان رلهٔ اوّلیه (در شین B)	۲۵ میلی‌ثانیه	۲۵ میلی‌ثانیه	۲۵ میلی‌ثانیه	۲۵ میلی‌ثانیه
زمان‌رله(های)کمکی	۳ میلی‌ثانیه	۹ میلی‌ثانیه	۶میلی‌ثانیه	۱۲ میلی‌ثانیه
زمان‌کانال‌مخابراتی	-	۱۷ میلی‌ثانیه	-	۱۷ میلی‌ثانیه
درجه‌تنظیم‌زمان‌بند خرابی کلید	-	-	۹۰ میلی‌ثانیه	۹۰ میلی‌ثانیه
زمان مدول عمل رله	۳ میلی‌ثانیه	۳ میلی‌ثانیه	۳ میلی‌ثانیه	۳ میلی‌ثانیه
زمان‌کلید	۳۳میلی‌ثانیه (۲سیکل)	۵۰میلی‌ثانیه (۳سیکل)	۳۳میلی‌ثانیه	۳۳ میلی‌ثانیه
مجموع زمان	۶۴ میلی‌ثانیه	۱۰۴ میلی‌ثانیه	۱۵۷ میلی‌ثانیه	۱۸۰ میلی‌ثانیه

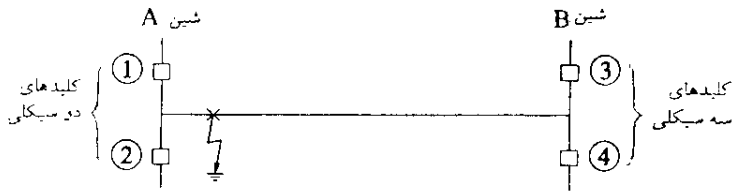
خطا از شین C در ۱۰۴ میلی ثانیه رفع شده،

خطا از شین B در ۱۵۷ میلی ثانیه رفع شده،

خطا از شین A در ۱۸۰ میلی ثانیه رفع شده،

ملاحظات: ۱ برای کلید دو سیکلی ۴، درجه تنظیم خرابی کلید، ۹۰ میلی ثانیه فرض شده است. و ممکن است از یک کاربرد به دیگری تغییر کند. برای کلیدهای روغنی سه سیکلی مقدار نوعی، ۱۵۰ میلی‌ثانیه است. ۲ زمان کانال مخابراتی به واسطهٔ مخابراتی مورد استفاده بستگی دارد.

شکل ۱۳ ـ ۳۵ زمانهای نوعی رفع خطا برای خطای کلید خراب



	محلّی (شین A)	راه دور (شین B)
زمان رلهٔ اوّلیه	کلیدها در ۱ و ۲	کلیدها در ۳ و ۴
(آشکار سازی خطا)	۲۵ میلی‌ثانیه	۲۵ میلی‌ثانیه
زمان‌رله(های) کمکی	۳ میلی‌ثانیه	۹ میلی‌ثانیه
زمان مخابره	-	۱۷ میلی‌ثانیه (مایکروویو)
مدول عمل رله	۳ میلی‌ثانیه	۳ میلی‌ثانیه
زمان رفع‌رله	۳۳ میلی‌ثانیه (۲ سیکل)	۵۰ میلی‌ثانیه (۲ سیکل)
مجموع زمان	۶۴ میلی‌ثانیه	۱۰۴ میلی ثانیه

خطا از شین A در ۶۴ میلی ثانیه رفع شده،

خطا از شین B در ۱۰۴ میلی ثانیه رفع شده،

ملاحظات: ۱ به منظور نمایش، کلیدهای دو سیکلی در A و سه سیکلی در B فرض شده‌اند.

۲ زمان مخابره به واسطهٔ مخابراتی مورد استفاده بستگی دارد. و ممکن است با PLC، زمان طولانی‌تر باشد.

شکل ۱۳ ـ ۳۴ زمانهای نوعی رفع خطا برای یک خطای معمولی رفع شده

اگر pu $E_A = E_B = ۱/۰$ باشد، آنگاه:

$$Z_C = -Z_A + \frac{Z_T}{۱\angle ۰ - ۱\angle -\delta}$$

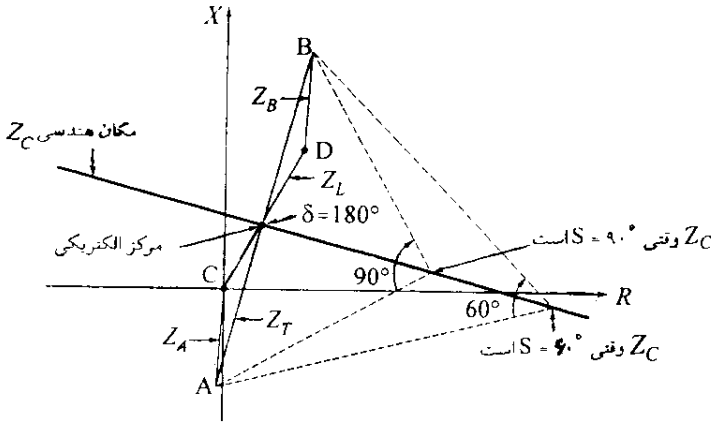
$$= -Z_A + Z_T \frac{۱\angle ۰ + ۱\angle -\delta}{(۱\angle ۰ - ۱\angle -\delta)(۱\angle ۰ + ۱\angle -\delta)}$$

$$= -Z_A + Z_T \frac{۱ + \cos\delta + j\sin\delta}{۲j\sin\delta} \qquad (۸۵ - ۱۳)$$

$$= -Z_A + Z_T\left(\frac{۱}{۲} - j\left(\frac{۱ + \cos\delta}{۲\sin\delta}\right)\right)$$

$$= \left(\frac{Z_T}{۲} - Z_A\right) - j\left(\frac{Z_T}{۲}\cot\frac{\delta}{۲}\right)$$

حین نوسان، زاویهٔ δ تغییر می‌کند. شکل ۱۳ ـ ۳۷ مکان Z_C را به صورت تابعی از δ بر روی صفحهٔ R−X و هنگامی که $E_A = E_B$ باشد نشان می‌دهد.

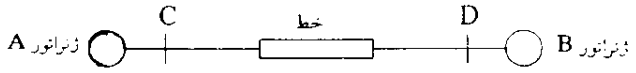


شکل ۱۳ ـ ۳۷ مکان Z_C به صورت تابعی از δ، با $E_A = E_B$.

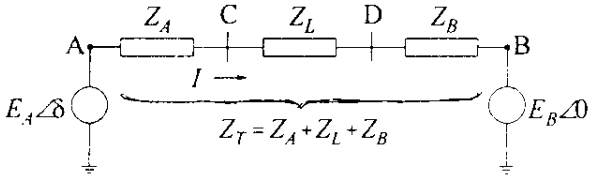
هنگامی که اندازهٔ ولتاژ E_A و E_B مساوی هستند، مکان Z_C به‌صورت خط مستقیمی که عمودمنصف کُل امپدانس سیستم بین A و B است (به عبارت دیگر، امپدانس Z_T)، مشاهده می‌شود. زاویهٔ تشکیل شده ناشی از خطوط مرسوم از A و B به هر نقطه بر روی مکان، مساوی

۱۳ ـ ۵ ـ ۳ کمیتهای رله‌ای حین نوسان

عملکرد طرحهای رله‌های حفاظتی را حین نوسان (نوسانهای الکترومکانیکی) و شرایط عدم همگامی می‌توان با در نظر گرفتن سیستم سادهٔ دو ماشینهٔ شکل ۱۳ ـ ۳۶، نشان داد. فرض می‌شود که ماشینها با ولتاژهایی با اندازه‌های ثابت متصل به امپدانسهای گذرایشان (Z_A و Z_B) نمایش داده شوند. اثر نوسانها بر کمیتهای رله‌ای، با در نظر گرفتن ولتاژ، جریان و امپدانس ظاهریِ اندازه‌گرفته شده توسط رله در شین C (پایانهٔ ماشین A)، تحلیل می‌شود.



(الف) نمایش نمادین



(ب) مدار معادل

شکل ۱۳ ـ ۳۶ سیستم دو ماشینه

E_A و E_B ولتاژهای متصل به امپدانسهای گذرای دو ماشین هستند. E_B فازور مرجع فرض می‌شود، و δ زاویه‌ای راکه E_A از B جلو است نشان می‌دهد.

$$\tilde{I} = \frac{E_A\angle\delta - E_B\angle 0}{Z_T} \qquad (۸۲ ـ ۱۳)$$

ولتاژ در شین C عبارت است از:

$$\tilde{E}_C = \tilde{E}_A - Z_A\tilde{I} \qquad (۸۳ ـ ۱۳)$$

امپدانس ظاهری اندازه‌گرفته شده با رلهٔ امپدانسی حفاظت‌کنندهٔ خط CD در C به صورت زیر داده می‌شود:

$$Z_C = \frac{\tilde{E}_C}{\tilde{I}} = \frac{\tilde{E}_A - Z_A\tilde{I}}{\tilde{I}} = -Z_A + Z_T\frac{E_A\angle\delta}{E_A\angle\delta - E_B\angle 0} \qquad (۸۴ ـ ۱۳)$$

ولتاژ در مرکز الکتریکی با افزایش δ به ۱۸۰° به صفر افت می‌کند و سپس با افزایش بیشتر δ تا اینکه به ۳۶۰° برسد، دامنه‌اش افزایش می‌یابد. هنگامی که δ به ۱۸۰° برسد، ژنراتور یک *قطب را لغزانده است* و هنگامی که δ به مقدار اولیه‌ای برسد که نوسان از آن شروع شده یک سیکل لغزش کامل شده است.

پس از بروز اغتشاش در سیستم، نرخ تغییر زاویه، ولتاژ و جریان کاملاً متغیر است. نخست، زاویهٔ روتور بسرعت تغییر می‌کند سپس در حالت *پایدار*، با رسیدن زاویهٔ اوج، تغییرات آن کم می‌شود و زاویه کاهش پیدا کرده با تغییرات کوچکتری نوسان می‌کند تا به تعادل برسد. اگر سیستم *ناپایدار* باشد، زاویه بتدریج زیاد شده تا به ۱۸۰° می‌رسد هنگامی که یک قطب لغزیده است و این حالت با لغزشهای مکرر قطب در دفعات سریع دنبال می‌شود، مگر آنکه سیستم با سیستمهای حفاظتی مجزا گردد. در نقاطی نزدیک مرکز الکتریکی، ولتاژها و امپدانسهای ظاهری حین لغزش بسرعت نوسان می‌کنند.

مکانهای واقعیِ امپدانسهای ظاهریِ اندازه‌گیری شده با رله‌های دیستانس پیچیده‌تر از حالت ایده‌الی است که ما در نظر گرفته‌ایم. در این حالت، مکان به تغییراتِ ولتاژهای داخلی ماشین، تنظیم کنندهٔ ولتاژ و عملیات گاورنر سرعت، و تداخل بین کلیهٔ ماشینهای سیستم که از شبکهٔ به هم پیوسته تأثیر می‌گیرند، بستگی دارد. چنین مکانهایی را می‌توان برای هر موقعیت معلوم و با استفاده از برنامهٔ پایداری گذرا تعیین کرد. لیکن تحلیل حالتهای ایده‌آلِ شامل ترکیبات سادهٔ سیستم، در فهم نتایج به دست آمده در موقعیتهای پیچیده سودمند است.

نمودار امپدانس تعمیم یافتهٔ

ایدهٔ بکارگیری نمودارهای امپدانس برای تحلیل عملکرد رلهٔ دیستانس را نخستین بار سی. آر. میسن[1] و ج. اچ. نهر[2] [۲۵، ۲۶] بیان کردند. آنها «خط نوسان» را برای حالت $E_A = E_B$ بر روی نمودار $R - X$ در نظر گرفته و عملکرد رله‌های مختلفی را با رسم مشخصه‌های آنها بر روی همان نمودار تحلیل کردند. این کار واقعاً گامی پیشتازانه در فهم عملکرد سیستمهای حفاظتی حین نوسانهای توان بود.

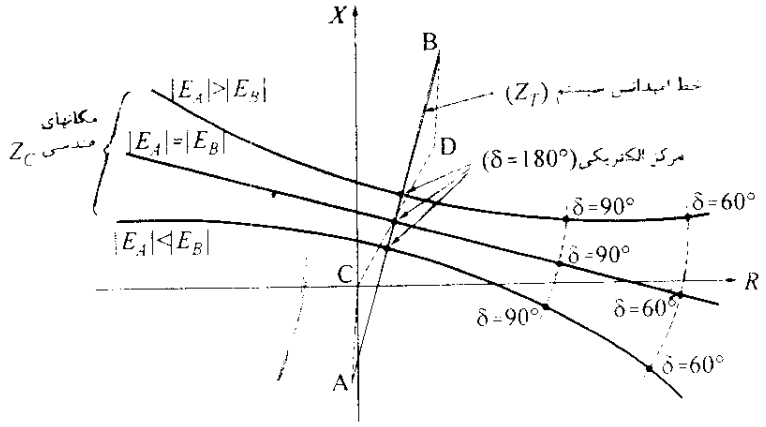
این ایده متعاقباً توسط محققان دیگری مانند ادیث کلارک[3] [۲۷] با بسط مکانهای امپدانس برای مقادیر مختلف نسبت E_A / E_B توسعه یافت. آنها نشان دادند که مکان امپدانس برای هر مقدار از نسبت E_A / E_B، یک دایره می‌باشد که مرکز آنها بر روی خط امپدانسِ سیستم قرار دارد و شعاعها و افست[4] آنها به کمک مقادیرِ نسبت ولتاژ همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۳۹ نشان داده

1. C.R.Mason 2. J.H. Neher 3. Edith Clarke 4. Offset

زاویهٔ متناظر δ است.

هنگامی که $\delta = ۰$ است، جریان I صفر و Z_c بینهایت می‌باشد. هنگامی که $\delta = ۱۸۰°$ است، ولتاژ در مرکز *الکتریکی*[1] (وسط امپدانس کل سیستم) صفر است. بنابراین، در عمل رله در نقطهٔ C یک خطای سه فاز را در مرکز الکتریکی مشاهده خواهد کرد. در این حالت، مرکز الکتریکی و مرکز امپدانس بر هم منطبق می‌شوند.

اگر E_A مساوی E_B نباشد، مکان امپدانس ظاهری دوایری خواهد بود که مرکزهای آنها بر ادامهٔ خط امپدانس AB قرار گرفته است. هنگامی که $E_A > E_B$، مرکز الکتریکی، بالای مرکز امپدانس قرار می‌گیرد و هنگامی که $E_A < E_B$، مرکز الکتریکی زیر مرکز امپدانس قرار می‌گیرد. شکل ۱۳ ـ ۳۸ شکل مکانهای امپدانس ظاهری را برای سه مقدار مختلف نسبت E_A / E_B نشان می‌دهد.

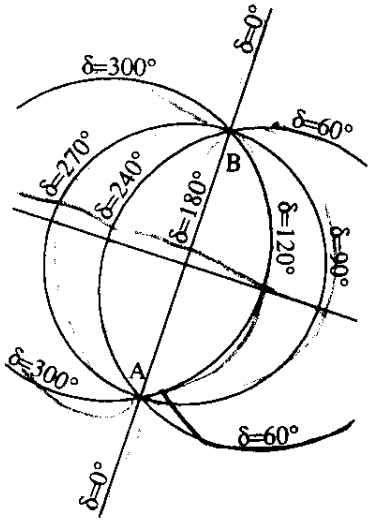


شکل ۱۳ ـ ۳۸ مکانهای Z_c با مقادیر مختلف E_A / E_B

برای ژنراتورهایی که از طریق یک سیستم *انتقال ضعیف*[2] (امپدانس خارجی بالا) به سیستم اصلی وصل شده‌اند، ممکن است مرکز الکتریکی بر خط انتقال ظاهر شود. از طرف دیگر، در حالتی که ژنراتور از طریق یک سیستم *انتقال قوی*[3] به سیستم اصلی وصل شده باشد، ممکن است مرکز الکتریکی در داخل ترانسفورمر بالابرنده و یا در داخل خود ژنراتور قرار بگیرد.

اشاره به این نکته مهم است که مرکزهای الکتریکی، نقاط تابعی نیستند زیرا راکتانس مؤثر ماشین (که در تحلیل ما در X'_d ثابت فرض شده است) و اندازهٔ ولتاژهای داخلی در حین تغییر وضعیت دینامیکی، تغییر می‌کنند.

1. Electrical Centre
2. Weak Transmission System
3. Strong Transmission System



شکل ۱۳ ـ ۴۰ مکان امپدانس ظاهری برای جداسازی زاویه‌ای ثابت

۱۳ ـ ۵ ـ ۴ ارزیابی عملکرد رلهٔ دیستانس حین نوسان

از مکانهای امپدانس ظاهریِ به دست آمده در بخش ۱۳ـ۵ـ۳، بدیهی است که امپدانس اندازه‌گیری شده توسط یک رلهٔ دیستانس حین نوسانهای الکترومکانیکی می‌تواند بین مشخصه‌های رله باشد. لیکن رله باید فقط در وضعیت ناپایدار عمل کند.

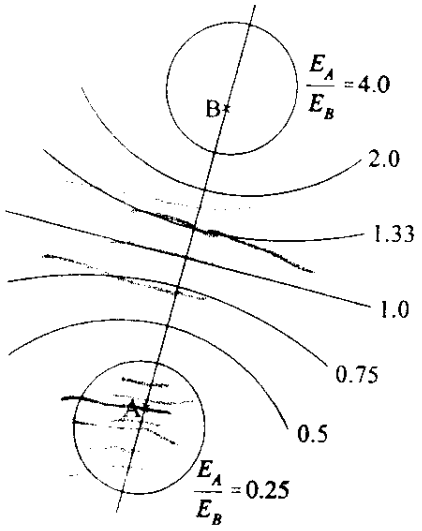
عملکرد رله‌ها حین وضعیت نوسان توان را می‌توان با محاسبهٔ امپدانسهای اندازه‌گیری شده به وسیلهٔ آنها حین شبیه‌سازیهای پایداری گام به گام و مقایسهٔ نتایج با مشخصه‌های کار آنها تعیین کرد.

برای خط pq در شکل ۱۳ـ۴۱، امپدانس ظاهری اندازه‌گیری شده به وسیلهٔ رله در p به‌صورت زیر داده می‌شود:

$$Z_p = \frac{\tilde{E}_p}{\tilde{I}_{pq}} = \frac{\tilde{E}_p}{y_{pq}(\tilde{E}_p - \tilde{E}_q)}$$

برای ارزیابی عملکرد رله‌های دیستانس، مکان امپدانس ظاهریِ محاسبه شده، بر روی نمودار R—X همراه با مشخصه‌های رله، مطابق شکل ۱۳ ـ ۴۲ رسم شده است.

با استفاده از یک ناحیهٔ دوم زماندار و نه با استفاده از مخابرهٔ بین پایانه‌های خط، عملکرد رلهٔ حفاظتی به عمل رله در سر دیگر مدار بستگی ندارد. اگر مکان امپدانس در هر کدام از دو سر

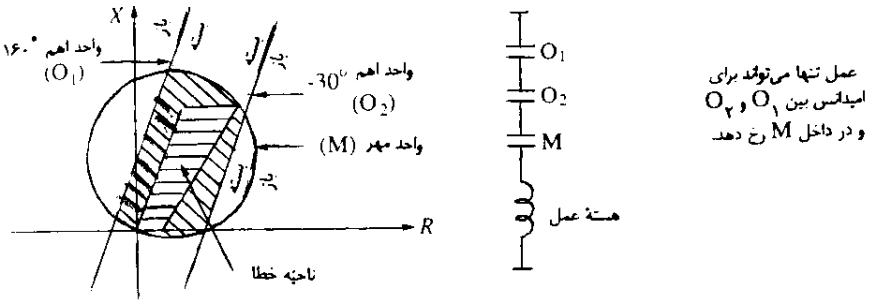


شکل ۱۳ ـ ۳۹ مکان امپدانس برای نسبت ثابت ولتاژ

شده تعیین می‌شود. حالتِ خاص $E_A / E_B = ۱$، حالت حدی با شعاع و افست بینهایت می‌باشد.

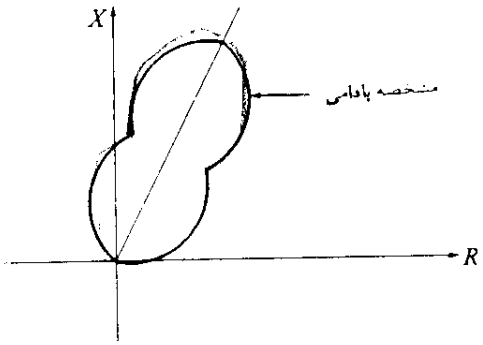
در مرجع ۲۷، ادیث کلارک خانوادهٔ دیگری از منحنیهای نشان‌دهندهٔ مکانهای امپدانس ظاهری را برای جداسازی ثابت زاویه‌ای (δ) مطرح کرده است. اگر در حالی که نسبت ولتاژ به اندازه تغییر می‌کند زاویهٔ بین E_A و E_B ثابت نگه داشته شود، امپدانس ظاهری بخشی از دایره‌ای را که از نقاط A و B عبور کرده و مرکز آن بر روی عمودمنصف خط امپدانس سیستم قرار دارد، دنبال می‌کند. این مشخصه‌ها در شکل ۱۳ ـ ۴۰ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که خط AB قسمتی از دایره (با شعاع بینهایت) است که جداسازی زاویه‌ای °۰ تا °۱۸۰ را نشان می‌دهد. این خط همچنین قسمتهای چپ و راست هر دایرهٔ δ ثابت را به دو مشخصه، به گونه‌ای که زاویهٔ جداسازی برای قسمتها با °۱۸۰ تفاوت می‌کنند، جدا می‌کند. برای مثال، دایرهٔ °۹۰ در راست، دایره °۲۷۰ در چپ خواهد شد.

دو خانوادهٔ مشخصه‌های نشان داده شده در شکلهای ۱۳ ـ ۳۹ و ۱۳ ـ ۴۰ را می‌توان ترکیب کرد و نمودار امپدانس تعمیم یافتهٔ را در مبنای واحد تشکیل داد [۲۴ و ۲۷]. این مشخصه‌ها در تجسم و تحلیل چگونگی تغییر امپدانس ظاهری در حالت کلی و چگونگی تغییرات جداسازی تغییرات و نسبت ولتاژهای منبع سودمند هستند.



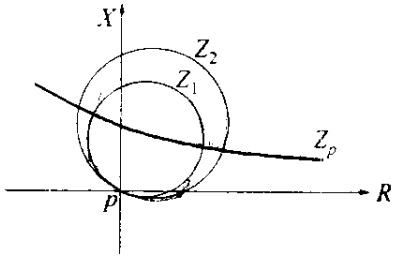
شکل ۱۳ ـ ۴۳ تقلیل گسترهٔ زاویه‌ای رلهٔ مهو

واحد مهو میزان دسترسی (پوشانی) را کنترل می‌کند، و واحدهای اهمی گسترهٔ زاویه‌ایِ عمل بر روی نوسانها را کنترل می‌کنند. واحدهای اهم به عنوان «کورکننده‌ها»[1] نامیده می‌شوند. اگر جریان خط فقط در یک جهت باشد، بکارگیری تنها یک کورکننده (O_2) کافی است. به جای استفاده از کورکننده‌ها، می‌توان از رله‌هایی با مشخصه‌هایی با شکل معین مانند مشخصهٔ «لنزی (عدسی)[2]» نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۲۸ یا مشخصهٔ «بادامی»[3] نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۴۴، برای حفاظت خط استفاده کرد. چنین مشخصه‌هایی را می‌توان بسادگی با رله‌های حالت جامد[4] تحقق داد.

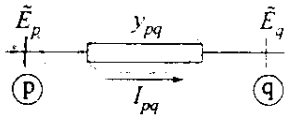


شکل ۱۳ ـ ۴۴

1. Blinders 2. Lens 3. Peanut 4. Solid - State Relays



شکل ۱۳ ـ ۴۲



شکل ۱۳ ـ ۴۱

به اندازهٔ کافی در مشخصهٔ ناحیهٔ دوم باقی بماند تا اجازهٔ عمل زماندار را بدهد و یا اگر به مشخصهٔ ناحیهٔ اول وارد شود، عمل رخ خواهد داد.

عملکرد طرحها با استفاده از رلهٔ پیلوت به امپدانسهای اندازه‌گیری شده در دو سر بستگی خواهد داشت.

۱۳ ـ ۵ ـ ۵ جلوگیری از عمل، حین شرایط گذرا

ملاحظات جلوگیری از عمل، حین شرایط نوسانی عموماً در یکی از دو دستهٔ زیر قرار می‌گیرند:

الف) جلوگیری از عمل حین نوسانهای پایدار و مجوز عمل برای گذراهای ناپایدار.

ب) جلوگیری از عمل حین نوسانهای ناپایدار و اِعمال جداسازی در نقطهٔ دیگر.

جلوگیری از عمل حین گذراهای پایدار

رله‌های «مهو»، مشخصه‌های عمل کوچکتری نسبت به رله‌های امپدانسی و راکتانسی‌ای دارند که برای رسیدن به همان فاصله تنظیم شده‌اند. این رله‌ها هنوز هم ممکن است گسترهٔ وسیعی را تحت پوشش قرار دهند و از خارج شدن خطوط طولانی حین نوسان جلوگیری کنند. اگر نوسانهای تا °۱۲۰ مجاز باشند، مشخصهٔ رله مهو برای خطوطی که امپدانس آنها کمتر از حدود نصف امپدانس کلی دو ژنراتور است، رضایتبخش می‌باشد.

گسترهٔ زاویه‌ای تحت پوشش توسط رلهٔ مهو را می‌توان مطابق شکل ۱۳ ـ ۴۳، با بکارگیری دو واحد «اهمی» دارای مشخصه‌های خطی تقلیل داد. واحدهای اهمی، مشابه واحدهای راکتانسی هستند، جز آنکه به امپدانسهای در زوایای °۱۶۰ و °۳۰ − به جای °۹۰ + پاسخ می‌دهند. این زوایا چنان انتخاب می‌شوند که مشخصه‌های واحدهای اهمی موازی مرزهای محیط خطا باشند.

رله‌های خارج‌سازی عدم همگامی نباید برای نوسانهای پایدار عمل کنند. آنها باید کلیهٔ نوسانهای ناپایدار را تشخیص دهند و باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که وضعیت بار طبیعی انتخاب نشود.

در *طرح بلوکه کردن عدم همگامی*، رله‌های ناحیهٔ ۲ و شاید ناحیهٔ ۱ از شروع به عمل کردن باز داشته می‌شوند، و به منظور جداسازی سیستم در یک موقعیت مطلوبتر سیگنالهای انتقال عمل به مدارهای باز در موقعیت راه دور فرستاده می‌شود. رله‌های بلوکه کننده عدم همگامی باید قبل از عمل کردن حفاظت خط، شرایط را تشخیص دهند. برای آنکه اطمینان داشته باشیم که رلهٔ خط برای وضعیت خطا بلوکه نشده است، باید تنظیم رله‌ها چنان باشد که وضعیت بار طبیعی در محیط بلوکه کردن نباشد.

۱۳ - ۵ - ۶ بازبست خودکار خط

اکثر خطاهای خط انتقال (۶۰ تا ۸۰ درصد) دارای ماهیت گذرا هستند. جرقه‌زنی عایق[1] ناشی از ولتاژهای بالای گذرای القا شده از صاعقه[2]، مثالی از چنین خطایی می‌باشد. پس از آنکه خط به اندازهٔ کافی از انرژی تخلیه شد، اثر منبع خطا از میان رفته و قوس خطا دیونیزه شود، در این صورت خط از انرژی تخلیه می‌شود و می‌توان آن را دوباره وصل کرد. بنابراین، معمولاً در عمل، کلیدها را به صورت خودکار، بازبست[3] می‌کنند تا پیوستگی سرویس‌دهی بهبود یابد.

بازبست ممکن است تک تیر[4] (یکباره) یا چند تیر[5] (چندباره) با زمان تأخیر بین هر بار باشد. اگر خطا بعد از دو یا سه بار ادامه یابد، اپراتور ممکن است بعد از اندکی تأخیر مبادرت به بازبست دستی نماید. اگر این روش نیز شکست بخورد، نشانهٔ بروز خطایی دائمی است و خط‌برای تعمیر از سرویس‌دهی خارج می‌شود. اولین مبادرت به بازبست می‌تواند با سرعت زیاد یا با تأخیر زمانی باشد.

بازبست با سرعت زیاد، به بستن کلیدهای مدار بعد از زمانی درست به اندازهٔ کافی طولانی به منظور اجازه به دیونیزه شدن قوس خطا اطلاق می‌شود. بازبست را می‌توان در زمانی کمتر از ۱ ثانیه تکمیل کرد. در زیر فواید بازبست با سرعت زیاد آورده شده است:

- کاهش احتمال مشکلات سیستم که از چندین قطعی در دفعات متوالی سریع رخ می‌دهند، این قطع شدنها معمولاً به علت رعد و برق شدید، باد یا یخبندان، به وجود می‌آیند. این کار با سرعت دادن بازیابی سیستم به سطح قبلی قابلیت اطمینان انجام می‌پذیرد.

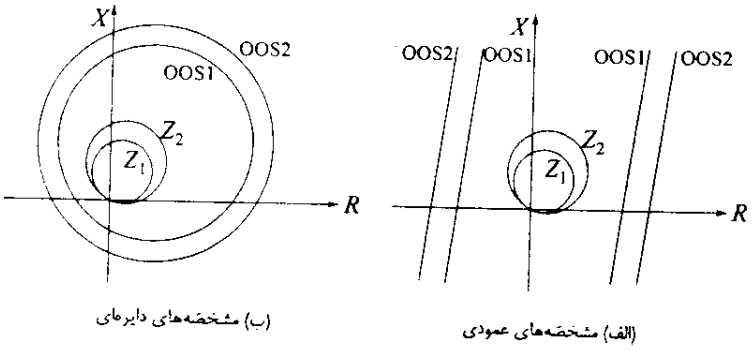
1. Insulator Flashover 2. Lightning 3. Reclose
4. Single - Shot 5 Multishot

رله‌های عمل و بلوکه کنندهٔ عدم همگامی

در برخی از موارد، ممکن است جلوگیری از خارج شدن خطوط در نقطهٔ جداسازی طبیعی و انتخاب نقطهٔ جداسازی به گونه‌ای مطلوب باشد که یکی از موارد ذیل بر قرار شود: الف) بار و تولید در هر دو طرف بهتر متعادل شوند. یا ب) یک بار حساس حفاظت شود، یا ج) جداسازی در مرز یک شرکت تولید کننده باشد.

ممکن است در لحظه‌های معین به منظور جلوگیری از افت بیش از اندازهٔ ولتاژ، عمل کردن سریعتر مطلوب باشد. در این حالتها از رلهٔ عدم همگامی، بلوکه کردن یا عمل کردن، استفاده می‌شود.

اساس رلهٔ عدم همگامی. امپدانس ظاهری تحت حالت عدم همگامی نسبت به حرکت آن، هنگامی که یک خطای خط رخ می‌دهد، کُند است. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۴۵ نشان داده شده است می‌توان وضعیت نوسان‌گذرا را با بکارگیری دو رلهٔ دارای مشخصه‌های عمودی یا دوار بر روی صفحه R−X آشکار کرد. اگر زمان لازم برای عبور دو مشخصهٔ (OOS۱ و OOS۲) از یک مقدار معین بیشتر شود، تابع عدم همگامی آغاز می‌گردد.



(ب) مشخصه‌های دایره‌ای

(الف) مشخصه‌های عمودی

شکل ۱۳ ـ ۴۵ طرحهای رلهٔ بلوکه کنندهٔ عدم همگامی

در طرح *خارج‌سازی عدم همگامی*، کلیدهای محلی عمل خواهند کرد. چنین طرحی را می‌توان برای اهداف زیر به کار گرفت.

- سرعت دادن عمل برای محدود کردن افت ولتاژ؛
- تضمین آنکه یک خط انتخاب شده به جای مدارهای دیگری که ممکن است مهمتر باشد خارج شود.

ژنراتور تعبیه شود. چنین موقعیتی زمانی رخ می‌دهد که ژنراتور در یک سیستم انتقال قوی از سنکرونیزم خارج شود. ضمناً سطح تحریک پایین در ژنراتور ($E_A < E_B$) کم و بیش به پیدایش چنین موقعیتی کمک می‌کند.

اثر ژنراتورهای در حال کار در وضعیت عدم همگامی

در حین موقعیت عدم همگامی، تغییرات سیکلی بزرگی در جریانها و ولتاژهای ماشینِ تحت تأثیر وجود خواهد داشت، فرکانس این تغییرات تابعی از میزان لغزش قطبهای آن است. جریانهای با دامنهٔ زیاد و کارکرد در فرکانس غیر نامی ممکن است به تنشهای سیم‌پیچی[1] و گشتاورهای تپشی[2] منجر گردد که خود می‌تواند سبب تحریک نوسانهای مکانیکی شود که پتانسیل صدمه زدن را داراست. همچنین خطر از دست دادن تجهیزات جنبی واحد تحت تأثیر و نیز تجهیزات جنبی واحدهای پایدارِ نزدیک، نیز وجود دارد.

به منظور جلوگیری از این عواقب مخرب بر روی واحد و باقیماندهٔ سیستم، لازم است یک رلهٔ عدم همگامی چنان وجود داشته باشد که واحد را از مدار خارج کند باید به جای شروع یک خارج شدن کامل واحد، خارج کردن به قطع ماشینْ از سیستم با عمل کردن کلید ژنراتور محدود شود. این کار سنکرونیزم مجدد ژنراتور را به محض پایدار شدن موقعیت مجاز می‌دارد.

رله‌های خارج کردن ژنراتورها در عدم همگامی

طرحهای اصولی موجود، مشابه طرحهایی است که وضعیت عدم همگامی بر روی سیستم انتقال را تشخیص می‌دهند. لیکن، هیچ استاندارد صنعتی یا تجربیات متداولی در مورد حفاظت عدم همگامی ژنراتور وجود ندارد. مرجع ۲۸ نتایج حاصل از تجربیات سودمند و توصیف طرحهای ممکن را فراهم می‌کند. در اینجا دو مورد از این طرحها را بررسی می‌کنیم.

الف) طرح عنصر مهو. اصولی که این طرح بر آن پایه‌ریزی شده است در شکل ۱۳ ـ ۴۶ نمایش داده شده است. رلهٔ مهو، امپدانس ظاهری را (با نگاه کردن به داخل شبکه) در پایانهٔ فشار قوی (HT) ترانسفورمر واحد زیرنظر داشته و چنان تنظیم شده است تا به داخل ژنراتور محلی دسترسی داشته باشد.

با وارد شدن امپدانس ظاهری اندازه‌گیری شده در شین HT به داخل مشخصهٔ افست مهو، رله فوراً ژنراتور را از مدار خارج می‌کند. هدفِ تنظیم (حاصل از انتخاب اندازهٔ دایره)، مجاز داشتن

1. Winding Stresses
2. Pulsating torques

● حداقل‌سازی اثر قطع خط[1] بر نواحی حساس بار و بازیابی ولتاژهای معمول.

اما، بازبست با سرعت زیاد ممکن است در کلیهٔ موارد قابل قبول نباشد و این احتمال وجود دارد که بازبست به داخل یک خطای دائمی موجب ناپایداری سیستم شود. بسیاری از شرکتها بدیهی فرض می‌کنند که کلیهٔ خطاهای مدار، دائمی هستند و از این رو سیستم باید بازبست در خطا را به طور موفقیت‌آمیزی تحمل کند. در چنین مواردی، بازبست با سرعت زیاد به افزایش قابلیت انعطاف کارکرد سیستم کمکی نمی‌کند.

علاوه بر این، بازبست با سرعت زیاد در خطوط نزدیک به واحدهای تولید توربین بخار می‌تواند فرسودگی[2] محور را افزایش دهد. این موضوع در فصل پانزدهم مورد بررسی بیشتر قرار گرفته است.

با توجه به ملاحظات بالا، عموماً *از بازبست زماندار و تحت نظارت* بر روی سیستم انتقال سنگین استفاده می‌شود. این موضوع، تضمین می‌کند که وضعیت خاصی برآورده شده، توالی مطلوبی از بازبست کلیدها دنبال می‌گردد. شیوهٔ کلی کار به صورت زیر است:

● پتانسیل با بستن یک کلید از پیش انتخاب شده در یک پایانه بعد از زمان تأخیری بین ۵ تا ۱۰ ثانیه اعمال می‌شود.

● در پایانه‌هایی که احتمال وقوع عدم سنکرونیزم زیاد است (به عنوان مثال، در نقاطی از سیستم با تعداد کمی خط)، بعد از اینکه خط به طور موفقیت‌آمیزی با زوایای قابل قبول دو سر کلیدهای باز (اندازه‌گیری شده توسط رله‌های سینکروچک[3]) برای حداقل یک ثانیه، پتانسیل‌دار باقی ماند، کلیدهای دیگر مربوط به خط به طور خودکار بسته می‌شوند.

هنگامی که احتمال وقوع عدم سنکرونیزم بین پایانه‌ها حداقل باشد، مدار به وسیله بستن کلیهٔ کلیدهای باقیماندهٔ مربوط به مدار (بعد از آنکه به طور موفقیت‌آمیزی برای حدود ۰/۵ ثانیه پتانسیل‌دار باقی ماند)، به طور خودکار بر بار قرار می‌گیرد.

۱۳ ـ ۵ ـ ۷ حفاظت عدم همگامی ژنراتور

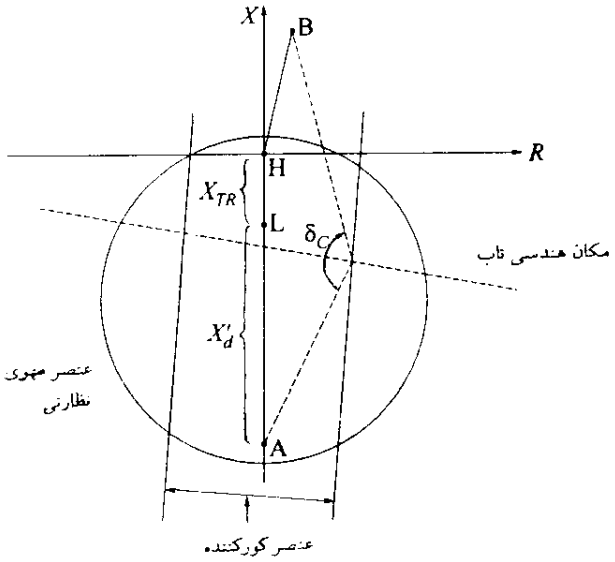
تشخیص موقعیت عدم همگامی و جداسازی ژنراتور(های) ناپایدار، در مواقعی که مرکز الکتریکی خارج از آن و در سیستم انتقال است، به وسیلهٔ حفاظت خط انجام می‌شود. لیکن، در مواقعی که مرکز الکتریکی در داخل ژنراتور یا ترانسفورمر بالابرنده است، باید یک رلهٔ خاص در

1. Line Outage 2. Fatigue 3. Synchrocheck

اجتناب کرد زیرا کلید مدار را حین قطع، تحت حداکثر ولتاژ بازیافت[1] قرار می‌دهد.

برای حداقل کردن احتمال عمل اشتباه در شرایط بی‌پتانسیلی، در بعضی از مواقع از آشکارساز خطای اضافه جریان برای نظارت بر مشخصهٔ مهو استفاده می‌شود.

ب) طرح کور کننده. این طرح شامل دو عنصر امپدانس، به عنوان کور کننده، و یک رلهٔ نظارتی با مشخصهٔ افست مهو می‌باشد. مشخصه‌ها در شکل ۱۳ ـ ۴۷ نشان داده شده است.

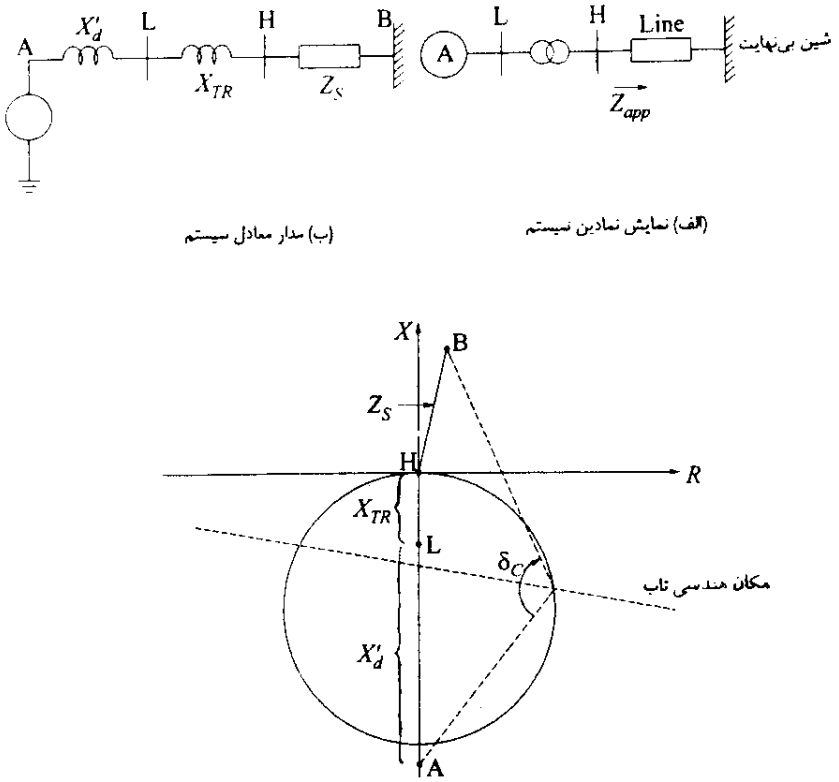


شکل ۱۳ ـ ۴۷ حفاظت عدم همگامی ژنراتور با بکارگیری طرح کور کننده

روشهای زیادی برای اِعمال کور کننده‌ها وجود دارد. در یک طرح، ژنراتور هنگامی که مکان امپدانس ظاهری در داخل مشخصهٔ مهو قرار گیرد و هر دو کور کننده را قطع کند، از مدار خارج می‌شود. زمان قطع کور کننده‌ها متجاوز از یک مقدار تعیین شده (نوعاً ۰/۱۵ ثانیه) می‌باشد.

این طرح قدرت انتخاب بیشتری را نسبت به طرح عنصر مهو ارائه می‌کند. همچنین تنظیم طرح به گونه‌ای که عمل کلید در یک زاویهٔ نوسان معین، مؤثر واقع شود نیز ساده است. از نظر زمان تأخیر مطرح در تشخیص موقعیت عدم همگامی، هماهنگی با حفاظت خط انتقال ساده

1. Recovery Voltage



(الف) نمایش نمادین سیستم

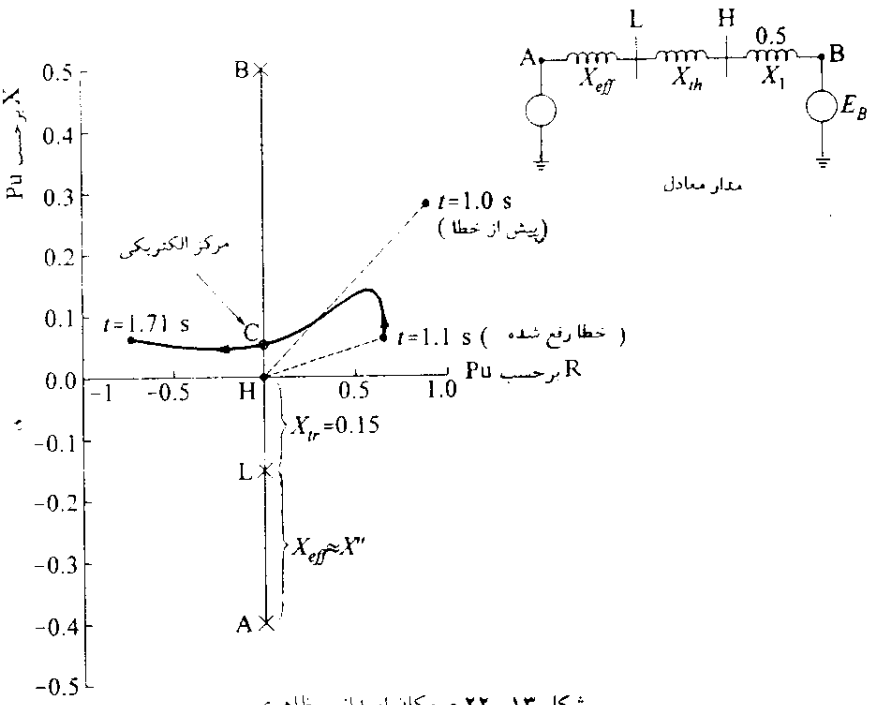
(ب) مدار معادل سیستم

(ج) مشخصه رله و مکان هندسی تاب هنگامی که در شین HV اندازه‌گیری شده است.

شکل ۱۳ ـ ۴۶ حفاظت عدم همگامی ژنراتور با بکارگیری طرح عنصر مهو

عمل خارج کردن تنها برای نوسانهای ناپایدار است. به طور نوعی، زاویهٔ δ_c در نقطه‌ای که امپدانسِ نوسان، وارد مشخصهٔ رله می‌شود در حدود °۱۲۰ تنظیم می‌شود که این زاویه، جداسازی زاویه‌ایِ حداکثر ماشین از سیستم است که ممکن است بدون از دست دادن سنکرونیزم رخ دهد.

اگر دایرهٔ رله خیلی بزرگ باشد، ممکن است حفاظت، ژنراتور را برای نوسانهای پایدار از مدار خارج کند. اگر دایرهٔ رله خیلی کوچک باشد (δ_c بزرگ)، ممکن است طرح، ژنراتور را برای نوسانهای ناپایدار از مدار خارج نکند. به علاوه، اگر δ_c خیلی بزرگ باشد ممکن است هنگامی که جداسازی زاویه‌ای به °۱۸۰ میل می‌کند، عمل خارج کردن رخ دهد. البته باید از این مورد



شکل ۱۳ ـ ۲۲ م مکان امپدانس ظاهری

۱۳ ـ ۵ ـ ۸ حفاظت فقدان تحریک

ممکن است از دست دادن تحریک در ماشین سنکرون به واسطهٔ شرایط گسترهٔ وسیعی از وضعیتهای غیر عادی مدار تحریک ایجاد شود، که ممکن است مواردی از اتصال کوتاه کامل سیم‌پیچ تحریک تا سیم‌پیچ عملاً مدار باز تحریک را شامل شود.

هنگامی که ژنراتوری تحریک را از دست می‌دهد، همانند ژنراتوری القایی عمل می‌نماید که در بالای سرعت سنکرون قرار گرفته است. در این حالت، تحریک از سیستم قدرت فراهم می‌شود و از این رو، ماشین توان راکتیو از سیستم می‌گیرد. که می‌تواند موجب کاهشهای شدید ولتاژ سیستم شود.

ادامهٔ بهره‌برداری از ماشین به عنوان ژنراتور القایی ممکن است به دلیل گرم شدن روتور و استاتور موجب بروز صدماتی شود. جریان استاتور ممکن است حتی به ۲ تا ۳ برابر مقدار نامی بسته به لغزش برسد. فرکانس لغزش القا شدهٔ جریانهای روتور نیز ممکن است موجب اضافه گرمایش روتور در ژنراتورهای توربین بخار گردد. زمان رسیدن به حد خطرناک اضافه گرمایش، بسته به لغزش در حدود چندین دقیقه است.

است و همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۴۷ نشان داده شده است، این کار اجازه می‌دهد تا سیستم حفاظتی به ورای شین فشار قویِ ترانسفورمرِ بالابرنده دسترسی پیدا کند.

در شکل ۱۳ ـ ۴۷، فرض شده است که رله در شین HT ترانسفورمر بالابرنده قرار داده شده است. این رله می‌تواند به همان راحتی در پایانه‌های ژنراتور قرار گرفته باشد، که در آن حالت مبدأ نمودار R—X به نقطهٔ L انتقال داده می‌شود.

مثال ۱۳ ـ ۶

برای حالت ناپایدار زیر که در مثال ۱۳ ـ ۲ شبیه‌سازی شده است، امپدانس ظاهری اندازه‌گیری شده با یک رلهٔ دیستانس در موقعیت شین HT را رسم کنید:

اگر تحریک کننده بر روی کنترل دستی (E_{fd} ثابت) و دورهٔ خطا مساوی با ۰/۱ ثانیه باشد، موقعیت مرکز الکتریکی را شناسایی و راکتانس مؤثر ماشین را محاسبه کنید.

حل

شکل ۱۳ ـ ۲۲ م مکان امپدانس ظاهری را که حین شبیه‌سازی حوزهٔ زمان محاسبه شده نشان می‌دهد. از نمودار مکان امپدانس ظاهری، مشاهده می‌کنیم که مرکز الکتریکی (C) بین شین HT (H) و شین بینهایت (B) قرار دارد. راکتانس بین نقاط H و C، اندازه‌گیری شده روی نمودار، برابر با ۰/۵۵ pu است.

بنابراین:

$$AC = BC$$

یا:

$$X_{eff} + ۰/۱۵ + ۰/۰۵۵ = ۰/۵ - ۰/۰۵۵$$

با حل، داریم:

$$X_{eff} = ۰/۵ - ۰/۱۵ - ۲ \times ۰/۰۵۵$$
$$= ۰/۲۴ \text{ pu}$$

که مساوی با میانگین $X''_d = ۰/۲۳$ و $X''_q = ۰/۲۵$ است.

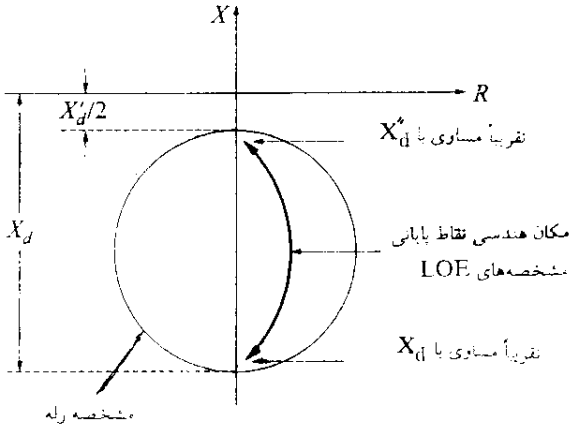
روتور، 180° شود قطع شده است. بعد از این نقطه، تغییرات امپدانس به دلیل لغزش قطب، بی‌ضابطه خواهد شد.

هنگامی که تحریک قطع شود، شار دور تحریک و ولتاژ داخلی مؤثر بسته به ثابت زمانیِ مدار تحریک بتدریج کاهش می‌یابد. که به کاهش تدریجیِ خروجی توان حقیقی، همراه با افزایش زاویهٔ روتور منجر می‌گردد. به علاوه، ماشین مقادیر فزاینده‌ای از توان راکتیو را با کاهش شار تحریک جذب می‌کند. مدار معادل دو ماشینهٔ نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۳۶، موقعیتی را نشان می‌دهد که در آن ولتاژ داخلی E_A روند کاهشی و زاویهٔ روتور δ روند افزایشی دارند. بنابراین، مشخصهٔ از دست دادن تحریک، ترکیبی از دو خانواده از منحنیهای نشان داده شده در شکلهای ۱۳ ـ ۳۹ و ۱۳ ـ ۴۰ است. مسیر واقعی دنبال شده به نرخهای نسبی تغییر در E_A و δ بستگی دارد که خود آنها نیز به خروجی اولیهٔ ژنراتور، قدرت انتقال، و ثابت زمانیِ مدار تحریک بستگی دارند. اثر کلی بر امپدانس ظاهری در پایانه‌های ماشین مطابق شکل ۱۳ ـ ۴۸ است.

با یک خروجی اولیهٔ زیاد، زاویهٔ روتور با سرعت بیشتری جلو می‌رود و در زمان کوتاهتری (به‌طور نوعی در حدود ۱۰ ثانیه) به نقطهٔ پایانیِ نشان داده شده در شکل می‌رسد. لغزش نیز نسبتاً زیاد است و از این رو مکان امپدانس در مقداری متناظر با میانگین راکتانسهای محور d و q زیر گذرا خاتمه می‌یابد.

از طرف دیگر، با یک خروجی اولیهٔ کم، زاویهٔ روتور به کندی جلو می‌رود و لغزش در نقطهٔ پایانی کوچک است. مکان امپدانس در مقداری متناظر با میانگین راکتانسهای سنکرون محور d و q خاتمه می‌یابد.

مکان نقاط پایانی مشخصهٔ فقدان تحریک در شکل ۱۳ ـ ۴۹ نشان داده شده است. این مکان



شکل ۱۳ ـ ۴۹ رلهٔ LOE و مشخصه‌های رله

اگر سیستم قدرتی که به آن ژنراتور وصل شده است ضعیف باشد، از دست دادن تحریک ژنراتور ممکن است کاهش ولتاژ گسترده‌ای را موجب شود. این کاهش ولتاژ نیز به نوبهٔ خود می‌تواند موجب از دست رفتن بار و سنکرونیزم سایر ژنراتورهای سیستم گردد. برای جلوگیری از این مسائل، باید رلهٔ عکس‌العمل سریع فقدان تحریک را به منظور وادار به عمل کردن کلیدهای اصلی و تحریک ژنراتور خطادار تأمین کرد.

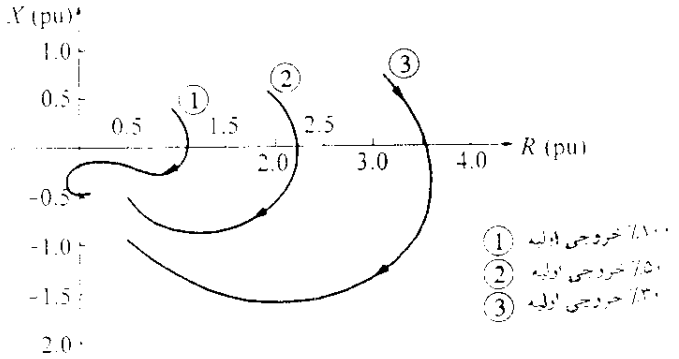
حفاظت قدیمتر فقدان تحریک، شامل رله‌های کمبود جریان وصل شده در مدار تحریک می‌شد. چنین رله‌ای نمی‌توانست بین تحریک کاهش یافتهٔ تعمدی حین وضعیت بار سبک و فقدان تصادفی تحریک فرقی قائل شود.

تجهیزات رله‌ای که امروزه به طور وسیع برای حفاظت فقدان تحریک به کار گرفته می‌شود، یک رلهٔ دیستانسی جهتدار متصل به پایانه‌های ژنراتور است. این طرح براساس اصول سی.آر.میسن (مرجع ۲۰) پایه‌ریزی شده است. به منظور درک اساسی این رله، نخست باید مشخصه‌های فقدان تحریک ژنراتور را بدرستی بفهمیم.

مشخصه‌های فقدان تحریک (LOE) [۲۳، ۲۴، ۲۹]

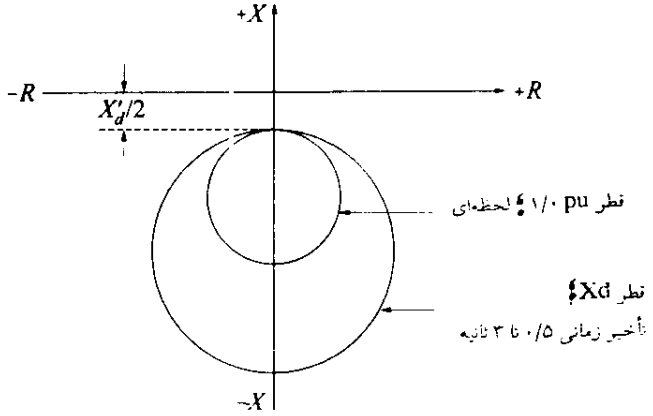
پاسخ ماشین به دنبال از دست دادن تحریک به وضعیت بارگذاری اولیه بستگی دارد.

شکل ۱۳ ـ ۴۸ صورتهای کلی مسیرهایی را که توسط امپدانس ظاهریِ اندازه‌گیری شده در پایانهٔ ژنراتور، هنگامی که مدار تحریک برای سه وضعیت مختلفِ خروجیِ توانِ اولیهٔ ژنراتور، اتصال کوتاه شده است، نشان می‌دهد. مکانهای امپدانس ظاهری بر روی نمودار R−X بر مبنای امپدانس مبنای واحدِ ماشین رسم شده است. هر کدام از مشخصه‌ها درست قبل از آنکه زاویهٔ

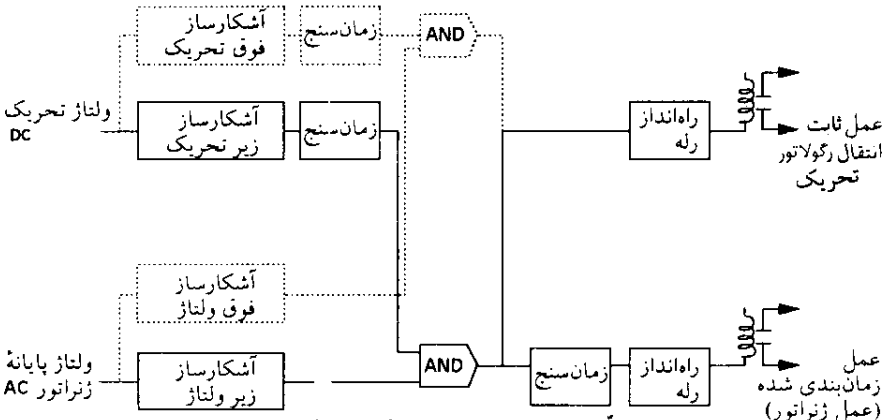


شکل ۱۳ ـ ۴۸ مشخصه‌های نوعی LOE

بلوکهای خط چین نمایش داده شده است.



شکل ۱۳ ـ ۵۰ حفاظت LOE با دو رلهٔ مهو



بلوکهای خطّ‌چین، حفاظت فوق تحریک را نشان می‌دهد

شکل ۱۳ ـ ۵۱ یک رلهٔ فقدان تحریک با قدرت تشخیص [۳۱]

مثال ۱۳ ـ ۷

در این مثال، پاسخ سیستم مثال ۱۳ ـ ۲ را به از دست دادن تحریک ژنراتور بررسی می‌کنیم.

الف) اگر تحریک ژنراتور معادل نشان دهندهٔ چهار واحد نیروگاه به طور ناگهانی اتصال کوتاه

بین‌راکتانسهای زیرگذرا و راکتانسهای سنکرون، گسترده شده است. گرچه هیچگاه به این مقادیرنهایی نخواهیم‌رسید، لیکن در شناسایی مشخصهٔ رلهٔ LOE سودمند است. با لحاظ کردن مکان نقاط پایانیِ نشان‌داده‌شده در شکل ۱۳ ـ ۴۹، قبل از آنکه لغزش قطبهای ژنراتور شروع شود، رله عمل‌خواهد کرد.

رله‌های فقدان تحریک

مشخصه‌های رلهٔ LOE پیشنهادی میسن در مرجع ۲۹ در شکل ۱۳ ـ ۴۹ نشان داده شده است. آن یک رله مهوی افست است. افست، مساوی با نیمی از راکتانس گذرای ژنراتور است. کل پوشش رله با راکتانس سنکرون X_d برابر است.

مقدار انحراف مشخصهٔ رله از مبدأ، قدرت انتخاب را بر ضد عمل غیر مناسب حین نوسانهای توان یا وضعیت عدم همگامی فراهم می‌آورد. در حالت نهایی امپدانس خارجی صفر، مرکز الکتریکی (تقاطع مکان نوسان با مکان امپدانس سیستم) در مرکز امپدانس ژنراتور، X'_d قرار دارد. بنابراین، مشخصهٔ رله LOE به اندازهٔ $X'_{d/z}$ منحرف می‌شود.

رلهٔ مهوی افست با مشخصه‌های بالا به طور وسیعی به‌کار گرفته شده است و عموماً به طور رضایتبخشی عمل کرده است.

به منظور فراهم آوردن قدرت انتخاب بیشتر در مقابل عمل غلط حین بهره‌برداری زیر تحریک، نوسانهای گذرای پایدار، یا اغتشاشهای سیستم که موجب کارکرد در زیر فرکانس اسمی می‌شود در مرجع ۳۰، جِی. بردی[1]، استفاده از دو رلهٔ مهوی افست با مشخصه‌های نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۵۰ را پیشنهاد کرده است.

مرجع ۳۱ رله‌ای با قدرت تشخیص برتر راکه در اونتاریو هایدرو[2] در ۱۹۸۷ میلادی ساخته شده است، توضیح می‌دهد. این رله می‌تواند از خارج شدن واحد برای خرابیهای قابل بازیافت تحریک جلوگیری کند و واحد را برای خرابیهای غیر قابل بازیافت سریعتر از مدار خارج کند. رله از تحریک ژنراتور و ولتاژهای پایانه به عنوان ورودی استفاده می‌کند. این رله بر این اساس عمل می‌کند که هرگاه ولتاژ پایانه زیاد است باید ولتاژ تحریک کم باشد و برعکس، هرگاه ولتاژ پایانه، کم است ولتاژ تحریک باید زیاد باشد. برای یک مشکل آشکار شدهٔ تحریک، رله نخست سعی خواهد کرد تا کنترل ولتاژ را به یک AVR و یا تحریک کنندهٔ جایگزین، منتقل کند. اگر این عمل مشکل را حل نکند رله، واحد را از مدار خارج خواهد کرد. شکل ۱۳ ـ ۵۱ نمودار بلوکی رله را نشان می‌دهد. رله همچنین یک حفاظت فوق تحریک انتخابی را شامل می‌شود که در شکل با

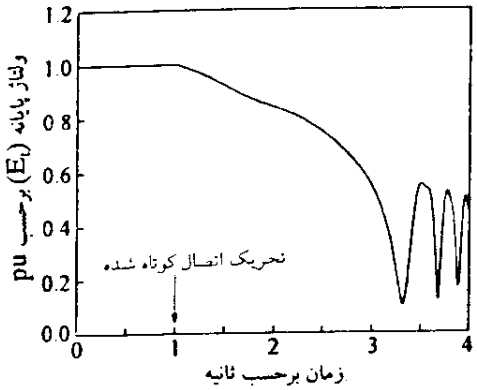
1. J. Berdy 2. Ontario Hydro

نمودارهای پاسخ زمانی متناظر E_t، P، Q، و δ در شکل ۱۳ ـ ۲۴ م نشان داده شده‌اند. این نمودارها در توصیف شکل مکان امپدانس ظاهری سودمند هستند، اگر توجه کنیم که:

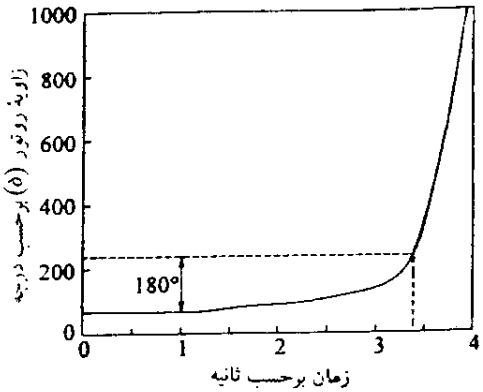
$$Z_{app} = \frac{\tilde{E}}{\tilde{I}_t} = R + jX$$

که در آن:

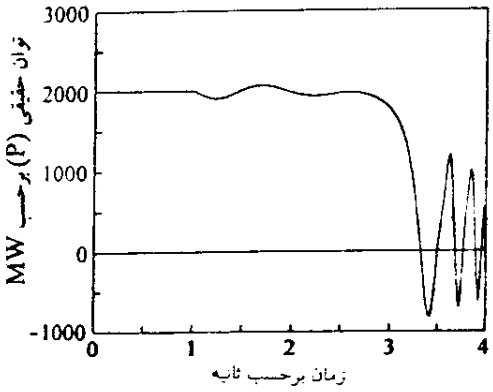
$$R = \frac{E_t^2 P}{P^2 + Q^2} \qquad X = \frac{E_t^2 Q}{P^2 + Q^2}$$



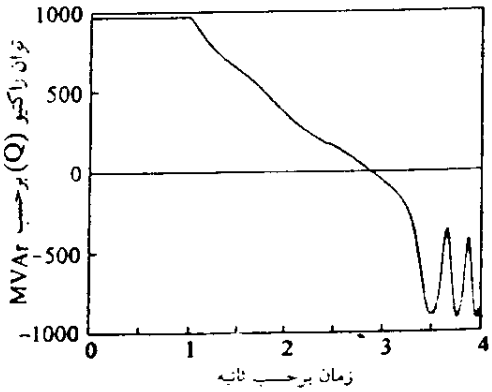
(الف) پاسخ زمانی ولتاژ پایانه (E_t)



(ب) پاسخ زمانی زاویهٔ روتور (δ)



(ج) پاسخ زمانی توان حقیقی (P)



(د) پاسخ زمانی توان راکتیو (Q)

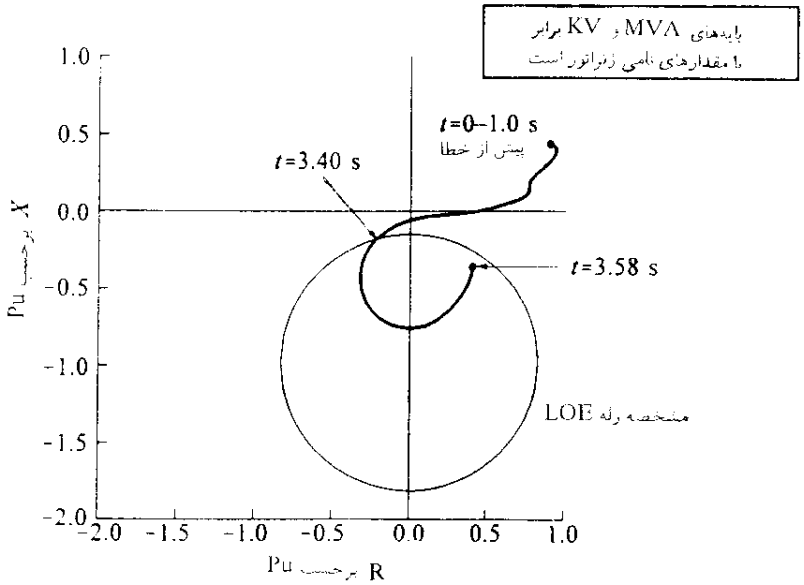
شود (مستقیماً، با مقاومت خارجی صفر)، مکان امپدانس ظاهری اندازه‌گیری شده به وسیلهٔ رلهٔ LOE را که در پایانه‌های ژنراتور قرار دارد، تعیین کنید. فرض کنید رلهٔ LOE، مشخصه‌ای مشابه مشخصهٔ نشان داده شده در شکل ۱۳ ـ ۴۹ دارد. پاسخهای زمانی متناظر ولتاژ پایانهٔ ژنراتور، خروجیهای توان حقیقی و راکتیو و زاویهٔ روتور را نشان دهید.

ب) اگر فقط تحریک یکی از چهار ژنراتور نیروگاه، اتصال کوتاه شود (مستقیماً)، مکان امپدانس ظاهری را تعیین کنید. سایر ژنراتورها به طور عادی با کنترل تحریک عمل می‌کنند.

فرض‌کنیدکه درهرکدام از حالتهای بالا وضعیت کار اولیهٔ سیستم همانند مثال ۱۳ ـ ۲ می‌باشد.

حل

الف) مکان امپدانس ظاهری محاسبه شده به کمک برنامهٔ پایداری گذرا در شکل ۱۳ ـ ۲۳ م نشان داده شده است. ژنراتور به صورت تفصیلی شامل سیم‌پیچهای میراکننده است و اتصال کوتاه تحریک با قرار دادن ولتاژ میدان E_{fd} برابر صفر در (ثانیه) t = ۱/۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳ ـ ۲۳ م امپدانس ظاهری در مبنای واحد اندازه‌گیری شده به وسیلهٔ رلهٔ LOE هنگامی که سیم پیچهای تحریک کلیهٔ چهار واحد اتصال کوتاه شده است.

سیستم

ناحیهٔ مورد علاقه برای سیستم تحت مطالعه در شکل ۱۳ ـ ۵۲ نشان داده شده است. این ناحیه شامل یک نیروگاه ۸ واحدی MW ۷۰۰۰ هسته‌ای است که از طریق دو خط مدار دوگانهٔ KV ۵۰۰ و سه خط مدار دوگانهٔ KV ۲۳۰ به بقیهٔ سیستم وصل است. مدل سیستم، که قسمتی از یک سیستم قدرت به هم پیوستهٔ بزرگ را نشان می‌دهد، شامل قسمتهای زیر است:

- ۲۲۷۹ شین، ۴۶۷ ماشین و ۶۵۸۱ شاخه؛
- مدل کلیهٔ ماشینها و کنترلهای مربوطه به طور تفصیلی؛
- مدل بارها به صورت وابستهٔ ولتاژ (Z ۱۰۰٪ = Q و Z ۵۰٪ + I ۵۰٪ = P).

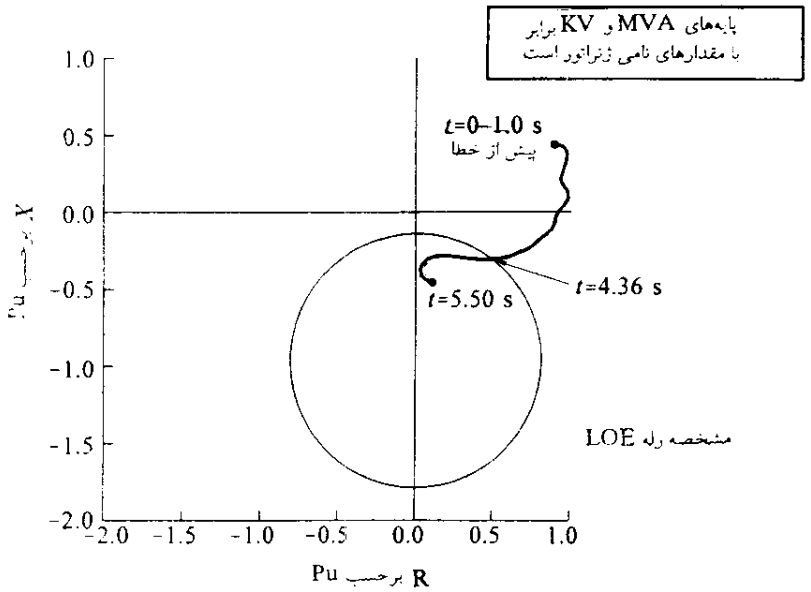
پیشامد

یک خطای دو خط به زمین (LLG) بر روی خط مدار دوگانه KV ۵۰۰ شامل مدارهای ۱ و ۲ در شکل ۱۳ ـ ۵۲، رخ می‌دهد. موقعیت خطا به صورت پیوند گاه X نشان داده شده است، که نزدیکترین موقعیت را به نیروگاه، که در آن دو مدار به طور مشترک یک دکل دارند، نشان می‌دهد. توالی کلیدزنی به صورت زیر است:

زمان (ms)	حادثه
۰	بدون اغتشاش
۱۰۰	اِعمال خطای LLG بر مدارهای ۱ و ۲ در پیوندگاه X
۱۶۴	رفع محلی انتهایی: باز کردن کلیدها در شین ۱ برای مدار ۱ باز کردن کلیدها در شین ۲ برای مدار ۲ این ۶۴ ms بعد از اعمال خطا رخ می‌دهد، و این زمان به صورت مجموع زمان تشخیص خطا (۲۵ ms)، زمان رلهٔ کمکی (۶ ms)، و زمان رفع کلید (۲ سیکل = ۳۳ ms)، محاسبه می‌شود. در این زمان، خطا به دو انتهای مدارهای ۱ و ۲ در پیوندگاه X، وصل باقی می‌ماند.
۱۸۷	رفع راه دور انتهایی: باز کردن کلیدها در شین ۴ برای مدار ۲ باز کردن کلیدها در شین ۳ برای مدار ۱ رفع شدن خطا (خط جدا شده است) این ۸۷ms بعد از اعمال خطا رخ می‌دهد و این زمان به‌صورت مجموع زمان تشخیص خطا (۲۵ ms)، زمان رلهٔ کمکی (۱۲ ms)، زمان مخابره (مایکروویو؛ ۱۷ ms)، و زمان رفع کلید (۳۳ ms = ۲ سیکل) محاسبه می‌شود.
۵۰۰	پایان شبیه‌سازی

از شکل ۱۳ ـ ۲۳ م، مشاهده می‌کنیم که مکان امپدانس ظاهری در (ثانیه) ۳/۴ = t (به عبارت دیگر، ۲/۴ ثانیه بعد از اتصال کوتاه شدن تحریک) وارد مشخصهٔ LOE می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۲۴ «ب» مشاهده می‌کنیم، این زمان متناظر با زمانی است که ژنراتور یک سیکل کامل لغزیده است. همینکه ژنراتور به لغزش قطبها ادامه می‌دهد، P، Q، و E_t در توالی سریع نوسان می‌کنند.

ب) شکل ۱۳ ـ ۲۵ م مکان امپدانس ظاهری را هنگامی که تحریک یکی از ژنراتورها، اتصال کوتاه شده است، نشان می‌دهد. سه ژنراتور دیگر با کنترل AVR و PSS بر روی تحریک، به کار عادی خود ادامه می‌دهند.



شکل ۱۳ ـ ۲۵ م امپدانس ظاهری در مبنای واحد اندازه‌گیری شده با رلهٔ LOE هنگامی که سیم پیچ تحریک یکی از ژنراتورها اتصال کوتاه شده است.

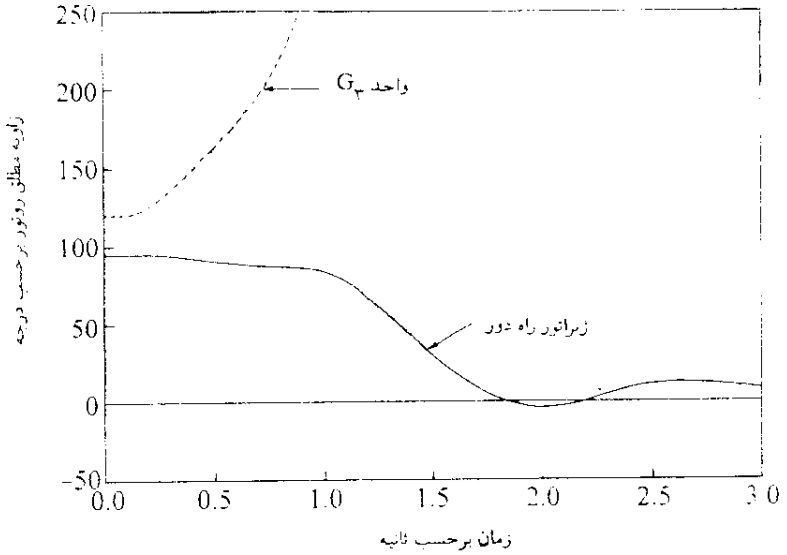
۱۳ ـ ۶ مطالعهٔ موردی پایداری گذرای یک سیستم بزرگ

هدف از این مطالعهٔ موردی نمایش تحلیل یک سیستم عملی بزرگ است که در آن بروز اغتشاش منجر به ناپایداری گذرا می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که چگونه از طریق عملیات رله‌های حفاظتی، قسمت ناپایدار سیستم از سایر قسمتهای آن جدا می‌شود. به علاوه، دو روش برای حفظ پایداری نیز نشان داده می‌شوند.

شبیه‌سازی

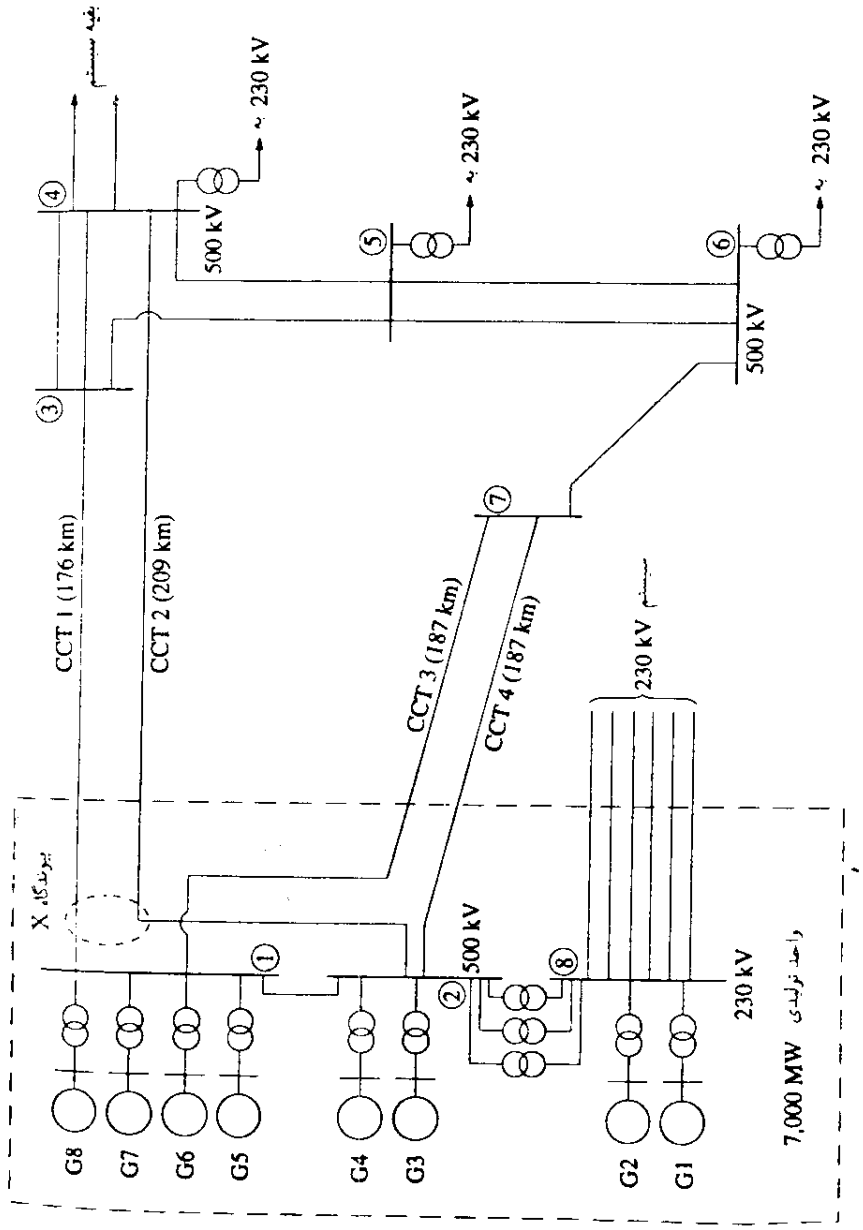
شبیه‌سازی ۵ ثانیه‌ای با استفاده از انتگرالگیری عددی صریح (R−K مرتبهٔ چهارم) و گام زمانی انتگرالگیری ۰/۰۱ ثانیه‌ای انجام شده است.

شکل ۱۳ ـ ۵۳ نمودارهای زاویهٔ مطلق[1] روتور را برای واحد G۳ و برای واحدی در سیستم خارجی نشان می‌دهد. زاویهٔ مطلق نسبت به چارچوب مرجع که به صورت سنکرون می‌چرخد، اندازه‌گیری می‌شود، از نمودارها بوضوح مشاهده می‌شود که واحد سیستم خارجی در حال سنکرون باقی می‌ماند و حال آنکه واحد G۳ سنکرونیزم *را از دست داده*، به *طور یکنوا ناپایدار* می‌شود. پاسخهای هفت واحد دیگر در نیروگاه هسته‌ای، مشابه واحد G۳ است. با ناپایدار شدن واحدهای G۱ تا G۸، بقیهٔ سیستم دچار کمبود تولید[2] می‌شود، و از این رو زوایای مطلق کلیهٔ ماشینها در سیستم به میزان اندکی رانش[3] دارند. از این دیدگاه، معمولاً استفاده از زوایای نسبی به جای زوایای مطلق، انتخاب بهتری است زیرا حرکت نسبی روتورهای بین ماشینها را بسادگی نشان می‌دهد. خطای LLG به از دست رفتن یک خط مدار دوگانه KV ۵۰۰ منجر می‌شود، به واسطهٔ این تلفات کل نیروگاه MW ۷۰۰۰، از یک مسیر به مراتب ضعیفتر (به عبارت دیگر،

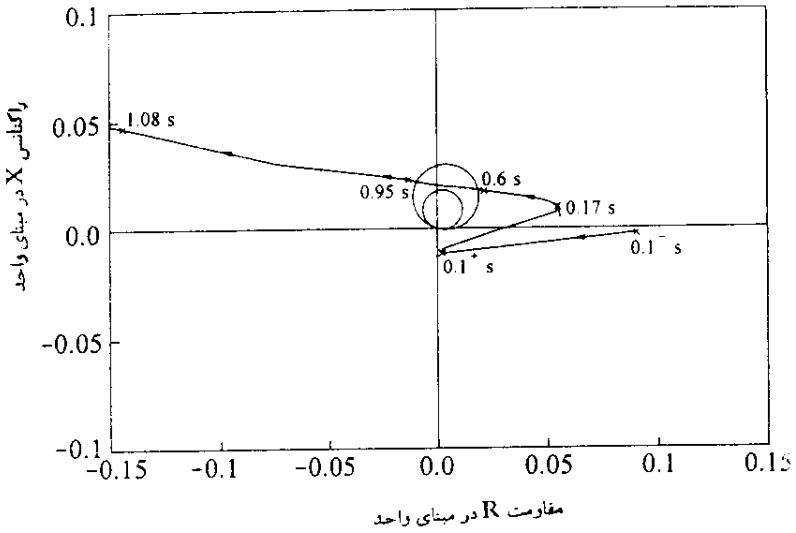


شکل ۱۳ ـ ۵۳ پاسخ زمانی زاویهٔ روتور

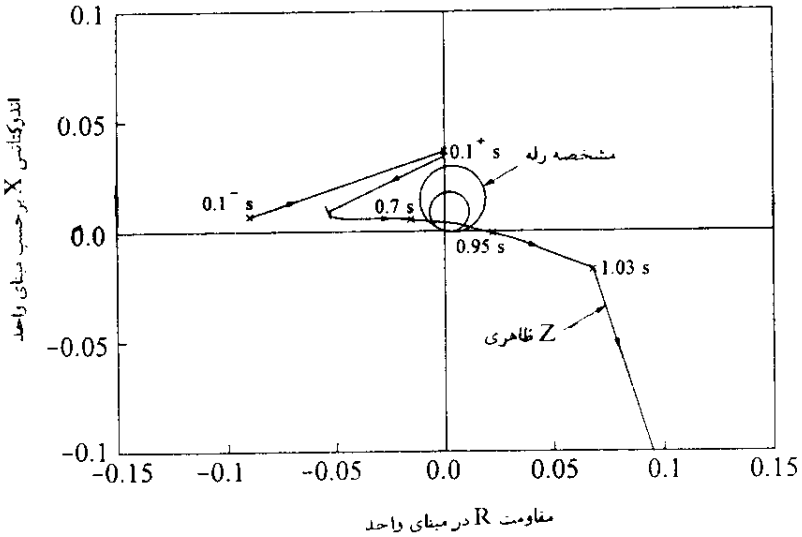
1. Absolute 2. Generation Deficient 3. Drift


بقیه سیستم
~ 230 kV
~ 230 kV
~ 230 kV
500 kV
500 kV
CCT 1 (176 km)
CCT 2 (209 km)
CCT 3 (187 km)
CCT 4 (187 km)
سیستم
230 kV
پیوندگاه X
500 kV
230 kV
واحد تولیدی
7,000 MW
G8
G7
G6
G5
G4
G3
G2
G1

شکل ۱۳ ـ ۵۲



شکل ۱۳ ـ ۵۵ حفاظت خط (مدار ۳) در شین ۱

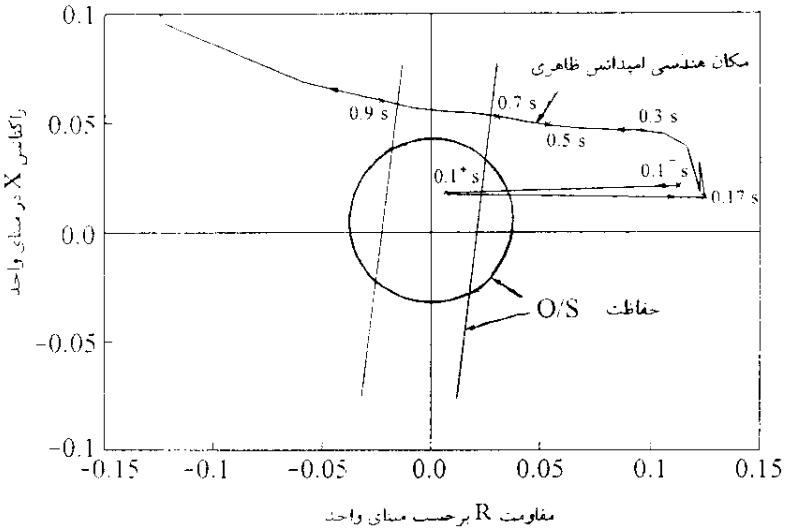


شکل ۱۳ ـ ۵۶ حفاظت خط (مدار ۳) در شین ۷

امپدانس بیشتر)، شامل یک خط KV ۵۰۰ مدار دوگانه و سه خط مدار دوگانهٔ KV ۲۳۰، به سیستم وصل است. نیروگاه نمی‌تواند خروجی کامل را از طریق این مسیر انتقال دهد، و توان شتاب‌دهندهٔ حاصل به ناپایداری منجر می‌شود.

چگونه سیستم در نتیجهٔ ناپایداری از هم جدا می‌شود؟

شکل ۱۳ ـ ۵۴، مشخصه حفاظتِ عدم همگامی را برای واحد G۳ نشان می‌دهد. مکان امپدانس مؤثر شبکه اندازه‌گرفته شدهٔ در پایانه‌های واحد، بر روی دایره سوار شده است. مشاهده می‌شود که مکان امپدانس، به جز در دورهٔ کوتاه بروز خطا، *وارد دایره* نمی‌شود؛ بنابراین، حفاظت واحدها را از مدار خارج نخواهد کرد. نقطهٔ جدایی سیستم بوضوح خارج از پوشش حفاظت عدم همگامی است.



شکل ۱۳ ـ ۵۴ حفاظت عدم همگامی واحد G۳

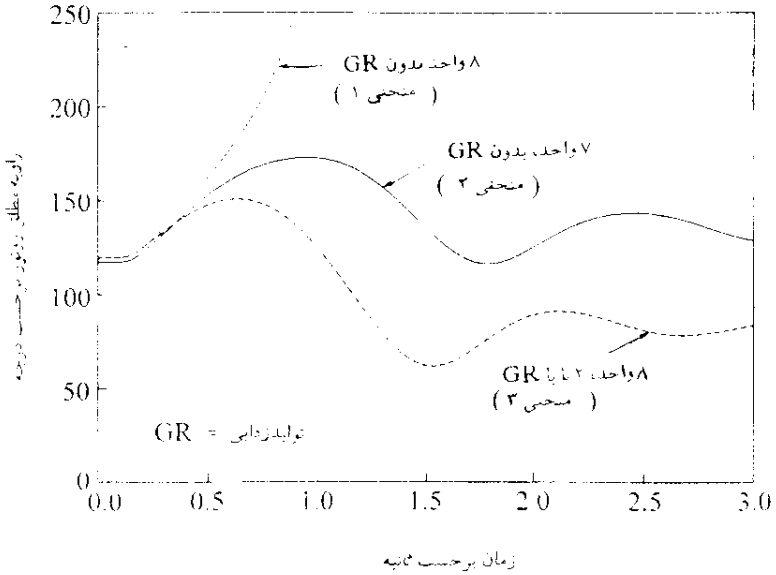
شکل ۱۳ ـ ۵۵ و شکل ۱۳ ـ ۵۶ به ترتیب عملکرد حفاظت خط را برای رله‌های روی مدار ۳ در شین ۱ و ۷ نشان می‌دهد. امپدانسهای ظاهری که در هر سر با نگاه کردن به طرف مقابل اندازه‌گیری شده، بر روی نمودارها نشان داده شده است. رله‌ها از نوع دیستانس مهو هستند و حدود ۷۵٪ از طول خطِّ ناحیه ۱ را می‌پوشانند و حدود ۱۲۵٪ از طول خط ناحیهٔ ۱ را

روشهای حفظ پایداری

همان‌طور که در فصل هفدهم بحث خواهد شد، روشهای بسیاری برای بهبود پایداری گذرا (شامل افزودن تسهیلات سیستم انتقال، باز و بست سریع شیر، رفع سریعتر خطا و غیره) وجود دارد. در اینجا، ما دو مورد از این روشها را بیان می‌کنیم:

الف) کاهش خروجی قبل از بروز پیش آمد در نیروگاه؛ اگر واحدی از مدار خارج شود (که خروجیِ آن به سایر واحدهای سیستم خارجی توزیع شده باشد)، کل خروجی نیروگاه به اندازهٔ کافی کاهش خواهد یافت تا پس از بروز خطای LLG، پایداری را تضمین کند. منحنی ۲ در شکل ۱۳ ـ ۵۸ زاویهٔ مطلق روتور را برای واحد G۳ در این حالت نشان می‌دهد. این منحنی نشان می‌دهد که نیروگاه در حال سنکرون باقی می‌ماند. این شیوهٔ حل مسألهٔ ناپایداری، عموماً پرهزینه است زیرا انرژی موجود در نیروگاه بدون استفاده یا محبوس نگه داشته می‌شود.

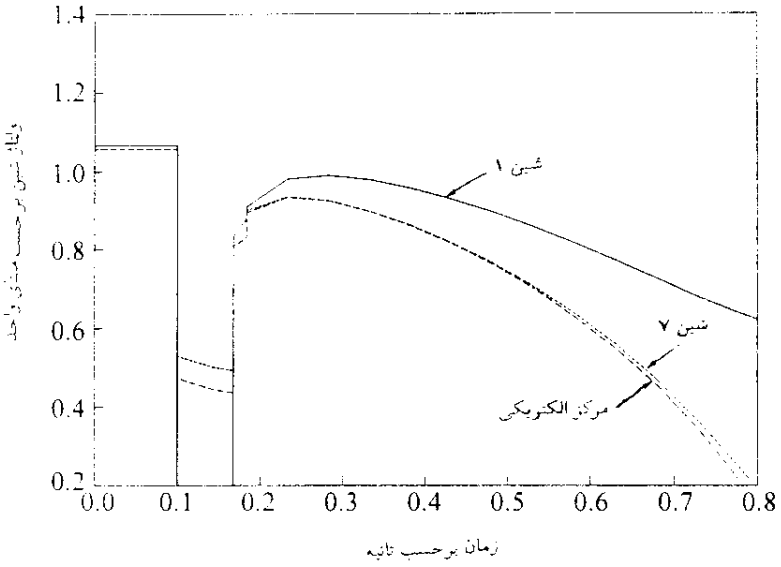
ب) تولیدزدایی به دنبال بروز اغتشاش؛ اگر خروجیِ نیروگاه پس از بروز پیشامد بسرعت کاهش یابد، می‌توان به منظور حفظ سنکرونیزم، توان شتابدهنده را به اندازهٔ کافی کاهش داد. منحنی ۳ در شکل ۱۳ ـ ۵۸ پاسخ زاویهٔ روتور واحد G۳ را در حالتی که دو واحد (G۷ و G۸) در ۱۷۳ ms از مدار خارج شده‌اند نشان می‌دهد (۷۳ میلی ثانیه بعد از اعمال خطا).



شکل ۱۳ ـ ۵۸ پاسخهای زاویهٔ روتور واحد G۳ با و بدون تولیدزدایی

اضافه‌پوشانی می‌کنند. این نمودارها نشان می‌دهند که امپدانس ظاهری وارد رله‌های ناحیهٔ ۲ در شین ۱ و رله‌های ناحیهٔ ۲ و ناحیهٔ ۱ در شین ۷ می‌شود. رلهٔ ناحیهٔ ۱ در شین ۷ مدار ۳ در شین ۷ را از مدار خارج می‌کند و یک سیگنال عمل انتقال را به کلیدهای شین ۱ ارسال می‌کند و بدین ترتیب مدار ۳ در شین ۱ را از مدار خارج خواهد کرد. این منطق برای مدار KV ۵۰۰ همراه (۴ #) نیز برقرار است که به صورت مشابه‌ای عمل خواهد کرد. به دنبال از دست دادن مدارهای KV ۵۰۰ (در حدود ۰/۸ ثانیه)، مدارهای KV ۲۳۰ باقیمانده بشدت زیر بار اضافی خواهند رفت و از طریق عملهای حفاظتی از دست خواهند رفت، بدین وسیله نیروگاهِ ناپایدار به طور کامل از سیستم جدا شود.

از شکل ۱۳ ـ ۵۵، می‌توانیم تعیین کنیم که نوسان امپدانس، مدار را در نقطه‌ای در حدود ۸۴٪ طول خطِّ شین ۱ قطع می‌کند. این نقطه، جای مرکز الکتریکی را به دنبال بروز اغتشاش نشان می‌دهد و از نظر نظری نقطه‌ای است که جدایی رخ می‌دهد (اگرچه تمامی مدار خارج شده است). شکل ۱۳ ـ ۵۷، نمودارهای ولتاژ شین اندازه گرفته شده در شینهای ۱ و ۷ و در مرکز الکتریکی را نشان می‌دهد. اما همینکه ناپایداری رخ دهد، ولتاژ مرکز الکتریکی قبل از سایر ولتاژها فرو می‌ریزد.



شکل ۱۳ ـ ۵۷

در آغاز توپ در پایین کاسه در حالت سکون است، این حالت را *نقطهٔ تعادل پایدار* (SEP)[1] می‌نامند. هنگامی که مقداری انرژی جنبشی به توپ وارد شود، توپ در جهت خاصی حرکت می‌کند و بر روی سطح داخلی کاسه بر روی مسیری که با جهت حرکت اولیه تعیین می‌گردد به طرف بالا غلت خواهد زد. نقطه‌ای که توپ از حرکت باز خواهد ایستاد با مقدار اولیهٔ انرژی پتانسیل وارد شده به سیستم، تعیین می‌شود. اگر توپ قبل از آنکه به لبهٔ کاسه برسد تمامی انرژی جنبشی خود را به انرژی پتانسیل تبدیل کند، به طرف پایین غلت می‌زند و در نهایت بعد از مقداری رفت و برگشت در نقطهٔ تعادل پایدار، مستقر خواهد شد. لیکن، اگر انرژی جنبشی وارد بر سیستم به اندازهٔ کافی زیاد باشد، توپ به لبهٔ کاسه رسیده و از آن بیرون می‌افتد. در این صورت توپ به محدودهٔ ناپایداری وارد می‌شود و به نقطهٔ تعادل پایدار، باز نخواهد گشت. سطح داخل کاسه، *سطح انرژی پتانسیل*[2] و لبهٔ کاسه، *سطح مرزی انرژی پتانسیل*[3] (PEBS) را نشان می‌دهند.

برای تعیین اینکه آیا توپ وارد محدودهٔ ناپایداری خواهد شد یا نه، دو کمیت لازم است: الف) انرژی اولیهٔ جنبشی وارد شده به سیستم و ب) ارتفاع لبه در نقطهٔ عبور. موقعیت نقطهٔ عبور به جهت حرکت اولیه بستگی دارد.

کاربرد در سیستمهای قدرت

اصول لازم برای اعمال روش TEF به تحلیل پایداری سیستم قدرت، به طور مفهومی مشابه اصول حاکم بر توپ غلتان در کاسه است. در آغاز، سیستم در یک نقطهٔ تعادلِ پایدار عمل می‌نماید؛ اگر خطایی رخ دهد، تعادل دچار اغتشاش می‌شود و ماشینهای سنکرون شتاب می‌گیرند. در طول زمان خطا، سیستم قدرت مقداری انرژی جنبشی و پتانسیل می‌گیرد و از SEP دور می‌شود. بعد از رفع خطا، سیستم انرژی جنبشی خود را مشابه توپ غلتانِ رو به بالای سطح انرژی پتانسیل، به انرژی پتانسیل تبدیل می‌کند. برای اجتناب از ناپایداری، در زمانی که نیروهای وارد بر ژنراتورها، سعی در آوردن آنها به طرف موقعیتهای تعادل جدید دارند، سیستم باید توانایی جذب انرژی جنبشی را داشته باشد. این موضوع، به توانایی جذب انرژی پتانسیل به وسیلهٔ سیستم بعد از اغتشاش، بستگی دارد. در یک ترکیب مشخص و پس از بروز اغتشاش در شبکه، مقدار انرژی گذرای حداکثری وجود دارد که سیستم توانایی جذب آن را دارد. در نتیجه، ارزیابی پایداری گذرا مستلزم موارد ذیل است:

1. Stable Equilibrium Point
2. Potential Energy Surface
3. Potential Energy Boundary Surface

۱۳ ـ ۷ روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا

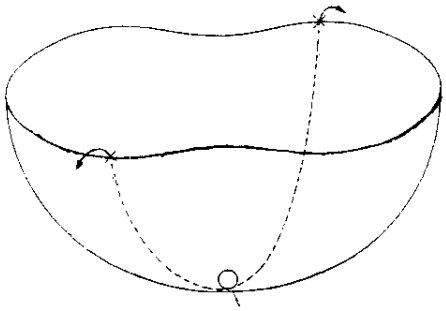
روشهای مستقیم، پایداری را بدون حل صریح معادلاتِ دیفرانسیل سیستم تعیین می‌کنند. این روش، از نظر آکادمیک جذاب است و از زمان کارهای اولیهٔ ماگنوسن[1] [۳۲] و آیلت[2] [۳۳]، که انرژی گذرا را برای ارزیابی پایداریِ گذرا به کار گرفتند، تاکنون توجه زیادی را به خود جلب کرده است. روشهای مبتنی بر انرژی، حالت خاصی از روش کلی دوم لیاپانوف یا روش مستقیم است (فصل ۱۲، بخش ۱۲ ـ ۱ ـ ۴ را ببینید) و تابع انرژی، یک تابعِ مناسب لیاپانوف است [۳۴ ـ ۳۷].

این بخش مفاهیم اساسی را توضیح می‌دهد که روشهای مستقیم بر آنها استوار شده است. البته شرح تفصیلی موضوع، خارج از حوصلهٔ این کتاب است. خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند به مراجع ۳۸ و ۳۹ مراجعه کنند، این کتابها به طور کامل به تحلیل پایداری گذرای سیستم قدرت با روشهای مستقیم اختصاص دارند.

۱۳ ـ ۷ ـ ۱ توصیف روش تابع انرژی گذرا

قیاس توپ چرخان [۴۰ و ۴۱]

همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۵۹ نشان داده شده است، روش انرژی‌گذرا را می‌توان با در نظر گرفتن توپی که بر روی سطح داخلی یک کاسه می‌چرخد توصیف کرد. محدودهٔ داخل کاسه نشان‌دهندهٔ ناحیهٔ پایداری است و محدودهٔ خارج آن، ناپایداری را نشان می‌دهد. لبهٔ کاسه، صورت نامنظمی دارد و از این رو نقاط مختلف روی لبه دارای ارتفاعات متفاوتی هستند.



شکل ۱۳ ـ ۵۹ نمایش توپ چرخان بر روی سطح داخلی یک کاسه

1. Magnusson 2. Aylett

الف) توابعی که به‌طور کافی انرژی گذرایِ مسبب جداسازی یک یا چند ماشین سنکرون از باقیماندهٔ سیستم را توصیف می‌کنند؛

ب) تخمینی از *انرژی بحرانی* مورد نیاز ماشینها برای از دست دادن سنکرونیزم.

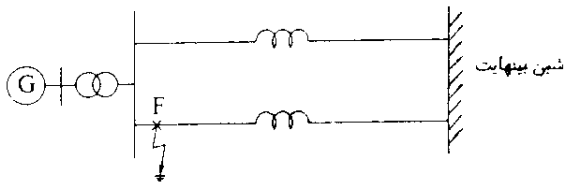
برای یک سیستم دو ماشینه، انرژی بحرانی به طور منحصر به فردی تعریف می‌شود و تحلیل TEF معادل با معیار سطوح مساویِ توضیح داده شده در بخش ۱۳ ـ ۱ است. این موضوع در شکل ۱۳ ـ ۶۰ نمایش داده شده است، که دو نمودار را با زاویهٔ روتور (δ) به عنوان محور افقی نشان می‌دهد. نمودار بالا معیار سطوح مساوی را نشان می‌دهد، که در آن زاویهٔ بحرانی رفع (δ_c) از تساوی سطوح A_1 و B_1 به دست می‌آید. نمودار پایین روش انرژی گذرا را نشان می‌دهد که از آن می‌توان برای مشخص کردن زاویهٔ بحرانی رفع برحسب انرژی پتانسیل و جنبشی استفاده کرد. انرژی جنبشی به دست آمده در طول دورهٔ وجود خطا با انرژی پتانسیل در زاویهٔ روتورِ متناظر جمع می‌شود و برای تعیین پایداری، مجموع، با انرژی پتانسیل بحرانی مقایسه می‌گردد.

با بروز اغتشاش، نقطهٔ تعادل پایداری برای سیستم پس از خطا وجود خواهد داشت. می‌توان برای این SEP پس از خطا، ناحیهٔ جذبی را مطابق شکل ۱۳ ـ ۶۱، تعریف کرد. به طوری که هر مسیر سیستم پس از خطا، در حالتی که حالت سیستم در رفع خطا ($\mathbf{x}_{c1}$) در داخل این ناحیهٔ جذب قرار داشته باشد، در نهایت به سمت SEP همگرا خواهد شد و سیستم، پایدارمی‌ماند. از طرف دیگر، اگر $\mathbf{x}_{c1}$ خارج از ناحیهٔ جذب قرار داشته باشد، سیستم پس از خطا به نقطهٔ تعادل پایدار همگرا نمی‌شود و آن را ناپایدار می‌نامند.

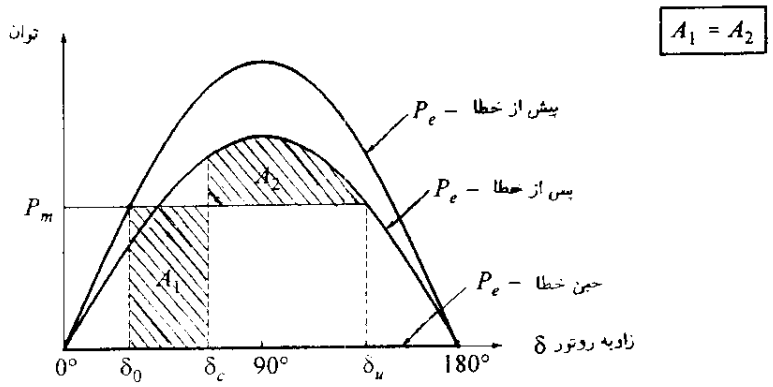
حالت سیستم در رفع خطا ($\mathbf{x}_{c1}$) را می‌توان با مقدار تابع انرژی محاسبه شده در $\mathbf{x}_{c1}$، به عبارت دیگر $V(\mathbf{x}_{c1})$ توصیف کرد. از این رو روش مستقیم، مسألهٔ پایداری را با مقایسهٔ $V(\mathbf{x}_{c1})$ با انرژی بحرانیِ V_{cr}، حل می‌کند. سیستم، پایدار است اگر $V(\mathbf{x}_{c1})$ کمتر از V_{cr} باشد و کمیت $V_{cr} - V(\mathbf{x}_{c1})$ معیار خوبی از پایداری نسبیِ سیستم است. این کمیت به عنوان *حاشیهٔ انرژی گذرا*[1] تعریف می‌شود.

کمیت $V(\mathbf{x}_{c1})$، مقدار انرژی گذرای وارد به سیستم به وسیلهٔ خطا را اندازه‌گیری می‌کند. حال آنکه انرژی بحرانی، قدرت سیستم را پس از خطا اندازه‌گیری می‌کند. به طور دقیقتر، انرژی بحرانی توانایی سیستم را در جذب انرژی پس از خطا، اندازه‌گیری می‌کند.

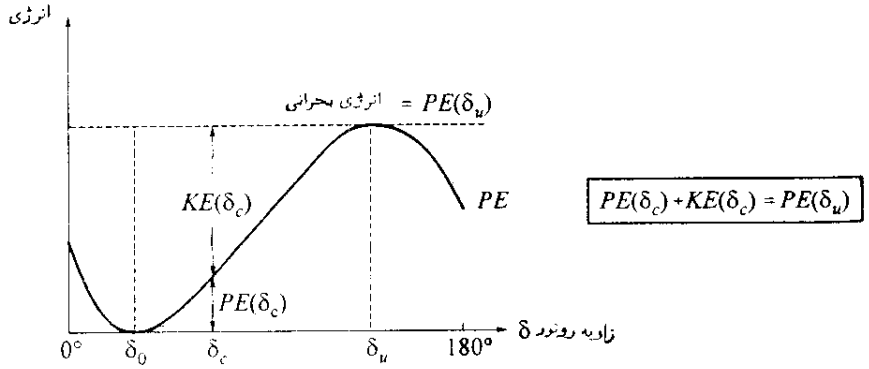
1. Transient Energy Margin



(الف) ترکیب سیستم



(ب) روابط توان–زاویه



(ج) روابط انرژی – زاویه

شکل ۱۳ ـ ۶۰ نمایش معادل بودن روش انرژی گذرا و معیار سطوح مساوی

سطح انرژی ثابت $\{\mathbf{x} \mid V(\mathbf{x}) = K\}$ تقریب زده می‌شود، که در آن K نشان‌دهندهٔ انرژی بحرانی V_{cr} سیستم، پس از خطا می‌باشد.

۱۳ ـ ۷ ـ ۲ تحلیل سیستمهای عملی قدرت [۴۰ ـ ۴۹]

بکارگیری روش مستقیم در سیستمهای عملی قدرت مشکل است و لازم است از تعدادی فرضیات ساده کننده برای این منظور استفاده کرد. تا به امروز، اکثر تحلیلها به نمایش سیستم قدرت شامل نمایش ژنراتورها با مدل کلاسیک و مدلسازی بارها به صورت امپدانسهای ثابت محدود بوده است [۴۲ ـ ۴۵]. اخیراً، تلاشهایی به‌منظور تعمیم روش برای وارد کردن مدلهایی با جزئیات بیشتر انجام شده‌است [۴۶ ـ ۴۷]. لیکن این تلاشها، هنوز در مرحلهٔ توسعه است و تلاشهای تحقیقاتی بیشتری برای بهبود دقت و قابلیت اطمینان روشها به مدلهای تفصیلی، لازم است. در اینجا، بحث را به مدلهای ساده شدهٔ سیستم محدود می‌کنیم.

با وارد کردن اِکتانسهای ژنراتور و ادمیتانسهای بار در ماتریس ادمیتانس گره، می‌توان نوشت:

$$\mathbf{I}_G = \mathbf{Y}_R \mathbf{E}_G \qquad (۸۶ - ۱۳)$$

که در آن $\mathbf{Y}_R$ ماتریس راکتانس کاهش یافته با حذف کلیهٔ گره‌ها به‌جز گره‌های داخلی ژنراتور است، $\mathbf{E}_G$ نیز بردار منبع ولتاژ داخلی ژنراتور و $\mathbf{I}_G$ بردار جریان ژنراتور است.

فرض کنید که ولتاژ داخلی i اُمین ژنراتور، با نمایش فازوری به صورت زیر باشد:

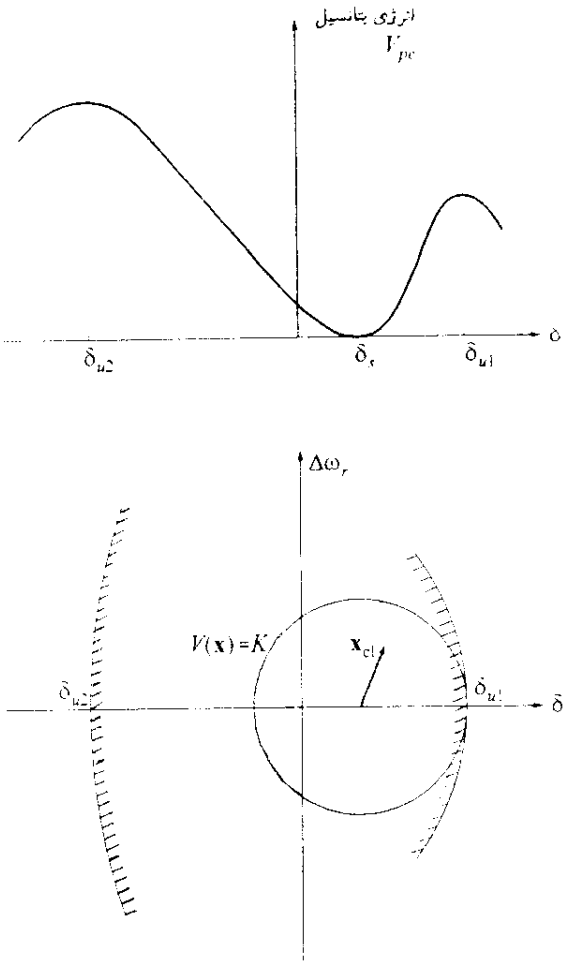
$$\tilde{E}_i = E_i \angle \delta_i$$

و عنصر i اُمین ردیف و j اُمین ستونِ $\mathbf{Y}_R$ نیز به‌صورت زیر باشد:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

در این صورت برای سیستمی با n ماشین، خروجی حقیقی i اُمین ژنراتور به‌صورت زیر داده می‌شود:

$$\begin{aligned} P_i &= \mathrm{Re}(\tilde{E}_i \tilde{I}_i^*) \\ &= \mathrm{Re}(\tilde{E}_i \sum_{j=1}^{n} \tilde{Y}_{ij}^* \tilde{E}_j^*) \qquad (۸۷ - ۱۳) \\ &= E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} E_i E_j \{ B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \} \end{aligned}$$



شکل ۱۳ ـ ۶۱ ناحیهٔ پایدار و تقریب محلی آن

با مراجعه به شکل ۱۳ ـ ۶۱، ملاحظه می‌شود اگر روتور در گسترهٔ δ_{u1} تا δ_{u2} نوسان کند، سیستم پایدارِ گذرا باقی می‌ماند و اگر فراتر از این نوسان کند سیستم ناپایدار خواهد شد. از این رو نقاط δ_{u1} و δ_{u2} بر روی منحنیِ انرژی پتانسیل، مرزی را برای کلیهٔ مسیرهای زاویهٔ روتور پایدار تشکیل می‌دهند. این مرز را *سطح مرزی انرژی پتانسیل* (PEBS) می‌نامند و نقاط روی این مرز، اوجهای محلی انرژی پتانسیل هستند.

مرز ناحیهٔ پایداری، همان‌طور که در شکل ۱۳ ـ ۶۱ نشان داده شده است، معمولاً با یک

معادلات حرکتِ i اُمین ماشین در چارچوب مرجع COI عبارت است از:

$$2H_i p(\omega_i) = P'_{mi} - P_{ei} - \frac{H_i}{H_T} P_{COI} \qquad (۹۵ - ۱۳)$$

$$p(\theta_i) = \omega_i \omega_0 \qquad (۹۶ - ۱۳)$$

که در آن ω_i سرعت در مبنای واحد i اُمین ماشین نسبت به COI است.

تابع انرژی V توصیف کنندهٔ انرژی گذرای کل سیستم برای سیستم پس از اغتشاش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} J_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^{n} P'_{mi}(\theta_i - \theta_i^s)$$
$$- \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\left[C_{ij}(\cos\theta_{ij} - \cos\theta_{ij}^s) - \int_{\theta_i^s+\theta_j^s}^{\theta_i+\theta_j} D_{ij}\cos\theta_{ij}\, d(\theta_i+\theta_j)\right] \qquad (۹۷ - ۱۳)$$

که در آن:

θ_i^s = زاویهٔ شین i اُم در SEP پس از اغتشاش

$J_i = 2H_i\omega_0$ = گشتاور لختی در مبنای واحد مربوط به i امین ژنراتور

تابع انرژی گذرا از چهار جملهٔ زیر تشکیل شده است:

الف) $\frac{1}{2}\sum J_i\omega_i^2$: تغییر در انرژی جنبشی کلیهٔ ژنراتورها در چارچوب مرجع COI؛

ب) $\sum P'_{mi}(\theta_i - \theta_i^s)$: تغییر در انرژی پتانسیل روتور کلیهٔ ژنراتورها نسبت به COI؛

ج) $\sum\sum C_{ij}(\cos\theta_{ij} - \cos\theta_{ij}^s)$: تغییر در انرژی مغناطیسی ذخیره شده در کلیهٔ شاخه‌ها؛

د) $\sum\sum\int D_{ij}\cos\theta_{ij}\, d(\theta_i+\theta_j)$: تغییر در انرژی تلف شده کلیهٔ شاخه‌ها.

اولین جمله، *انرژی جنبشی* (V_{ke}) نامیده می‌شود که فقط تابعی از سرعتهای ژنراتور است. مجموع جملات ۲، ۳ و ۴ *انرژی پتانسیل* (V_{pe}) نامیده می‌شود که فقط تابعی از زوایای ژنراتور است.

ارزیابی پایداری گذرا، شامل مراحل زیر است:

۱. محاسبهٔ انرژی بحرانی V_{cr}؛

۲. محاسبهٔ انرژی کلی سیستم در زمان رفع خطا V_{cl}؛

۳. محاسبهٔ اندیس پایداری: $V_{cr} - V_{cl}$؛ اگر اندیس پایداری مثبت باشد، سیستم پایدار است.

برای اعمال روش TEF، توصیف رفتارگذرای سیستم با بیان زوایای روتور ژنراتور برحسب مرکز لختی کلیهٔ ژنراتورها راحتتر است. موقعیت مرکز لختی (COI) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta_{COI} \triangleq \frac{1}{H_T} \sum_{i=1}^{n} H_i \delta_i \qquad (۸۸ - ۱۳)$$

که درآن H_T مجموع ثابتهای لختی n ژنراتورِ سیستم است.

حرکت COI به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$2H_T P(\Delta\omega_{COI}) = P_{COI} = \sum_{i=1}^{n} (P'_{mi} - P_{ei}) \qquad (۸۹ - ۱۳)$$

و:

$$P(\delta_{COI}) = (\Delta\omega_{COI})\omega_0 \qquad (۹۰ - ۱۳)$$

با:

$$P'_{mi} = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \qquad (۹۱ - ۱۳)$$

$$P_{ei} = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{n} [C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij}(\delta_i - \delta_j)] \qquad (۹۲ - ۱۳)$$

که درآن:

P_{mi} = توان ورودی مکانیکی i اُمین ماشین

$C_{ij} = E_i E_j B_{ij}$

$D_{ij} = E_i E_j G_{ij}$

ω_0 = سرعت سنکرون برحسب رادیان الکتریکی بر ثانیه

$\Delta\omega_{COI}$ = انحراف سرعت در مبنای واحدِ COI از سرعت سنکرون

حرکت ژنراتورها را نسبت به COI می‌توان با تعریف زیر بیان کرد:

$$\theta_i = \delta_i - \delta_{COI} \text{ رادیان} \qquad (۹۳ - ۱۳)$$

و:

$$\omega_i = \frac{\dot{\theta}_i}{\omega_0} = \left(\frac{\dot{\delta}_i}{\omega_0} - \Delta\omega_{COI}\right) \text{pu} \qquad (۹۴ - ۱۳)$$

مُد اغتشاش (MOD). مُد اغتشاش، ماشینهایی را شناسایی می‌کند که با بروز اغتشاش مشخصی بشدت مختل می‌شوند. اگر اغتشاش آنقدر شدید باشد که موجب ناپایداری سیستم شود، این ماشینها بیشترین احتمال از دست دادن سنکرونیزم را نسبت به بقیهٔ سیستم دارند. یک راه تعیین MOD اجرای شبیه‌سازیهای حوزهٔ زمانی و شناسایی ماشینی است که ناپایدار می‌شود. یکی از روشهای خودکار تعیین MOD براساس V_{pe} نرمالیزه شده در مرجع ۴۹ توضیح داده شده است. که اگر از مدلهای تفصیلی ژنراتور استفاده شود، این روش مقدار چشمگیری زمان CPU را به خود اختصاص می‌دهد.

محاسبهٔ UEP کنترل‌کننده. SEP یا UEP، حل معادلات بخش بار ($i = 1, \ldots, n$) هستند:

$$f_i = P'_{mi} - P_{ei}\frac{H_i}{H_T}P_{coi} = 0 \qquad (۹۸ - ۱۳)$$

$$\omega_i = 0 \qquad (۹۹ - ۱۳)$$

پاسخهای زیادی برای معادلات بالا وجود دارد، که یکی از آنها SEP است. کلیهٔ پاسخهای دیگر UEPها می‌باشند. UEP کنترل کننده با حل مسألهٔ حداقل‌سازی زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{حداقل } \{F = \sum_{i=1}^{n} f_i\}$$

که از یک UEP تقریبی بر مبنای MOD، به عنوان نقطهٔ شروعِ حل استفاده می‌شود.

اگر حل UEPی کنترل کننده براساس روش بالا باشد، گاهی مسائل عددی پیش خواهند آمد. روش مقاومی براساس نقطهٔ عبور سطح مرز انرژی پتانسیل در مرجع ۴۴ پیشنهاد شده است که در ذیل توضیح داده می‌شود.

ج) مرز روش UEP کنترل‌کننده براساس محدودهٔ پایداری (BCU)

هرگاه برای حل UEPی کنترل کننده از روشهای CUEP ابتدای استفاده شود، با مسائل جدی همگرایی روبرو خواهیم شد. بخصوص هنگامی که سیستم بشدت تحت بارگذاری شدید و یا در نقطهٔ تحت بار بسیار کم باشد. معمولاً اگر نقطهٔ شروعِ حل CUEP، به اندازهٔ کافی نزدیک به CUEPی واقعی نباشد، مسائل همگرایی بروز می‌کنند. برخی از این مسائل را می‌توان با روش BCU برطرف نمود که نقطهٔ شروع بسیار بهتری را برای حل CUEP به‌دست می‌دهد.

برای به‌دست آوردن زوایا و سرعتها کلیهٔ ژنراتورها، شبیه‌سازی حوزهٔ زمان تا لحظهٔ رفع خطا انجام می‌پذیرد. از این مقادیر، برای محاسبه انرژی کلی سیستم (V_{ei}) در رفع خطا استفاده می‌شود.

محاسبهٔ V_{cr} به عبارت دیگر، مرز ناحیه پایداری، مشکلترین مرحلهٔ اِعمال روش TEF است. در اینجا به اختصار سه روش مختلف را توضیح می‌دهیم.

الف) روش نزدیکترین نقطهٔ تعادل ناپایدار (UEP)

نخستین مقاله‌ها در زمینهٔ کاربرد روش TEF برای تحلیل پایداری‌گذرا از روش زیر برای تعیین کوچکترین V_{cr} استفاده می‌کردند:

مرحلهٔ ۱ : کلیهٔ UEPها را تعیین کنید. این موضوع، با حل معادلات حالت ماندگار سیستم پس از اغتشاش با مقادیر اولیهٔ مختلف زوایای شین به‌دست می‌آید.

مرحلهٔ ۲ : انرژی‌پتانسیل‌سیستم‌را در هر UEP به‌دست آمده در مرحلهٔ ۱ ، محاسبه کنید. انرژی بحرانی V_{cr} با انرژی سیستم در UEP، داده می‌شود که به حداقل انرژی پتانسیل منجر می‌گردد.

با مراجعه به قیاس توپ غلتان، نزدیکترین UEP، مشابهِ پایین‌ترین نقطهٔ لبهٔ کاسه است. انرژی بحرانی در نزدیکترین UEP مساوی با انرژی پتانسیل توپ در پایین‌ترین نقطهٔ لبه است. بدین ترتیب فرض می‌شود که جهت حرکت اولیه، همواره به سمت پایین‌ترین نقطهٔ لبه است. به‌طور مشابه، برای سیستم قدرت این روش، انرژی بحرانی را با فرضِ ضمنیِ بدترین موقعیت خطا محاسبه می‌کند؛ از این‌رو، نتایج بسیار محافظه‌کارانه می‌باشد.

ب) روش UEP کنترل کننده [۴۰ ، ۴۸]

نتایج حاصل از روش نزدیکترین UEP، بسیار محافظه‌کارانه است و لذا این روش، ارزش علمی کمی را داراست. روش UEP کنترل کننده بسیاری از این محافظه‌کاری را با محاسبهٔ انرژی بحرانی وابسته به موقعیت خطا بر طرف می‌کند. این روش براساس این بنا شده که مشاهدهٔ مسیرهای سیستم برای حالات پایدار بحرانی به UEPهایی نزدیک می‌شود که به‌طور نزدیکی به مرز بهره‌برداری سیستم وابسته هستند. چنین UEPهایی را UEPهای کنترل کننده یا وابسته[1] می‌نامند.

فرایند محاسبه در این روش از دو مرحله تشکیل می‌شود: ۱) شناسایی مُد اغتشاش و ۲) محاسبه UEP کنترل کننده.

1. Relevant

انرژی بحرانی به صورت زیر تعیین می‌گردد:

۱. شبیه‌سازی حوزهٔ زمان تا عبور سیستم از سطح مرزی انرژی پتانسیل (PEBS) با خطای مداوم اجرا می‌شود. عبور از PEBS، با رسیدن انرژی پتانسیل به حداکثر مقدار خود نشان داده می‌شود.

۲. انرژی پتانسیل در عبور از PEBS به عنوان انرژی بحرانی برای آن موقعیت خطای بخصوص درنظر گرفته می‌شود.

مثال ۱۳ ـ ۸

در این مثال با درنظر گرفتن مثال سادهٔ ۱۳ ـ ۱، استفاده از روش TEF را در تحلیل پایداری‌گذرا نشان می‌دهیم. برای ماشین تک ماشینه با شین بینهایت شکل ۱۳ ـ ۱ م،

الف) معادلات دینامیکیِ سیستم را پس از اغتشاش (متناظر با معادلات ۱۳ ـ ۹۵ و ۱۳ ـ ۹۶) بنویسید.

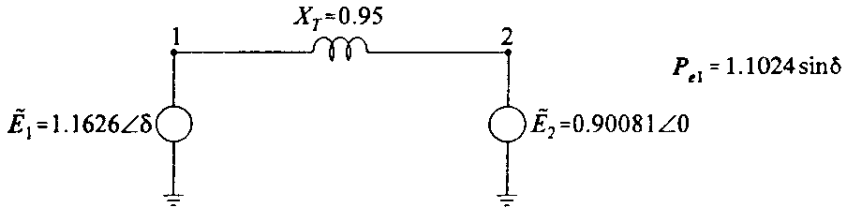
ب) رابطهٔ تابع انرژی سیستم را بنویسید.

ج) SEP، UEP و انرژی بحرانی V_{cr} سیستم را پس از اغتشاش محاسبه کنید.

د) انرژی را در رفع خطا با t_c مساوی با ۰/۰۷ ثانیه، ۰/۰۸۶ ثانیه و ۰/۰۸۷ ثانیه محاسبه کنید. پایداری سیستم را برای هر یک از سه زمان خطا تعیین کنید.

حل

الف) مدار معادل کاهش یافتهٔ پس از خطای سیستم در شکل ۱۳ ـ ۲۶ م نشان داده شده است:



شکل ۱۳ ـ ۲۶ م مدار معادل پس از اغتشاش

با توجه به اینکه شین ۲ یک شین بینهایت را نشان می‌دهد، $M_2 = \infty$ و $\Delta\omega_{COI} = 0$ می‌باشد. درنتیجه، $\theta_1 = \delta$ و $\omega_1 = \dot{\theta}_1/\omega_0 = \Delta\omega_2$ است.

در مرجع ۴۴، مرز محدودهٔ پایداری، به صورت اتحاد خمینه‌های[1] پایدارِ UEPهای برروی مرز تعریف می‌شود. هر مسیری که از نقطه‌ای بر روی مرز شروع می‌شود با افزایش زمان به یکی از UEPها همگرا می‌شود. با استفاده از این خاصیت، روش BCU از طریق محاسبهٔ CUEPی سیستم کاهش یافته، UEPی کنترل کنندهٔ سیستم قدرت را محاسبه می‌کند.

رفتار دینامیکی سیستم قدرت چند ماشینهٔ نشان داده شده با مدلهای کلاسیک ژنراتور و بارهای امپدانس ثابت با معادلات ۱۳ ـ ۹۵ و ۱۳ ـ ۹۶ توصیف می‌شود. مدل سیستمِ کاهش یافته برای این سیستم قدرت چند ماشینه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{\theta}_i = p'_{mi} - p_{ei} - \frac{H_i}{H_T} p_{coi} = g_i \qquad i = 1, \dots, n \qquad (۱۳ ـ ۱۰۰)$$

نقاط تعادل سیستمِ کاهش یافته، همانند نقاط تعادل سیستم اصلی است. روش BCU، CUEP را به صورت زیر محاسبه می‌کند:

۱. برای یک سیستم معلوم و یک پیشامد، مسیر خطای مداوم در حوزهٔ زمان شبیه‌سازی شده است تا اینکه به مرز ناحیهٔ پایداری سیستمِ کاهش یافته (PEBS) برسد. حالت سیستم در این لحظهٔ زمانی، *نقطهٔ خروج*[2] نامیده می‌شود.

۲. با شروع از نقطهٔ خروج، سیستمِ کاهش یافته تارسیدن کمیت $\sum |g_i|$ به اولین حداقل محلی خود، در حوزهٔ زمان شبیه‌سازی می‌شود. زوایای روتور در این نقطه، نقطهٔ شروعِ حل CUEP را به دست می‌دهند.

۳. UEPی کنترل کننده با استفاده از هر روش عددی مقاوم محاسبه می‌شود. مقدار حاصل، UEPی کنترل کننده نسبت به مسیر با وجود خطا است.

روش BCU بظاهر امیدوارکننده است و بسادگی می‌توان آن‌را برای مدلهای تفصیلی‌تر تعمیم داد. اما آزمونهای بیشتری برای تأیید مشخصه‌های دقت و همگرایی آن لازم است. مهمتر اینکه باید مرز ناحیهٔ پایداری برای سیستمهای قدرت با مدل تفصیلی مورد بررسی قرار گیرد.

د) روش خطای مداوم[3] [۴۲]

محاسبهٔ UEPی کنترل کننده در سیستمهای بزرگ، بسیار زمان بر است و ممکن است تحت وضعیت سخت سیستم، فرایند پاسخ یا همگرا نشده یا به UEPی غلطی همگرا شود. روش خطای مداوم به منظور جلوگیری از محاسبهٔ UEPی کنترل کننده مطرح شده است.

1. Manifold 2. Exit Point 3. Sustained Fault

مجموع انرژی در رفع خطا برابر است با:

$$V_{cl} = \frac{۷}{۲} \times ۳۷۷ \times ۰/۰۹^{۲} - ۰/۹ \times (۰/۸۴۷۹ - ۰/۹۵۵۲) - ۱/۱۰۲۴ (\cos ۴۸/۵۸^{\circ} - \cos ۵۴/۷۳^{\circ})$$
$$= ۰/۱۱۰۷$$

از آنجا که $V_{cl} < V_{cr}$ می‌باشد، بنابراین سیستم پایدار است و حاشیهٔ پایداری برابر با $V_{cr} - V_{cl} = ۰/۱۶۵۱ - ۰/۱۱۰۷ = ۰/۰۵۴۴$، می‌باشد.

۲. با (ثانیه) $t_c = ۰/۸۶$، داریم: رادیان $\theta_1^c = ۵۲/۰۴^{\circ} = ۰/۹۰۸۳$، و:

$$\omega_c = \frac{۰/۹}{۷} \times ۰/۰۸۶ = ۰/۰۱۱۰۵۷ \text{ pu}$$

مجموع انرژی در رفع خطا عبارت است از:

$$V_{cl} = \frac{۷}{۲} \times ۳۷۷ \times ۰/۰۱۱۰۵۷^{۲} - ۰/۹(۰/۹۰۸۳ - ۰/۹۵۵۲) - ۱/۱۰۲۴(\cos ۵۲/۰۴^{\circ} - \cos ۵۴/۷۳^{\circ})$$
$$= ۰/۱۶۲۰$$

پس سیستم پایدار است؛ لیکن حاشیهٔ پایداری به $۰/۱۶۵۱ - ۰/۱۶۲۰ = ۰/۰۳۱$ کاهش یافته است.

۳. با (ثانیه) $t_c = ۰/۰۸۷$، رادیان $\theta_1^c = ۵۲/۳^{\circ} = ۰/۹۱۲۸$، و $\omega_c = ۰/۰۱۱۱۸۶ \text{ pu}$، مجموع انرژی در رفع خطا عبارت است از:

$$V_{cl} = \frac{۷}{۲} \times ۳۷۷ \times ۰/۰۱۱۱۸۶^{۲} - ۰/۹ (۰/۹۱۲۸ - ۰/۹۵۵۲) - ۱/۱۰۲۴ (\cos ۵۲/۳^{\circ} - \cos ۵۴/۷۳^{\circ})$$
$$= ۰/۱۶۵۷$$

و چون $V_{cl} > V_{cr}$ است، بنابراین سیستم ناپایدار است.

نتایج بالا با نتایج شبیه‌سازی حوزهٔ زمانی مثال ۱۳ ـ ۱ سازگار است.

۱۳ ـ ۷ ـ ۱۳ محدودیتهای روشهای مستقیم

علی‌رغم موفقیتهای چشمگیر بسیاری که در کاربرد روشهای مستقیم در سالهای اخیر به‌مدت آمده است، محدودیتهای مدلسازی و عدم اطمینان روشهای محاسباتی، موانع اصلی در کاربرد عملی گستردهٔ این روشها بوده است. روشهای مستقیم هنگامی که در حل سیستمهای تحت بارگذاری شدید بکار گرفته می‌شوند در معرض مسائل عددی هستند. بکارگیری روشهای حل CUEPی پیچیده و مقاوم، معمولاً بار محاسباتی سنگینی را تحمیل و لذا روش را کندتر از

چون $C_{12} = 0$، $D_{12} = 0$ و $P'_{m1} = P_{m1} = 0/9$ است، لذا معادلات دینامیکی پس از حطای سیستم، متناظر با معادلات ۱۳ ـ ۹۵ و ۱۳ ـ ۹۶، عبارتند از:

$$2 \times 3/5\, p(\omega_1) = 0/9 - 1/1024 \sin\theta_1$$
$$p(\omega_1) = 377\, \omega_1$$

ب) از معادلهٔ ۱۳ ـ ۹۷، تابع انرژی گذرای سیستم عبارت است از:

$$V = 3/5 \times 377\, \omega_1^2 - 0/9(\theta_1 - \theta_1^s) - 1/1024\, (\cos\theta_1 - \cos\theta_1^s)$$

ج) در SEPی پس از اغتشاش، داریم:

$$0/9 - 1/1024 \sin\theta_1^s = 0$$

از این‌رو:

$$\theta_1^s = 0/9552 \text{ رادیان} = 54/73^\circ$$

برای این سیستم ساده فقط یک UEPی پس از اغتشاش وجود دارد، که به صورت زیر داده می‌شود:

$$\theta_1^u = \pi - \theta_1^s = 2/1864 \text{ رادیان} = 125/27^\circ$$

انرژی بحرانی، که مساوی انرژی پتانسیل سیستم در UEPی پس از اغتشاش می‌باشد، عبارت است از:

$$\begin{aligned} V &= -P'_{m1}(\theta_1^u - \theta_1^s) - C_{12}(\cos\theta_1^u - \cos\theta_1^s) \\ &= -0/9\,(2/1864 - 0/9552) - 1/1024\,(-0/5775 - 0/5775) \\ &= 0/1651 \end{aligned}$$

د) برای محاسبهٔ انرژی در رفع خطا، از زوایای ژنراتور محاسبه شده در مثال ۱۳ ـ ۱، استفاده می‌کنیم:

۱. با $t_c = 0/07$ (ثانیه)، $\theta_1^c = 48/58^\circ = 0/8479$ رادیان، و:

$$\omega_c = \frac{0/9}{7} \times 0/07 = 0/009 \text{ pu}$$

منابع

[1] W.D. Stevenson, *Elements of Power System Analysis*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 1975.

[2] R.T. Byerly and E.W. Kimbark, *Stability of Large Electric Power Systems*, IEEE Press, 1974.

[3] E.R. Laithwaite and L.L. Freris, *Electric Energy: Its Generation, Transmission and Use*, McGraw-Hill (UK), 1980.

[4] A. Ralston and H.S. Wilf, *Mathematical Methods for Digital Computers*, John Wiley & Sons, 1962.

[5] B. Carnahan, H.A. Luther, and J.O. Wilkes, *Applied Numerical Methods*, John Wiley & Sons, 1969.

[6] C.W. Gear, *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*, Prentice-Hall, 1971.

[7] Kundur Prabhashankar, *Digital Simulation and Analysis of Power System Dynamic Performance*, Ph.D. thesis, University of Toronto, 1967.

[8] P. Kundur and P.L. Dandeno, "Implementation of Advanced Generator Models into Power System Stability Programs," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-102, pp. 2047-2052, July 1983.

[9] H.W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-88, pp. 388-399, April 1969.

[10] B. Stott, "Power System Dynamic Response Calculations," *Proc. IEEE*, Vol. 67, pp. 219-241, February 1979.

[11] P.L. Dandeno and P. Kundur, "A Non-iterative Transient Stability Program Including the Effects of Variable Load-Voltage Characteristics," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-92, pp. 1478-1484, September 1973.

[12] H.W. Dommel and N. Sato, "Fast Transient Stability Solutions," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-91, pp. 1643-1650, July/August 1972.

شبیه‌سازی حوزهٔ زمان می‌کند.

به‌نظر می‌رسد که بهترین راه حل ، استفاده از یک روشی ترکیبی است که در آن محاسبهٔ انرژی در داخل شبیه‌سازیِ حوزهٔ زمانیِ مرسوم آورده شود [۵۱ ـ ۵۵]. این کار، توانمندیِ شبیه‌سازیهای حوزهٔ زمان را با محاسبهٔ حاشیهٔ پایداری و حداقل‌سازی هزینهٔ لازم در تعیین حدود پایداری، افزایش می‌دهد.

[27] Edith Clarke, "Impedances Seen by Relays during Power Swings with and without Faults," *AIEE Trans.*, Vol. 64, pp. 372-384, 1945. Discussion by A.J. McConnell, p. 472, June Supplement 1945.

[28] IEEE Working Group Report, "Out of Step Relaying for Generators," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-96, pp. 1556-1564, September/October 1977.

[29] C.R. Mason, "A New Loss-of-Excitation Relay for Synchronous Generators," *AIEE Trans.*, Vol. 68, pp. 1240-1245, 1949.

[30] J. Berdy, "Loss of Excitation Protection for Modern Synchronous Generators," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-94, pp. 1457-1463, September/October 1975.

[31] D.C. Lee, P. Kundur, and R.D, Brown, "A High Speed, Discriminating Generator Loss of Excitation Protection," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-98, pp. 1895-1898, November/December 1979.

[32] P.C. Magnusson, "Transient Energy Method of Calculating Stability," *AIEE Trans.*, Vol. 66, pp. 747-755, 1947.

[33] P.D. Aylett, "The Energy Integral-Criterion of Transient Stability Limits of Power Systems," *Proc. IEE*, Vol. 105c, No. 8, pp. 527-536, September 1958.

[34] G.E. Gless, "Direct Method of Lyapunov Applied to Transient Power System Stability," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-85, No. 2, pp. 159-168, February 1966.

[35] A.H. El-Abiad and K. Nagappan, "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-85, No. 2, pp. 169-178, February 1966.

[36] M. Ribbens-Pavella, "Critical Survey of Transient Stability Studies of Mulfi-Machine Power Systems by Lyapunov's Direct Method," *Proc. 9th Annual Allerton Conference on Circuits and System Theory*, pp. 751-767, October 1971.

[37] A.A. Fouad, "Stability Theory-Criteria for Transient Stability," *Proc. Engineering Foundation Conference on System Engineering for Power*, pp. 421-450, Henniker, N.H., 1975.

[38] M.A. Pai, *Energy Function Analysis for Power System Stability*, Kluwer Academic Press, 1989.

[39] A.A. Fouad and Vijay Vittal, *Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method*, Prentice-Hall, 1992.

[13] M. Stubbe, A. Bihain, J. Deuse, and J.C. Baader, "STAG - A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behaviour of Electrical Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, No. 1, pp. 129-138, 1989.

[14] EPRI Report, *Programmers Manual for ETMSP Version 3*, Prepared by Ontario Hydro, 1992.

[15] C.F. Wagner and R.D. Evans, *Symmetrical Components*, McGraw-Hill, 1933.

[16] Edith Clarke, *Circuit Analysis of AC Power Systems*, Vol. I, John Wiley & Sons, 1943.

[17] P.M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*, Iowa State Press, Ames, Iowa, 1973.

[18] Westinghouse Electric Corporation, *Electric Transmission and Distribution Reference Book*, East Pittsburgh, Pa., 1964.

[19] C.L. Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *AIEE Trans.*, Vol. 37, Pt. II, pp. 1027-1140, 1918.

[20] T.M. O'Flaherty and A.S. Aldred, "Synchronous Machine Stability under Unsymmetrical Faults," *Proceedings IEE*, Vol. 109A, p. 431, 1962.

[21] Westinghouse Electric Corporation, *Applied Protective Relaying*, a new "Silent Sentinels" publication, Newark, 1976.

[22] H.M. Rustebakke (editor), *Electric Utility Systems and Practices*, John Wiley & Sons, 1983.

[23] C.R. Mason, *The Art and Science of Protective Relaying*, John Wiley & Sons, 1956.

[24] General Electric Company, *Use of the R-X Diagram in Relay Work*, Philadelphia, Pa., 1966.

[25] C.R. Mason, "Relay Operation during System Oscillations," *AIEE Trans.*, Vol. 56, pp. 823-832, 1937. Discussion by J.H. Neher, pp. 1513-1514. Closure by C.R. Mason, Vol. 57, pp. 111-114, 1938.

[26] J.H. Neher, "A Comprehensive Method of Determining the Performance of Distance Relays," *AIEE Trans.*, Vol. 56, pp. 833-844, 1937.

[50] P. Kundur, "A Practical View of the Applicability of the Direct Methods," Minipaper presented at the IEEE Panel Session on Application of Direct Methods to Transient Stability Analysis of Power Systems, *IEEE Trans.*, Vol. PAS-193, pp. 1634-1635, July 1984.

[51] P. Kundur, "Evaluation of Methods for Studying Power System Stability," *Proc. International Symposium on Power System Stability*, Ames, Iowa, 1985.

[52] B. Gao, "Assessment of Power System Transient Stability Using Energy Functions," M.A.Sc. thesis, University of Toronto, 1986.

[53] G. Maria, C. Tang, and J. Kim, "Hybrid Transient Stability Analysis," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-5, No. 2, pp. 384-393, May 1990.

[54] C.K. Tang, C.E. Graham, M. El-Kady, and R.T.H. Alden, "Transient Stability Index from Conventional Time Domain Simulation," Paper 93SM487-9PWRS, presented at the 1993 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, July 1993.

[40] T. Athay, V.R. Sherkat, R. Podmore, S. Virmani, and C. Puech, "Transient Energy Analysis," Final Report of U.S. Department of Energy Contract No. EX-76-C-01-2076, Prepared by Systems Control, Inc., June 1979.

[41] Chi-Keung Tang, "Evaluation of the Direct Method for Power System Transient Stability Analysis," M.Eng. degree thesis, University of Toronto, August 1984.

[42] N. Kakimoto, Y. Ohsawa, and M. Hayashi, "Transient Stability Analysis of Electric Power System Via Lure' Type Lyapunov Functions, Parts I and II," *Trans. IEE of Japan*, Vol. 98, No. 516, May/June 1978.

[43] A.A. Fouad and S.E. Stanton, "Transient Stability of Multimachine Power System, Parts I and II," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 3408-3424, July 1981.

[44] H.D. Chiang, F.F. Wu, and P.P. Varaiya, "Foundations of the Potential Energy Boundary Surface Method for Power System Transient Stability Analysis," *IEEE Trans.*, Vol. CAS-35, pp. 712-728, June 1988.

[45] M.A. El-Kady, M.M. Abu-Elnaga, R.D. Findlay, and C.G. Bailey, "Sparse Formulation of the Direct Method of Transient Stability for Applications on Micro-Computers," *Proc. 29th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 519-522, Lincoln, Neb., 1986.

[46] A.A. Fouad, V. Vittal, Y-X. Ni, H.M. Zein-Eldin, E. Vaahedi, H.R. Pota, K. Nodehi, and J. Kim, "Direct Transient Stability Assessment with Excitation Control," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, No. 1, pp. 75-82, February 1989.

[47] V. Vittal, N. Bhatia, A.A. Fouad, G.A. Maria, and H.M. Zein-Eldin, "Incorporation of Nonlinear Load Models in the Transient Energy Function Method," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, No. 3, pp. 1031-1036, August 1989.

[48] T. Athay, R. Podmore, and S. Virmani, "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-98, No. 2, pp. 573-584, March/April 1979.

[49] A.A. Fouad, V. Vittal, and Taekyoo Oh, "Critical Energy for Transient Stability Assessment of a Multimachine Power System," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-103, pp. 2199-2206, 1984.

فصل چهاردهم

پایداری ولتاژ

مسائل کنترل و پایداری ولتاژ مسائل جدیدی در صنعت برق نیستند، لیکن امروزه در بسیاری از سیستمها مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند. زمانی این موضوع فقط به طور عمده با سیستمهای ضعیف و خطوط طولانی مرتبط بود، اما اکنون درنتیجهٔ بارگذاری شدیدتر، در شبکه‌های بسیار توسعه یافته نیز مورد توجه است. در سالهای اخیر، ناپایداری ولتاژ موجب بروز چند فروپاشی عظیم در شبکه‌های مختلف شده است. چند نمونه از این موارد در زیر آورده شده است [۱ و ۲]:

- اغتشاشهای مجموعه تسهیلات اشتراکی نیویورک در بیست و دوم سپتامبر ۱۹۷۰ میلادی؛
- اغتشاش سیستم فلوریدا در بیست و هشتم دسامبر ۱۹۸۲ میلادی؛
- اغتشاشهای سیستم فرانسه در نوزدهم دسامبر ۱۹۷۸ و دوازدهم ژانویهٔ ۱۹۸۷ میلادی؛
- اغتشاش سیستم شمال بلژیک در چهارم اگوست ۱۹۸۲ میلادی؛
- اغتشاش سیستم سوئد در بیست و هفتم دسامبر ۱۹۸۳ میلادی؛
- اغتشاش سیستم ژاپن در بیست و سوم ژوییهٔ ۱۹۸۷ میلادی.

درنتیجه، امروزه عبارت «ناپایداری ولتاژ» و «فروپاشی ولتاژ» در منابع و بحثهای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری، بیشتر از گذشته مشاهده می‌شوند.

اگرچه ممکن است ولتاژهای پایین ناشی از فرایند عدم همگامی زوایای رتور باشند، نوع فروپاشی ولتاژ مربوط به ناپایداری ولتاژ می‌تواند در جایی رخ دهد که پایداری زاویه‌ای مطرح نیست. زمانی که زوایای روتور بین دو گروه از ماشینها به 180° نزدیک یا از آن بیشتر می‌شود، خارج شدن آرام آرام ماشینها از همگامی، منجر به ولتاژهای بسیار پایین در نقاط میانی شبکه

تحلیل پخش بار مشخصه‌های مشابهی را تعیین کرد (فصل ۶ را ببینید).

در اینجا به اختصار مشخصه‌های سیستم شعاعیِ سادهٔ درنظر گرفته شده در فصل دوم (شکل ۲ ـ ۴) را مرور می‌کنیم. نمایش نمادین سیستم برای مراجعه، در شکل ۱۴ ـ ۱ «الف» آورده شده است. همان‌طور که در بخش ۲ـ۱ـ۲ نشان داده شده است، جریان I و ولتاژ طرف گیرنده V_R و توان P_R با معادلات زیر داده می‌شوند:

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_S}{Z_{LN}} \qquad (۱ - ۱۴)$$

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \qquad (۲ - ۱۴)$$

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos\phi \qquad (۳ - ۱۴)$$

که در آن داریم:

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) \cos(\theta - \phi)$$

نمودارهای I، V_R و P_R به صورت تابعی از تقاضای بار (Z_{LN} / Z_{LD}) برای حالت با $\tan\theta = 10/0$ و $\cos\phi = 0/95$، در شکل ۱۴ ـ ۱ «ب» نشان داده شده است. برای آنکه نتایج، به هر مقدار از Z_{LN} قابل اِعمال باشد، مقادیر I، V_R و P_R به طور مناسبی نرمالیزه شده‌اند.

با افزایش تقاضای بار (کاهش Z_{LD})، P_R نخست بسرعت و سپس قبل از رسیدن به مقدار حداکثر بکندی افزایش یافته، سرانجام کاهش پیدا می‌کند. بنابراین حداکثر مقدارِ توان راکتیوی وجود دارد که می‌تواند به وسیلهٔ امپدانس از یک منبع ولتاژ ثابت انتقال پیدا کند. توان انتقال داده شده هنگامی حداکثر است که اندازهٔ افت ولتاژ در خط برابر با V_R باشد، به عبارت دیگر، هنگامی که $Z_{LD} / Z_{LN} = 1$ باشد. شرایط متناظر با توان حداکثر، حدود عملکرد رضایتبخش را نشان می‌دهند. مقادیر V_R و Iی متناظر با حداکثر توان، *مقادیر بحرانی*[1] نامیده می‌شوند.

برای مقدار مشخصی از توان عرضه شدهٔ P_R ($P_R < P_{RMAX}$)، ممکن است دو نقطهٔ کار متناظر با دو مقدار مختلف Z_{LD}، پیدا شود. این مطلب برای $P_R = 0/8$ در شکل ۱۴ ـ ۱«ب» نشان داده شده است. نقطهٔ سمت چپ متناظر با عملکرد عادی است. در نقطه کار سمت راست، I بسیار بزرگتر و V_R بسیار کوچکتر از نقطهٔ سمت چپ است.

برای تقاضای باری بیش از توان حداکثر، کنترل توان با تغییر بار ناپایدار خواهد بود، به

1. Critical Values

می‌شود (به بخش ۱۳ـ۵ـ۳ از فصل سیزدهم مراجعه کنید). اما در چنین حالاتی، ولتاژ پایین به جای علت خارج شدن روتورها از همگامی، نتیجهٔ آن است.

همان‌طور که در فصل دوم توضیح داده شد، پایداری ولتاژ به توانایی سیستم قدرت در حفظ ولتاژهای قابل قبول در کلیهٔ شینهای سیستم تحت وضعیت عادی و بعد از وارد شدن اغتشاش، مربوط می‌باشد. سیستم هنگامی وارد حالت ناپایداری ولتاژ می‌شود که بروز اغتشاش، افزایش در بار موردنیاز، یا تغییر در موقعیت سیستم، موجب کاهش فزاینده و غیرقابل کنترلِ ولتاژ گردد. عامل اصلی ناپایداری، ناتوانی سیستم قدرت در مواجهه با تقاضا برای توان راکتیو می‌باشد.

این فصل، مفاهیم اساسی مربوط به پایداری ولتاژ را مرور و پدیدهٔ «شکست بهمنی ولتاژ»[1] را تبیین می‌کند. روشهای دینامیکی و استاتیکی تحلیل پایداری ولتاژ و روشهای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱۴ ـ ۱ مفاهیم اساسیِ مربوط به پایداری ولتاژ

مسائل پایداری ولتاژ، معمولاً در سیستمهای تحت بارگذرای شدید رخ می‌دهد. گرچه ممکن است اغتشاشِ منجر به فروپاشی ولتاژ دلایل گوناگونی داشته باشد، لیکن مسألهٔ اساسی ضعفِ ذاتیِ سیستم قدرت است. علاوه بر استحکام شبکهٔ انتقال و سطوح انتقال توان، عوامل اصلیِ فروپاشی ولتاژ عبارتند از محدودیتهای کنترل توان راکتیو یا ولتاژ ژنراتور، مشخصه‌های بار، مشخصه‌های وسایل جبرانسازی راکتیو و عمل وسایل کنترل ولتاژ از قبیل ترانسفورمرهای دارای تغییردهندهٔ تپ زیربار (ULTCها).

این بخش مفاهیم اساسی مربوط به ناپایداری ولتاژ را ارائه می‌کند. بدین منظور نخست مشخصه‌های سیستمهای انتقال درنظر گرفته می‌شود و سپس چگونگی تأثیرپذیری این پدیده از ژنراتورها، بارها و وسایل جبرانسازی توان راکتیو مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

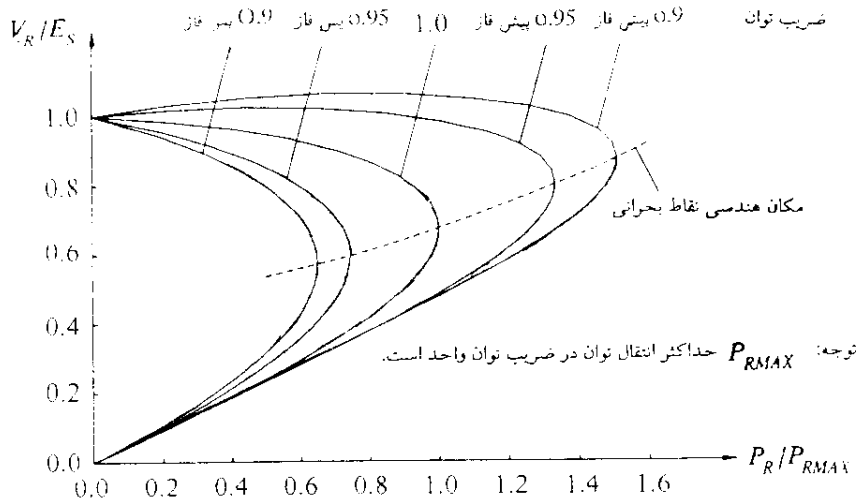
۱۴ ـ ۱ ـ ۱ مشخصه‌های سیستم انتقال

مشخصه‌های موردنظر روابط بین توان انتقال داده شده (P_R)، ولتاژ طرف گیرنده (V_R)، و تزریق توان راکتیو (Q_i) است. چنین مشخصه‌هایی برای یک سیستم شعاعیِ ساده در فصل دوم (بخش ۲ ـ ۱) و برای خطوط انتقال با طولهای متغیر در فصل ششم (بخش ۶ ـ ۱)، مورد بررسی قرار گرفت. در سیستمهای پیچیده با تعداد زیادی از منابع ولتاژ و شین‌های بار، می‌توان به کمک

1. Voltage Avalanche

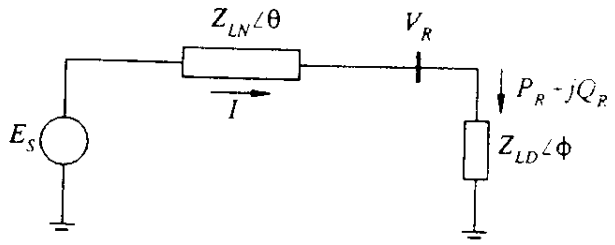
از شکل ۱۴ ـ ۳ مشاهده می‌شود که ممکن است حداکثر مقدار P_R، با افزایش منبع ولتاژ E_s و یا کاهش ϕ، افزایش یابد.

روش مرسوم برای نمایش این پدیده (مطابق شکل ۱۴ ـ ۲)، رسم رابطهٔ بین V_R و P_R برای مقادیر مختلف ضریب توان بار با E_S ثابت است. در شکل، مکان هندسی نقاط کار بحرانی با خطوط مقطع نشان داده شده است. فقط نقاط کار بالای نقاط بحرانی، شرایط کار رضایتبخش را نشان می‌دهند.

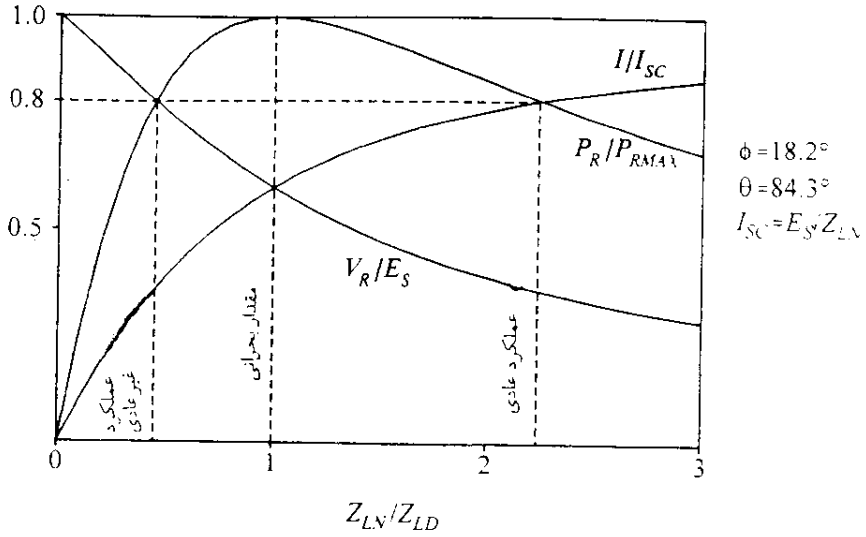


شکل ۱۴ ـ ۲ مشخصه‌های V_R - P_R سیستم شکل ۱۴ ـ ۱

در فصل ششم (بخش ۶ ـ ۱)، مشخصه‌های V-P مشابهی را برای خطوط انتقال با طولهای مختلف ارائه کردیم. سیستمهای عملی قدرت که شامل منابع ولتاژ و شینهای بار زیادی هستند نیز مشخصه‌های مشابهی را بین انتقال توان حقیقی و ولتاژهای شین‌بار، از خود نشان می‌دهند. این موضوع را برای سیستم نشان داده شده در شکل ۱۴ ـ ۳، شامل ۳۹ شین با نُه ژنراتور و یک کندانسور سنکرون، نشان خواهیم داد. شکل ۱۴ ـ ۴ منحنی V-P را برای این سیستم نشان می‌دهد؛ این منحنی، تغییر ولتاژ را در شین ۵۳۰ اُم برحسب تابعی از مجموع بار توان حقیقی در ناحیهٔ هاشور زده نمایش می‌دهد، این شین یک شین بحرانی در ناحیهٔ بار است که در معرض ناپایداری ولتاژ قرار دارد. این منحنی با بکارگیری مجموعه‌ای از پاسخهای پخش بار برای سطوح بار مختلف رسم شده است. بارهای ناحیهٔ ۱ (هاشورزده شده) به طور یکنواخت درجه‌بندی شده‌اند در حالی که ضریب توان، ثابت نگه داشته شده است. خروجیهای توان



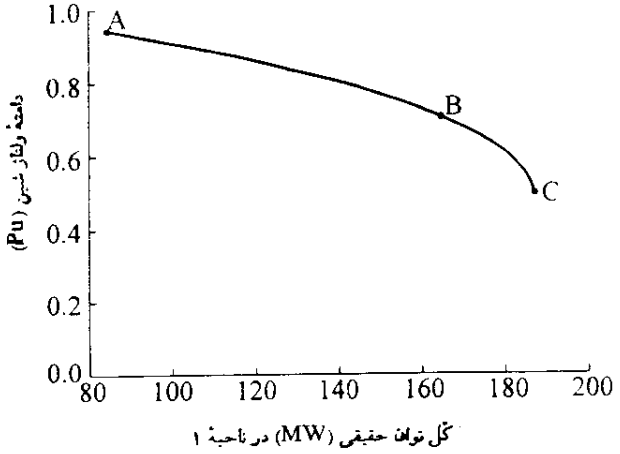
(الف) نمودار نمادین



(ب) ولتاژ دریافتی، جریان و توان به‌صورت توابعی از تقاضای بار

شکل ۱۴ ـ ۱ مشخصه‌های یک سیستم شعاعیِ ساده

عبارت دیگر، افزایشی در ادمیتانس بار، توان را کاهش خواهد داد. در این ناحیه، ولتاژ بار ممکن است به طور فزاینده کاهش پیدا کند یا نکند، این مطلب به مشخصهٔ ولتاژ ـ بار بستگی خواهد داشت. با یک مشخصهٔ بارِ ادمیتانس ثابت، موقعیت سیستم در سطح ولتاژی پایین‌تر از سطح عادی، پایدار می‌شود. از طرف دیگر، اگر بار به وسیلهٔ ترانسفورمری با ULTC تأمین شود، عمل تغییر دهندهٔ تپ سعی در افزایش ولتاژ بار خواهد داشت، که بر اثر آن Z_{LD} مؤثر کاهش خواهد یافت. این رخداد V_R را باز هم کمتر می‌کند تا به کاهش فزاینده‌ای از ولتاژ منجر گردد. این پدیده، *ناپایداری ولتاژ* است.

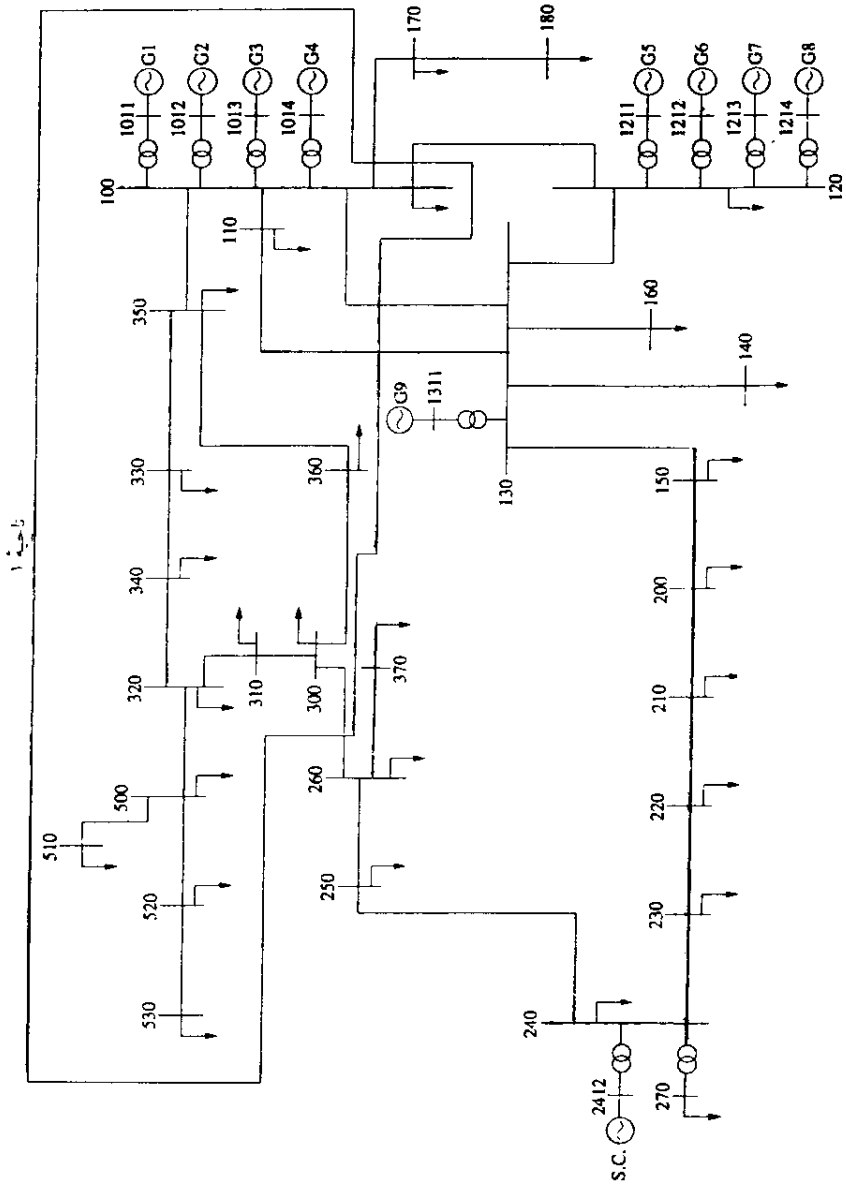


شکل ۱۴ ـ ۴ منحنی **V-P** در شین ۵۳۰ اُم سیستم نشان داده شده در شکل ۱۴ ـ ۳

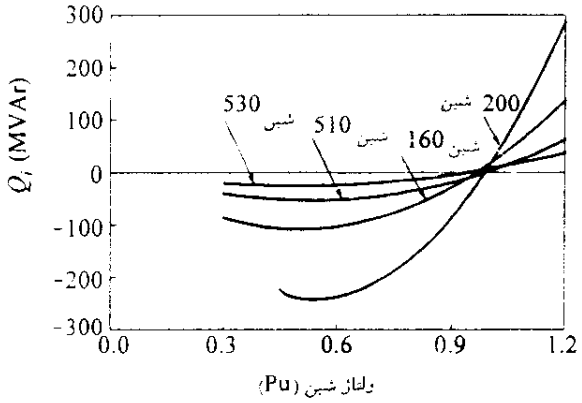
حقیقی ژنراتورها نیز نسبت به اندازهٔ ژنراتور، افزایش داده شده‌اند. مؤلفه‌های **P** و **Q**ی هر بار، مستقل از ولتاژ شین فرض شده‌اند. در «زانوی» منحنی **V-P**، با افزایشی در تقاضای بار (یا بارِ ولتاژ نامی)، ولتاژ بسرعت افت می‌کند و پاسخ پخش‌بار نمی‌تواند به مقداری فراتر از این حد همگرا شود، که نشان‌دهندهٔ ناپایداری است. کار، در حد پایداری و یا نزدیک آن غیرعملی است و موقعیت کاری رضایتبخش با درنظر گرفتن «حاشیهٔ توانِ» کافی تضمین می‌شود.

مشاهده می‌شود که سیستمهای پیچیده، مشخصه‌های **V-P**، مشابه با مشخصه‌های سیستم شعاعیِ سادهٔ شکل ۱۴ ـ ۱ دارند. چنین مشخصه‌هایی نشان‌دهندهٔ خاصیت اساسی شبکه‌های با عناصر عمدتاً اندوکتیو است.

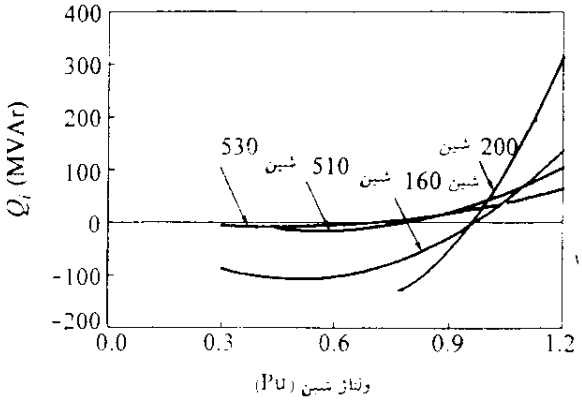
تاکنون مشخصه‌های **V-P** را با ضریب توان بار ثابت درنظر گرفته‌ایم. در واقع، پایداری ولتاژ، به چگونگی تأثیر تغییراتِ **Q** و **P** در ناحیهٔ بار بر ولتاژِ شین‌های بار، بستگی دارد. اغلب، یک مشخصهٔ سودمندتر برای برخی جنبه‌های تحلیل پایداری ولتاژ رابطهٔ **Q-V** است، که حساسیت و تغییر ولتاژهای شین را نسبت به تزریق یا جذب توان راکتیو نشان می‌دهد. برای سیستم شعاعیِ سادهٔ شکل ۱۴ ـ ۱، چنین مشخصه‌هایی برای مقادیر مختلف توان بار، در شکل ۲ ـ ۸ فصل دوم نشان داده شده است. این مشخصه‌ها، آسانتر از مشخصهٔ **V-P** مربوط به سیستمهای با ساختار غیرشعاعی به دست می‌آیند. و برای بررسی نیازهای جبرانسازی توان راکتیو مناسبتر هستند.



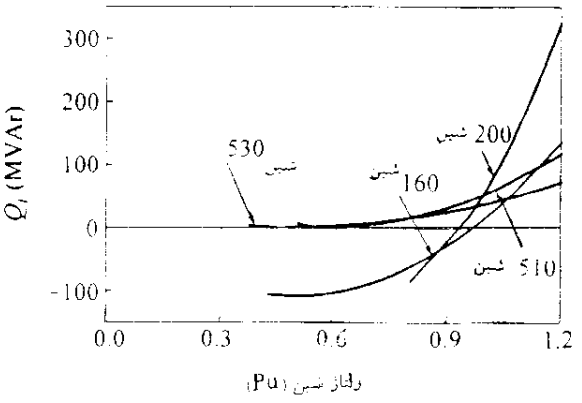
شکل ۱۴ - ۳ یک سیستم آزمایشی ۳۹ شینه و ۱۰ ماشینه



(الف) حالت پایه با بار
84.5MW.53.3MVAr در ناحیهٔ ۱



(ب) نقطهٔ کار نزدیک به نقطهٔ کار بحرانی با بار
103.7 MVAr, 164.4 MW در ناحیهٔ ۱



(ج) نقطهٔ کار در نقطهٔ کار بحرانی با بار
117.9 MVAr، 1869MW در ناحیهٔ ۱

شکل ۱۴ ـ ۵ منحنی‌های **Q-V** برای سیستم نشان داده شده در شکل ۱۴ ـ ۳

شکل ۱۴ ـ ۵ منحنیهای محاسبه شده در شین‌های ۱۶۰، ۲۰۰، ۵۱۰ و ۵۳۰ اُم را برای سه نقطهٔ کار نشان داده شده با A، B و C بر منحنی V-Pی شکل ۱۴ ـ ۴ نشان می‌دهد. نقطهٔ A، حالت پایه؛ نقطهٔ B، موقعیتی نزدیک نقطهٔ کار بحرانی و نقطهٔ C، موقعیتی در نقطهٔ کار بحرانی را نمایش می‌دهد. هر کدام از این منحنیها به کمک محاسبات متوالی پخش‌بار با یک منبع توان راکتیو متغیر در شینِ انتخاب شده، رسم و مقادیری که برای حفظ ولتاژهای مختلف برنامه‌ریزی شدهٔ شین لازم است، ضبط شده است. بخش پایینی منحنی Q-V که در آن مشتق dQ / dV مساوی صفر است، حد پایداری ولتاژ را نمایش می‌دهد. از آنجا که تمامی وسایل کنترل توان راکتیو به گونه‌ای طراحی شده‌اند که افزایشِ Q با افزایشِ V همراه باشد، لذا عملیات در طرف راست منحنی V - Q پایدار و در طرف چپ آن ناپایدار است. همچنین ممکن است ولتاژ در طرف چپ آنقدر کم باشد که وسایل حفاظتی فعال شوند. از این‌رو بخش پایینی منحنی V - Q، علاوه بر شناسایی حد پایداری، شرط حداقل توان راکتیو را برای بهره‌برداری پایدار به دست می‌دهد [۳].

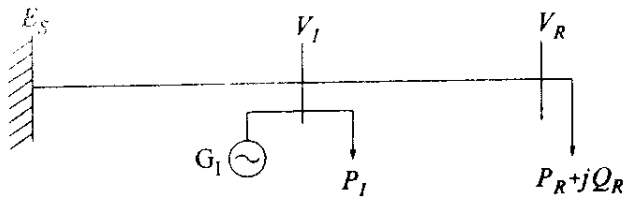
در این بخش مشخصه‌های سیستمهای انتقال، که از عبور توان حقیقی و راکتیو از طریق عناصر بسیار اندوکتیو تحت تأثیر قرار می‌گیرند، بررسی شده است. از تحلیل ارائه شده در اینجا، بوضوح مشاهده می‌شود که دلایل اصلی ناپایداریِ ولتاژ، به شرح ذیل است:

- بار روی خطوط انتقال، بسیار بالا است.
- منابع ولتاژ از مراکز بار، بسیار دور هستند.
- ولتاژ منابع خیلی پایین است.
- جبرانسازی راکتیو بار، ناکافی است.

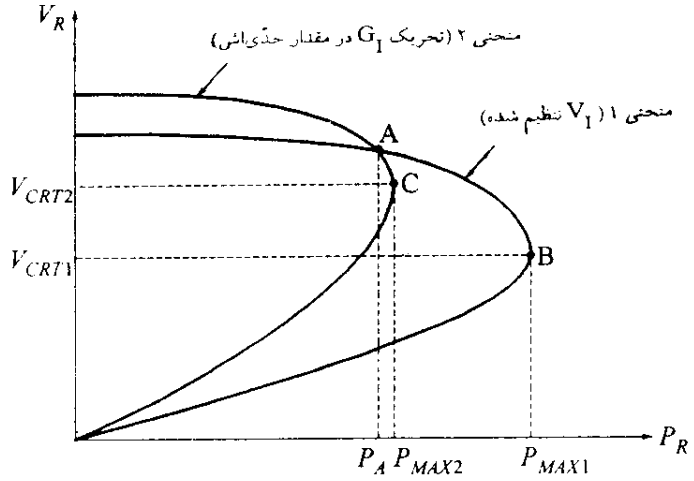
مشخصه‌های V-P و Q-V سیستم انتقال، برای نمایش پدیدهٔ اساسی مربوط به ناپایداری، معرفی شده است؛ گرچه باید توجه داشت که روش ارائه شده برای به دست آوردن مشخصه‌ها، با استفاده از برنامه‌های مرسوم پخش‌بار لزوماً مؤثرترین روش مطالعهٔ مسألهٔ پایداری ولتاژ نیست. روشهای تحلیل پایداری ولتاژ در بخش ۱۴ ـ ۳ مورد بررسی قرار گرفته است.

۱۴ ـ ۱ ـ ۲ مشخصه‌های ژنراتور

AVRهای ژنراتور، مهمترین وسایل کنترل ولتاژ در سیستم قدرت هستند. در حالت عادی ولتاژهای پایانهٔ ژنراتورها، ثابت نگه داشته می‌شوند. در حالتی که ولتاژهای سیستم پایین باشند، ممکن است تقاضای توان راکتیو بر روی ژنراتورها از حدود جریان تحریک و یا جریان



(الف) نمودار نمادین



(ب) مشخصه‌های V_R - P_R

شکل ۱۴ ـ ۶ اثر از دست رفتن تنظیم‌کنندهٔ ولتاژ شین میانه

۱۴ ـ ۱ ـ ۳ مشخصه‌های بار [۱، ۵]

مشخصه‌های بار و وسایل کنترل ولتاژِ سیستم‌توزیع، از عوامل‌مؤثر در پایداری‌ولتاژ سیستم هستند.

مشخصه‌ها و مدلسازی انواع مختلف بار در فصل هفتم توضیح داده شد. بارهایی که مؤلفه‌های حقیقی و راکتیو آنها با ولتاژ تغییر می‌کنند، با تغییر انتقال توان از طریق سسیستم، بر مشخصه‌های انتقال تأثیر می‌گذارند. ولتاژهای سیستم در مقادیری که با مشخصهٔ ترکیبی سیستم انتقال و بارها تعیین می‌شود، مستقر می‌گردند.

تنظیم کننده‌های ولتاژ سیستم توزیع و ULTCهای ترانسفورمر پُست، سعی می‌کنند تا ولتاژ را در نقطهٔ مصرف ثابت نگه دارند (فصل ۱۱، بخش ۱۱ ـ ۲ را ببینید). درون گسترهٔ کنترل عادی،

آرمیچرِ آنها، فراتر رود (فصل ۵، بخش ۵ ـ ۴ را ببینید). البته هنگامی که خروجی توان راکتیو محدود شود، ولتاژ پایانه تا مدت زیادی در یک مقدار ثابت نگه داشته نمی‌شود.

جریان تحریک ژنراتور به طور خودکار، به کمک یک محدودکنندهٔ فوق تحریک[1] (OXL) محدود می‌شود. نقش و مدلسازی چنین محدودکننده‌هایی در فصل هشتم توضیح داده شده است (بخشهای ۸ ـ ۵ و ۸ ـ ۶). با جریان تحریک ثابت، نقطهٔ ولتاژ ثابت، پشت سر راکتانس سنکرون قرار دارد (فصل ۳، شکل ۳ ـ ۲۲ را ببینید). این موضوع به طور مؤثری راکتانس شبکه را افزایش می‌دهد و موقعیت فروپاشی ولتاژ را بدتر می‌کند.

در اکثر ژنراتورها، حد جریان آرمیچر به طور دستی و به وسیلهٔ اپراتورها در پاسخ به اخطارها تنظیم می‌شود. اپراتور با کاهش خروجی توان حقیقی و یا راکتیو، جریان آرمیچر را به داخل حدود ایمن می‌آورد. اما در برخی ژنراتورها، از محدودکننده‌های جریان آرمیچر به طور خودکار همراه با زمان تأخیر برای محدود کردن خروجی توان راکتیو (از طریق AVR) استفاده می‌شود [۲].

برای نمایش اثر از دست دادن توانایی کنترل ولتاژ، سیستم نشان داده شده در شکل ۱۴ ـ ۶ «الف» را در نظر بگیرید. این سیستم از یک بار بزرگ که از یک شین بینهایت به صورت شعاعی تغذیه می‌شود، همراه با ژنراتوری میانی که قسمتی از بار و ولتاژ تنظیم کننده (V_1) را تغذیه می‌کند، تشکیل شده است.

در حالی که ولتاژ در شین میانی در مقدار خود نگه داشته شود، مشخصهٔ V-P به کمک منحنی ۱ در شکل ۱۴ ـ ۶ «ب» نشان داده شده است. هرگاه واحد تولیدکننده به حد جریان تحریک خود برسد، ولتاژ شین (V_1) در مقدار خود باقی نمی‌ماند. در این حالت مشخصهٔ V-P با منحنی ۲ نشان داده می‌شود. نقطهٔ کار (مانند نقطهٔ A)، هنگامی که بر منحنی ۱ قرار دارد به مراتب پایدارتر از هنگامی است که بر منحنی ۲ قرار می‌گیرد. این نتایج اهمیت حفظ قابلیت کنترل ولتاژ ژنراتورها را نمایش می‌دهد. به علاوه، نشان می‌دهد که درجهٔ پایداری ولتاژ را نمی‌توان فقط براساس اندازهٔ نزدیکی ولتاژ شین به سطح عادی ولتاژ، استنتاج نمود.

این موقعیت مشابه موقعیتی است که در دسامبر ۱۹۶۵ میلادی و نوامبر ۱۹۷۵ میلادی به فروپاشی ولتاژ در ناحیهٔ بریتانی[2] سیستم فرانسه، منجر گردید [۴].

1. Overexcitation Limiter
2. Brittany

۱۴ ـ ۱ ـ ۴ مشخصه‌های وسایل جبرانسازی راکتیو

در فصل یازدهم، انواع مختلفی از وسایل جبرانسازی راکتیو را بررسی کردیم. در اینجا، به اختصار توضیح می‌دهیم که این وسایل چگونه بر پایداری ولتاژ تأثیر می‌گذارند.

الف) خازنهای شنت

استفاده از خازنهای شنت، از کم‌قیمت‌ترین ابزار پشتیبانی از ولتاژ و توان راکتیو است. که می‌توانند با اصلاح ضریب توان نقطهٔ گیرنده تا یک نقطهٔ خاص، برای بسط حدود پایداری ولتاژ به طور مؤثر به کار گرفته شوند. همچنین می‌توان از آنها برای آزادسازی «ذخیرهٔ راکتیو چرخان» در ژنراتورها استفاده کرد و بدین ترتیب از فروپاشی ولتاژ در موقعیتهای زیادی جلوگیری کرد. لیکن، خازنهای شنت، محدودیتهایی ذاتی نیز از دیدگاه پایداری و کنترل ولتاژ دارند:

- در سیستمهایی که بشدت با خازن شنت جبران شده‌اند، تنظیم ولتاژ ضعیف خواهد بود.
- فراتر از یک سطح جبرانسازی، عملکرد پایدار با خازنهای شنت غیرقابل حصول است (این مطلب در مثال ۱۴ ـ ۱ نشان داده شده است).
- توان راکتیو تولیدشده با خازن شنت، متناسب با مجذور ولتاژ است بنابراین هنگامی که ولتاژ سیستم پایین است، تولید توان راکتیو افت کرده و مسأله را پیچیده‌تر می‌کند.

ب) جبرانسازی تنظیم شدهٔ شنت

سیستمهای استاتیکی توان راکتیو (SVS) با اندازهٔ محدود تا حداکثر خروجیِ خازنیِ خودش، تنظیم خواهد کرد. در گسترهٔ تنظیم، هیچ مسئلهٔ کنترل ولتاژ یا ناپایداری وجود ندارد. زمانی که SVS به حد برسد، به یک خازن ساده تبدیل می‌شود و باید احتمال اینکه این موضوع، منجر به ناپایداری ولتاژ شود، مورد توجه قرار گیرد.

برخلاف SVS، *کندانسور سنکرون* دارای یک منبع داخلی ولتاژ است که تا ولتاژهای نسبتاً پایین به تغذیهٔ توان راکتیو ادامه می‌دهد و به عملکرد پایدارتر ولتاژ کمک می‌کند.

ج) خازنهای سری

خازنهای سری، خود تنظیم هستند و توان راکتیو تغذیه شده به وسیلهٔ خازنهای سری مستقل از ولتاژهای شین و متناسب با مجذور جریان خط است. که اثر مطلوبی بر پایداری ولتاژ دارد.

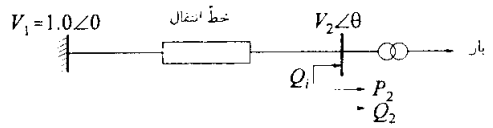
خازنهای سری به طور ایده‌ال برای کوتاه سازی مؤثر خطوط طولانی، مناسبند. برخلاف خازنهای شنت، خازنهای سری، امپدانس مشخصه (Z_c) و طول الکتریکی (θ) خط را با هم کاهش می‌دهند (فصل ۱۱ را ببینید). در نتیجه، هر دو وظیفهٔ تنظیم و پایداری ولتاژ به میزان چشمگیری بهبود می‌یابد.

مثال ۱۴ ـ ۱

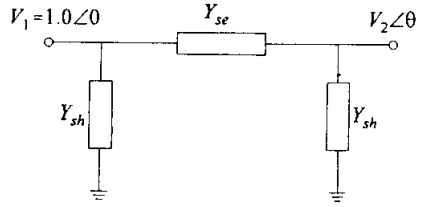
شکل ۱۴ ـ ۱ م نمایش سیستم قابل اعمال به یک خط انتقال (۳۰۰ mi) ۳۲۲ Km، ۵۰۰ KV تأمین کنندهٔ یک بار شعاعی مربوط به یک سیستم قوی را نشان می‌دهد. پارامترهای خط در مبنای واحد بر پایهٔ ۱۰۰ MVA و ۵۰۰ KV بیان شده است.

الف) با ولتاژ طرف فرستنده (V_1) در ۱/۰ pu، منحنیهای Q-V را در طرف گیرنده برای چهار مقدار مختلف توان بار طرف گیرنده برابر با: ۱۳۰۰، ۱۵۰۰، ۱۷۰۰، و ۱۹۰۰ MW و با فرض ضریب توان واحد، رسم کنید. همراه با منحنیهای Q-V سیستم انتقال، مشخصه‌های Q-V خازن شنت را با تزریق توان راکتیو در ولتاژ ۱۰۰ در مبنای واحد در مقادیر ۳۰۰، ۴۵۰، ۶۷۵ و ۹۵۰ MVAr رسم کنید. میزان اثر جبرانسازی خازن را به عنوان وسیله‌ای برای فراهم آوردن جبرانسازی توان راکتیو بررسی کنید. فرض کنید که بار در طرف گیرنده به علت کار تغییردهنده‌های تپ ترانسفورمر یک مشخصهٔ حالت ماندگار MVA ثابت را از خود نشان می‌دهد.

ب) اگر جبرانسازی راکتیو در طرف گیرنده به صورت یک SVC با حد خازنیِ ۹۵۰ MVAr باشد، پایداری ولتاژ سیستم را با افزایش تدریجی P_2 از ۱۳۰۰ MW تا ۱۹۰۰ MW، بررسی کنید.



(الف) نمایش نمادین



$Y_{se} = 2.142 - j24.973$ pu
$Y_{sh} = 0 + j2.076$ pu

(ب) نمایش مدال معادل π خط

شکل ۱۴ ـ ۱ م خط ۳۲۲ Km، ۵۰۰ KV تغذیه کنندهٔ بار شعاعی

[illegible] ترموستاتها، به مدت طولانی‌تری کار می‌کنند. درنتیجه، تعداد بیشتری از این وسایل در هر زمان عمل خواهند کرد. بسیاری از بارهای از این نوع، در بازهٔ زمانی ۱۰ تا ۱۵ دقیقه به مقدار ولتاژ کامل عادی خود بازگردانده خواهند شد [۵]. با بازگشت بارهای کنترل شدهٔ حساس به ولتاژ، ولتاژهای انتقال و توزیع به میزان بیشتری افت خواهند کرد.

در ولتاژهای زیر ۸۵ تا ۹۰٪ مقدار نامی، برخی از موتورهای القایی ممکن است متوقف شوند و جریان راکتیو بالایی را جذب نمایند. این موضوع، ولتاژها را باز هم پایین‌تر می‌آورد. معمولاً موتورهای صنعتی و تجاری، با کنتاکتورهای مغناطیسی کنترل می‌شوند؛ بنابراین، افت ولتاژ موجب خارج شدن بسیاری از موتورها از مدار می‌شود. از دست دادن بار به بازیافت ولتاژ منجر می‌شود. بعد از مدت زمانی، موتورها به کار برگردانده می‌شوند. اگر علت اصلی مسألهٔ ولتاژ از بین نرفته باشد، ممکن است که دوباره افت ولتاژ پدید آید.

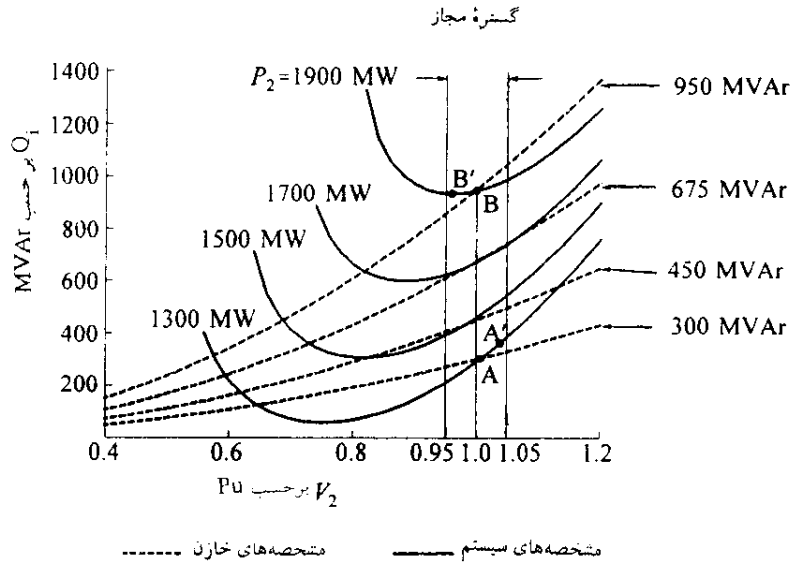
از بحث بالا بوضوح مشاهده می‌شود برای تحلیل دقیق پایداری ولتاژ، باید در نمایش شبکه، اثر عمل تغییردهندهٔ تپ ترانسفورمر توزیع و خازنهای موجود در سیستمهای توزیع را لحاظ کرد. بسته به وسعت مطالعه، نمایش مشخصه‌های بار باید اثر ترموستاتها و سایر وسایل تنظیم بار را نیز درنظر بگیرد. در محیطهای صنعتی، ممکن است لازم باشد تا موتورها و خازنها به صورت صریح، نمایش داده شوند.

1. Residental

حل

الف) شکل ۱۴ ـ ۲ م، مشخصه‌های Q_1-V_2ی حالت ماندگار خط انتقال و خازنهای شنت را نشان می‌دهد.

مشخصه‌های خط انتقال با منحنیهای تیره نشان داده شده است. این منحنیها رابطهٔ بین ولتاژ در شین طرف گیرنده و تزریق توان راکتیو در آن را نمایش می‌دهد، هر یک از متغیرها متناظر با یک سطح مشخص از توان طرف گیرنده می‌باشد، ضریب توان نیز واحد، فرض شده است.



شکل ۱۴ ـ ۲ م مشخصه‌های Q-V حالت ماندگار خازن شنت و سیستم، MVAr خازن در ولتاژ نامی نشان داده شده است.

روابط بین ولتاژ و توان راکتیو تولید شده به وسیلهٔ خازنهای شنت به صورت خطوط مقطع نشان داده شده است. محل برخورد یک منحنی تیره و خط مقطع، نقطهٔ کار حالت ماندگار متناظر با توان مربوط به طرف گیرنده و ظرفیت خازن شنت را نشان می‌دهد.

اینک عملکرد حالت ماندگار سیستم را با سطح بار MW ۱۳۰۰ و مجموعهٔ خازنی MVAr ۳۰۰، (متناظر با نقطهٔ کار A) بررسی می‌کنیم. در این نقطه، شیب $\Delta Q / \Delta V$ی سیستم، بزرگتر از شیب خازن شنت است که عملکرد پایدار را نمایش می‌دهد. لذا پس از بروز اغتشاش گذرای کوچکی،

سیستم به نقطهٔ کار A برمی‌گردد. افزودن مقدار کمی به ظرفیت خازن، (نقطهٔ کار A') به افزایش ولتاژ منجر می‌شود.

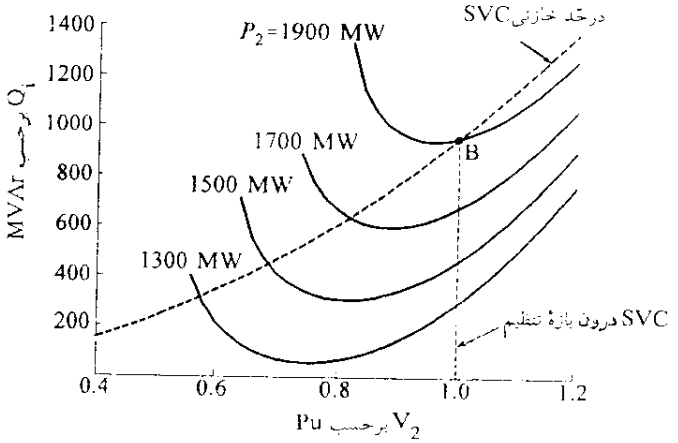
موقعیت در نقطهٔ کار B، با توان دریافتی ۱۹۰۰ MW و مجموعهٔ خازنی ۹۵۰ MVAr، بسیار متفاوت است. اکنون، شیب $\Delta Q / \Delta V$ی سیستم کمتر از شیب خازن است. بنابراین بروز انحرافی کوچک به تغییر فزاینده‌ای در V_2 منجر می‌شود و اندکی افزایش در ظرفیت خازن شنت، همان‌طور که با نقطهٔ B' نشان داده شده است، به کاهش ولتاژ شین منجر می‌شود.

بنابراین مشاهده می‌کنیم که در سطوح بسیار بالای جبرانسازی شنت، عملِ پایدار ممکن نیست. سطح‌محدودکنندهٔ توان‌بار درحدود ۱۷۰۰ MW است که به خازن شنتی معادل با ۶۷۵ MVAr نیازمند است. در این سطح، شیب $\Delta Q / \Delta V$ی سیستم تقریباً برابر با شیب خازن شنت می‌باشد.

در تحلیل بالا، فقط عملکرد حالت ماندگارِ بار در طرف گیرنده در نظر گرفته شده است و به واسطهٔ عمل ULTC، MVA ثابت فرض شده است.

پاسخ گذرا به مشخصه‌های ذاتیِ بار بستگی دارد. برای نمونه، با مشخصهٔ ثابت بار جریان، کاهش بار اضافی هنگام کار در نقطهٔ B موجب کاهش گذرای V_2 و P_2 می‌شود. سیستم در کوتاه مدت، از نظر ولتاژ، پایدار است. لیکن، عمل ULTC ترانسفورمر، به منظور افزایش ولتاژ ثانویه، موجب افزایش جریان (خط) اولیه می‌شود که به کاهشِ V_2 و P_2 منجر می‌گردد. ولتاژ V_2 با هر حرکت تپ، کاهش می‌یابد تا اینکه تغییر دهندهٔ تپ به حد خودش می‌رسد و سیستم در مقادیر پایین V_2 و P_2 استقرار می‌یابد.

ب) شکل ۱۴ ـ ۳ م مشخصه‌های $Q_1 - V_2$ی حالت ماندگار را با *جبرانساز استاتیکی توان‌راکتیو*



شکل ۱۴ ـ ۳ م مشخصه‌های Q-V سیستم و SVC؛ حد خازنی SVC برابر با ۹۵۰ MVAr است.

(SVC) نشان می‌دهد. SVC، تا هنگامی که به حداکثر حد خروجی خازنی خودش (۹۵۰ MVAr) برسد، ولتاژ ثابت V_2 را حفظ خواهد کرد. درنتیجه، برای مقادیر P_2 کمتر از ۱۹۰۰ MW، SVC، V_2 را در ۱/۰ pu نگه خواهد داشت. هنگامی که P_2 به ۱۹۰۰ MW می‌رسد، SVC به حد خازنی خودش می‌رسد و مشخصه‌های آن همانند یک خازن ساده خواهد شد. که به ناپایداری ولتاژ منجر می‌شود.

۱۴ ـ ۲ فروپاشی ولتاژ

فروپاشی ولتاژ، فرایندی است که در آن دنبالهٔ حوادثِ همراهِ ناپایداری ولتاژ در قسمتی اعظامی از سیستم قدرت، به یک نمایهٔ غیرقابل قبول ولتاژ پایین منجر می‌شود.

فروپاشی ولتاژ را می‌توان به چند روش مختلف توضیح داد. در اینجا، ابتدا طرحی از فروپاشی ولتاژ را توصیف خواهیم کرد، سپس پدیده را به طور مشخص براساس وقایعِ واقعیِ فروپاشی تبیین می‌کنیم.

۱۴ ـ ۲ ـ ۱ طرح نوعی از فروپاشی ولتاژ

هرگاه سیستم قدرت به دنبال پیشامدی در سیستم، تحت افزایش ناگهانی تقاضای توان راکتیو قرار گیرد، تقاضای اضافی به کمک ذخیره‌های توان راکتیو ژنراتورها و جبرانسازها برآورده می‌شود. معمولاً ذخیرهٔ کافی وجود دارد و درنتیجه سیستم، در یک سطح ولتاژ پایدار استقرار می‌یابد. لیکن، ممکن است به علت ترکیبی از رویدادها و وضعیت سیستم، تقاضای توان راکتیو اضافی به فروپاشی ولتاژ منجر شود، که خود باعث از کارافتادگی عمده قسمتی از سیستم یا تمامی آن خواهد شد.

یک طرح نوعیِ فروپاشی ولتاژ به شرح زیر است [۶]:

- سیستم قدرت در شرایط کاری غیرعادی قرار دارد و واحدهای تولید کنندهٔ بزرگ، نزدیک مراکز بار کار نمی‌کنند. درنتیجه، برخی از خطوط EHV بشدت تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند و منابع توان راکتیو در حداقل قرار دارند.
- رویدادِ آغازگر فروپاشی ولتاژ، از دست دادن یک خط، تحت بار شدید است که باعث بارگذاری اضافی بر خطوط مجاور باقیمانده می‌شود. این موضوع، تلفات توان راکتیو را در خطوط افزایش می‌دهد (Q جذب شده توسط یک خط برای بارهای بزرگتر از بارگذاری امپدانس ضربه، بسرعت افزایش می‌یابد)، که به واسطهٔ آن تقاضای توان راکتیوِ سنگینی به سیستم تحمیل می‌شود.
- بلافاصله پس از از دست دادن خط EHV، به علت تقاضای راکتیو اضافی،کاهش چشمگیری در ولتاژِ مراکز بارِ مجاور، به وجود خواهد آمد که باعث کاهش بار شده و کاهش

حاصل در انتقال توان از طریق خطوط EHV، اثر پایدارسازی خواهد داشت. لیکن، AVRهای ژنراتور با افزایش تحریک، بسرعت ولتاژهای پایانه را ترمیم می‌کنند. عبور توان راکتیو اضافیِ حاصل از طریق اندوکتانسهای مربوط به ترانسفورمرهای ژنراتور و خطوط، موجب افت ولتاژِ افزایش یافته در طول هرکدام از عناصر می‌گردد.

در این مرحله، ژنراتورها به احتمال زیاد در محدودهٔ قابلیتهای خروجی P - Q، به عبارت دیگر در داخل حدود گرمایی آرمیچر و جریان تحریک، قرار دارند و گاورنرهای سرعت با کاهش خروجیِ MW، فرکانس را تنظیم می‌کنند.

● کاهش ولتاژ سطح EHV در مراکز بار، به داخل سیستم توزیع منعکس می‌شود. ULTCهای ترانسفورمرهای پُست، در زمانی بین ۲ تا ۴ دقیقه ولتاژهای توزیع و بارها را به سطوح قبل از خطا باز می‌گردانند. با هر عمل تغییر تپ، نمو حاصل در بار بر خطوط EHV، تلفات XI^2 و RI^2 خطوط را افزایش می‌دهد، که به نوبهٔ خود موجب افت بزرگتری در سطوح EHV می‌شود. اگر خط EHV به مقدار زیادی بالاتر از SIL زیر بار قرار گیرد، هر واحد افزایش MVA در توان خط باعث چندین واحد MVAr در تلفات خط می‌گردد.

● درنتیجه، با هر عمل تغییر دهندهٔ تپ، خروجی راکتیو ژنراتورها در سراسر سیستم افزایش خواهد یافت. بتدریج، ژنراتورها یک به یک به حدود توانایی توان راکتیو خود می‌رسند (این حدود توسط حداکثر جریان تحریک پیوستهٔ مجاز تحمیل می‌شود). هنگامی که اولین ژنراتور به حد جریان تحریک خودش می‌رسد، ولتاژ پایانه‌اش افت خواهد کرد. که خود ممکن است باعث محدود کردن بیشتر خروجی راکتیو گردد تا جریان آرمیچر را در داخل حدود قابل قبول نگه دارد. و بدین ترتیب سهم آن ژنراتور در بارگذاری توان راکتیو به سایر ژنراتورها انتقال خواهد یافت، که به اضافه بارگذاریِ ژنراتورهای بیشتری منجر می‌شود. اگر تعداد کمتری از ژنراتورها در حالت کنترل خودکار تحریک باشند، سیستم بسیار بیشتر در معرض ناپایداری ولتاژ قرار خواهد داشت. و احتمالاً این مسأله با کم اثرتر شدن جبرانسازهای شنت در ولتاژهای پایین، پیچیده‌تر می‌شود.

سرانجام، فرایند به فروپاشی یا شکست بهمنی ولتاژ منتهی می‌شود که ممکن است به از دست دادن حالت سنکرون واحدهای تولید و بروز خاموشی وسیع منجر گردد.

۱۴ - ۲ - ۲ مشخص سازی کلی براساس رویدادهای واقعی

چند رویداد فروپاشی ولتاژ در سطح جهان رخ داده است (مراجع ۱، ۲، ۷ و ۸ را برای توصیف آنها ببینید). براساس این رویدادها، فروپاشی ولتاژ را می‌توان به صورت زیر مشخص کرد:

۱. ممکن است رویدادِ آغازگر به دلایل مختلفی رخ دهد: تغییرات تدریجی کوچکِ سیستم از قبیل افزایش طبیعی در بار سیستم، یا اغتشاشهای ناگهانی بزرگ از قبیل از دست دادن یک واحد تولیدی یا یک خط تحت بار شدید. برخی اوقات، ممکن است بروز یک اغتشاش اولیهٔ به ظاهر غیرمهم، به رویدادهای پی در پی منجر شود که در نهایت موجب فروپاشی سیستم شود.

۲. اصل مسأله، ناتوانی سیستم در برآورده ساختن تقاضاهای راکتیو خود می‌باشد. معمولاً، ولی نه همیشه، فروپاشیهای ولتاژ مستلزم وضعیتی با خطوط تحت بار شدید است. هنگامی که انتقال توان راکتیو از ناحیه‌های مجاور مشکل است، هر تغییری که مستلزم افزایش توان راکتیو باشد، می‌تواند به فروپاشی ولتاژ منجر گردد.

۳. فروپاشی ولتاژ معمولاً به صورت یک میرایی کُندِ ولتاژ، ظاهر می‌شود. که نتیجهٔ فرایندی تجمعی از عملیات و تداخلهای بسیاری از وسایل، کنترلها، و سیستمهای حفاظتی است. محدودهٔ زمانی فروپاشی در چنین حالاتی ممکن است در حدود چندین دقیقه باشد.

البته مدتِ زمان فروپاشی ولتاژ در برخی موارد ممکن است بسیار کوتاه‌تر و در حدود چند ثانیه باشد. چنین مواردی معمولاً به وسیلهٔ مؤلفه‌های نامطلوب بار از قبیل موتورهای القایی یا کنورتورهای جریان مستقیم به وجود می‌آید [۸]. محدودهٔ زمانی این رده از ناپایداری ولتاژ، همانند ناپایداری زاویه‌ای روتور است. در بسیاری از موارد، ممکن است فرق بین ناپایداری ولتاژ و زاویه‌ای واضح نباشد، و جنبه‌هایی از هر دو پدیده وجود داشته باشد. این صورت از ناپایداریِ ولتاژ را می‌توان به کمک شبیه‌سازیهای مرسوم پایداری گذرا، تحلیل کرد، مشروط بر آنکه مدلهای مناسبی برای نمایش وسایل، بخصوص برای بارهای موتور القایی و کنترلهای مختلف و حفاظتهای همراه با ژنراتورها و وسایل انتقال، به کار گرفته شوند.

کتاب تیلور [۸] که در همین زمینه می‌باشد، براساس ملاحظات بالا، پایداری ولتاژ را به *محدوده‌های زمانی گذرا* و *بلند مدت* دسته‌بندی کرده است. ضمیمهٔ هکتاب، رویدادهای شناخته شدهٔ ناپایداری ولتاژ را به کمک این محدوده‌های زمانی دسته‌بندی می‌کند.

۴. فروپاشی بشدت تحت تأثیر وضعیت و مشخصه‌های سیستم قراردارد. در زیر عوامل اصلی مؤثر بر ناپایداری و یا فروپاشی ولتاژ، آورده شده است:

- فاصله‌های زیاد بین تولید و بار؛
- عمل ULTC در طی وضعیت فشار ضعیف؛
- مشخصه‌های نامطلوب بار؛
- هماهنگی ضعیف بین سیستمهای مختلف کنترلی و حفاظتی.

۵. مسألهٔ فروپاشی ولتاژ ممکن است با بکارگیری بیش از حد جبرانسازی خازن شنت، تشدید شود. لذا می‌توان با انتخاب عاقلانهٔ مجموعه‌ای از خازنهای شنت، سیستمهای استاتیکی توان راکتیو و احتمالاً کندانسورهای سنکرون، جبرانسازی راکتیو را دارای حداکثر تأثیر نمود.

۱۴ ـ ۲ ـ ۳ دسته‌بندی پایداری ولتاژ

تقسیم پایداری ولتاژ به دو دستهٔ زیر سودمند است: پایداری ولتاژ *اغتشاش بزرگ* و پایداری ولتاژ *اغتشاش کوچک*. این دسته‌بندی، پدیده را به دو قسمت تفکیک می‌کند، قسمتی که باید با تحلیل دینامیک غیرخطی بررسی گردد و قسمتی که به کمک تحلیل حالت ماندگار بررسی می‌شود. این دسته‌بندی می‌تواند طراحی و کاربرد ابزار محاسباتی را ساده کند و به عنوان ابزاری در نظر گرفته شود که اطلاعات *مکمل* را فراهم می‌کند.

پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ، توانایی سیستم را در کنترل ولتاژ، به دنبال بروز اغتشاشهای بزرگ، از قبیل: خطاهای سیستم، از دست دادن بار، یا از دست دادن تولید، درنظر دارد. تعیین این صورت از پایداری، مستلزم بررسی عملکرد دینامیکی سیستم در دوره‌ای از زمان است که آن زمان، برای مطالعهٔ تداخل بین وسایلی از قبیل ULTCها و محدودکننده‌های جریان تحریکِ ژنراتور کافی باشد. پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ را می‌توان به کمک شبیه‌سازیهای غیرخطی در حوزهٔ زمان، که مدلسازی مناسبی را شامل می‌شوند، مطالعه کرد. می‌توان پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ را، همان‌طور که در بخش ۱۴ ـ ۲ ـ ۲ بحث شد، به محدوده‌های زمانی گذرا و بلند مدت تقسیم کرد.

پایداری ولتاژ اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک، ناظر به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ، به دنبال بروز اغتشاشهای کوچک از قبیل تغییرات تدریجی در بار است. این صورت از پایداری را می‌توان به طور مؤثر با روشهای حالت ماندگار، که از خطی‌سازی معادلات دینامیکی سیستم در یک نقطهٔ کار معلوم استفاده می‌کنند، مطالعه نمود.

به دنبال بروز اغتشاش، معمولاً ولتاژهای سیستم به سطح اولیه باز نمی‌گردند. بنابراین، لازم است ناحیهٔ سطح ولتاژِ قابل قبول، تعریف شود و سپس گفته می‌شود سیستم دارای *پایداری محدود*[1] در ناحیهٔ تعیین شدهٔ سطح ولتاژ می‌باشد.

۱۴ ـ ۳ تحلیل پایداری ولتاژ

تحلیل پایداری ولتاژ برای یک حالت معین سیستم، بررسی دو جنبهٔ زیر را دربر می‌گیرد [۹]:

1. Finite Stability

الف) *نزدیکی به ناپایداری ولتاژ*؛ سیستم چه مقدار به ناپایداری ولتاژ نزدیک است؟ فاصله تا ناپایداری را می‌توان برحسب کمیتهای فیزیکی، از قبیل سطح بار، عبور توان حقیقی در یک حد فاصل بحرانی و ذخیرهٔ توان راکتیو، اندازه گرفت. مناسبترین میزان برای هر موقعیت مفروض، به سیستم مشخص و کاربرد موردنظرِ حاشیه، برای نمونه: برنامه‌ریزی در مقابل تصمیمهای بهره‌برداری، بستگی دارد. البته باید پیشامدهای احتمالی را نیز درنظر گرفت، مانند قطع خط، از دست دادن واحد تولید یا منبع توان راکتیو و غیره.

ب) *مکانیزم ناپایداری ولتاژ*؛ چرا و چگونه ناپایداری رخ می‌دهد؟ عوامل کلیدی که در ناپایداری نقش دارند کدامند؟ نواحی ولتاژ ضعیف کدامند؟ چه اقدامهایی در بهبود پایداری ولتاژ مؤثرترین هستند؟

شبیه‌سازیهای حوزهٔ زمان، که در آنها مدلسازی مناسبی وارد شده باشد، رویدادها و روندشان را که منجر به ناپایداری شده است، نشان می‌دهند. لیکن، چنین شبیه‌سازیهایی وقت‌گیر هستند و بسادگی اطلاعات حساسیت و درجهٔ پایداری را به دست نمی‌دهند.

معمولاً دینامیکهای سیستم که بر پایداری ولتاژ تأثیر می‌گذارند، کُند هستند. بنابراین، بسیاری از جنبه‌های مسأله را می‌توان به طور مؤثر با بکارگیری روشهای استاتیکی تحلیل کرد، این روشها قابلیتهای نقطهٔ تعادل نمایش داده شده به وسیلهٔ یک نقطهٔ کار معین سیستم قدرت را بررسی می‌کنند. با استفاده از روشهای تحلیل استاتیکی، می‌توان گسترهٔ وسیعی از وضعیت سیستم را بررسی کرد و اگر به طور مناسبی به کار گرفته شوند، می‌توانند دید بیشتری را از ماهیت مسألهٔ موردنظر به دست داده، عوامل کلیدی مؤثر بر ناپایداری را شناسایی کنند. از طرف دیگر، تحلیل دینامیکی برای مطالعهٔ تفصیلی موقعیتهای معینِ فروپاشی ولتاژ، هماهنگی حفاظت و کنترلها، و آزمون اقدامات چاره‌ساز سودمند است. شبیه‌سازیهای دینامیکی، همچنین این موضوع را بررسی می‌کنند که آیا سیستم به نقطهٔ تعادل حالت ماندگار می‌رسد، و درصورت مثبت بودن پاسخ، چگونگی رسیدن به آن را نیز بررسی می‌کنند.

در این بخش، علاوه بر روشهای تحلیل استاتیکی، روشهای دینامیکی را نیز بررسی می‌کنیم و نشان می‌دهیم که چگونه می‌توان از دو روش به صورت مکمل همدیگر، استفاده نمود.

۱۴ - ۳ - ۱ ملاحظات مدلسازی

در زیر توصیفی از مدلهای عناصر سیستم قدرت که اثربسزایی برپایداری ولتاژ دارند، ارائه شده است:

بارها: مشخصه‌های بار می‌توانند در تحلیل پایداریِ ولتاژ، مهم باشند. ممکن است برخلاف تحلیلهای مرسوم پایداری گذرا و پخش بار، به نمایش سیستم زیر انتقالِ بسط یافته در ناحیهٔ

ولتاژ ضعیف، نیاز باشد. نمایش سیستم باید عمل ULTC ترانسفورمر، جبرانسازی توان راکتیو، و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ در سیستم زیر انتقال را شامل شود.

درنظر گرفتن وابستگی بارها به ولتاژ و فرکانس، مهم است. همچنین ممکن است مدلسازی موتورهای القایی به طور مشخص، لازم باشد. در برخی موارد، ممکن است نمایش مناسب مشخصه‌های بار در ولتاژهای پایین نیز ضروری باشد [۱۱].

ژنراتورها و کنترل‌های تحریک آنها: برای تحلیل پایداری ولتاژ، ممکن است لازم باشد که مشخصهٔ افتی AVR به جای افتِ صفر درنظر گرفته شود. اگر جبرانسازی بار (افت خط) موجود باشد (فصل ۸، بخش ۸ ـ ۵ ـ ۴ را ببینید)، باید اثر آن را نمایش داد و باید به جای اینکه حدهای جریان آرمیچر و جریان تحریک به شکل مقدار ثابتی از حد بالای توان راکتیو فرض شوند، آنها را به‌طور مشخص نمایش داد.

سیستمهای استاتیکی توان راکتیو (SVSها): هنگامی که SVS در داخل محدودهٔ عادی کنترل ولتاژ عمل می‌کند، ولتاژ شین را با یک مشخصهٔ با اُفت کم حفظ می‌کند. هنگامی که در حدهای توان راکتیو عمل می‌نماید، SVS به شکل یک خازن یا راکتور، درمی‌آید که می‌تواند اثر بسزایی بر پایداری ولتاژ داشته باشد. ازاین‌رو باید مشخصه‌های SVS به‌طور مناسبی درمطالعات پایداری ولتاژ نمایش داده شوند. مدلسازی SVSها در فصل یازدهم توصیف شده است (بخش ۱۱ ـ ۲ ـ ۹).

کنترل خودکار تولید (AGC): برای پیشامدهایی که به یک عدم تطابق مهم بین تولید و بار منجر می‌شوند، ممکن است عملکرد کنترل سرعت اولیه و کنترل اضافی فرکانس با یاس خطارتباطی، تولید سیستم را به طور عمده‌ای تغییر دهند، که در برخی موارد ممکن است به زیان پایداری ولتاژ باشد. از این‌رو، این توابع باید به صورت مناسبی نمایش داده شوند.

حفاظت و کنترلها: این بخش، حفاظت و کنترلهای واحد تولید و شبکهٔ انتقال را دربر می‌گیرد. برای نمونه می‌توان حفاظت تحریک ژنراتور، حفاظت اضافه جریان آرمیچر، حفاظت اضافه جریان خط انتقال، کنترلهای مجموعهٔ خازنی، تنظیم‌کننده‌های تغییردهندهٔ فاز و بارزدایی کمبود ولتاژ را نام برد.

۱۴ ـ ۳ ـ ۲ تحلیل دینامیکی

ساختار کلی مدل سیستم برای تحلیل پایداری ولتاژ و تحلیل پایداری گذرا یکسان است. همان‌طور که در فصل سیزدهم (بخش ۱۳ ـ ۳ ـ ۵) توضیح داده شد، معادلات کلی سیستم مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلِ مرتبهٔ اول به شکل زیر است

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \qquad (۱۴ ـ ۴)$$

و نیز مجموعه‌ای از معادلات جبری به شکل:

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) = Y_N \mathbf{V} \qquad (۵ - ۱۴)$$

همراه با مجموعه‌ای از شرایط اولیهٔ معلومِ ($\mathbf{x}_0$, $\mathbf{V}_0$) می‌باشد، که در آن:

$\mathbf{x}$ = بردار حالت سیستم؛

$\mathbf{V}$ = بردار ولتاژ شین؛

$\mathbf{I}$ = بردار تزریق جریان؛

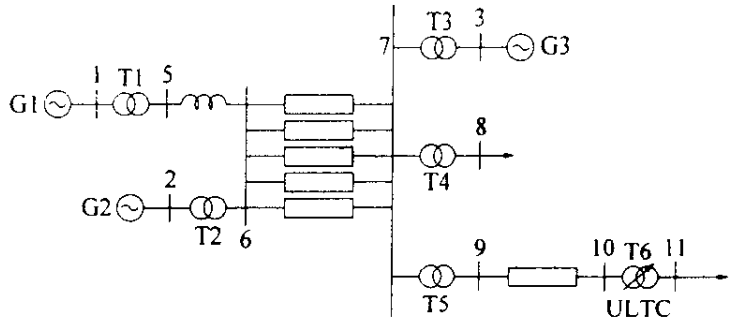
و Y_N = ماتریس ادمیتانس گره شبکه است.

از آنجاکه در معادلات، نمایش تغییردهندهٔ تپ ترانسفورمر و کنترلهای زاویهٔ تغییر فاز را وارد می‌کنیم، عناصر Y_N به صورت توابعی از ولتاژهای شین و زمان تغییر می‌کنند. بردار تزریق جریان $\mathbf{I}$، تابعی از حالتهای سیستم $\mathbf{x}$ و بردار ولتاژ شین $\mathbf{V}$ می‌باشد، که شرایط مرزی در پایانه‌های وسایل مختلف (واحدهای تولید، بارهای استاتیکی غیرخطی، موتورها، SVSها، کنورتورهای HVDC و غیره) را نمایش می‌دهد. به واسطهٔ ماهیت وابسته به زمان وسایلی از قبیل محدودکننده‌های جریان تحریک، رابطهٔ بین $\mathbf{I}$ و $\mathbf{x}$ معمولاً تابعی از زمان است.

معادلات ۱۴ ـ ۴ و ۱۴ ـ ۵ را می‌توان در حوزهٔ زمان و با استفاده از هر کدام از روشهای انتگرالگیریِ عددی توصیف شده در فصل سیزدهم (بخش ۱۳ ـ ۲) و روشهای تحلیل پخش بار توصیف شده در فصل ششم (بخش ۶ ـ ۴)، حل کرد. معمولاً مدت مطالعه در حدود چندین دقیقه است. با وارد کردن مدلهای خاص نمایشِ «دینامیکهای کُند سیستم»، که به فروپاشی ولتاژ منجر می‌شوند، سختی معادلات دیفرانسیل سیستم بمراتب بیش از مدلهای پایداری گذرا خواهد بود. برای چنین کاربردهایی روشهای انتگرالگیری ضمنی به طور ایده‌الی مناسب است. درنظر گرفتن امکاناتی برای تغییر خودکارِ گام زمانیِ در انتگرالگیری، همراه با جلورفتن پاسخ و از بین رفتن گذراهای سریع، به طور چشمگیری کارایی محاسباتیِ چنین روشهایی را افزایش می‌دهد [۱۲].

مثال ۱۴ ـ ۲

در این مثال، پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ سیستم نشان داده شده در شکل ۱۴ ـ ۴ م را، با استفاده از شبیه‌سازیهای حوزهٔ زمان، تحلیل می‌کنیم. سیستم آزمایشی که در این مثال درنظر گرفته شده، براساس سیستمی است که اولین بار در مرجع ۲۵ توصیف و در مراجع ۲، ۸ و ۱۰ برای تحلیل جنبه‌های مختلف پایداری ولتاژ به کار گرفته شده است.



شکل ۱۴ ـ ۴ م سیستم آزمایشی

این مثال، علاوه بر نمایشِ روشِ حوزهٔ زمانی در تحلیل دینامیکی پایداریِ ولتاژ، اثر محدودکنندهٔ فوق تحریک ژنراتور (OXL)، تغییردهندهٔ تپ ترانسفورمر و مشخصه‌های بار را نیز بر پایداری ولتاژ نشان می‌دهد.

داده‌های سیستم آزمایشی به صورت زیر است:

خطوط انتقال (R، X و B در مبنای واحد بر پایهٔ MVA ۱۰۰) :

خط	R	X	B
۵ ـ ۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۰۰
۶ ـ ۷	۰/۰۰۱۵	۰/۰۲۸۸	۱/۱۷۳۰
۹ ـ ۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۰۰

ترانسفورمرها (R و X در مبنای واحد بر پایهٔ MVA ۱۰۰) :

ترانسفورمر	R	X	نسبت	
T1	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۰	۰/۸۸۵۷	
T2	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۵	۰/۸۸۵۷	
T3	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۲۵	۰/۹۰۲۴	
T4	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۰	۱/۰۶۶۴	
T5	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۶	۱/۰۸۰۰	
T6	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۰	۰/۹۷۵۰	(سطح بار ۱)
			۰/۹۹۳۸	(سطح بار ۲)
			۱/۰۰۰۰	(سطح بار ۳)

ULTC برای ترانسفورمر T6 بین شین‌های ۱۰ و ۱۱:

تأخیر زمانی برای اولین حرکت تپ: ۳۰ ثانیه؛

تأخیر زمانی برای حرکت بعدی تپ: ۵ ثانیه؛

باند راکد: ۱٪ ± pu ولتاژ شین؛

گسترهٔ تپ: ۱۶ ± گام؛

اندازهٔ گام: (۰/۰۰۶۲۵ pu =) ۵/۸٪؛

خازنهای شنت:

شین	MVAr
۷	۷۶۳
۸	۶۰۰
۹	۱۷۱۰

بارها:

شین	P (MW)	Q (MVAr)	
۸	۳۲۷۱	۱۰۱۵	سطح بار ۱
	۳۳۲۰	۱۰۳۰	سطح بار ۲
	۳۳۴۵	۱ ۳۸	سطح بار ۳
۱۱	۳۳۸۴	۹۷۱	سطح بار ۱
	۳۴۳۵	۹۸۵	سطح بار ۲
	۳۴۶۰	۹۹۳	سطح بار ۳

تولید:

شین	P (MW)	V (pu)	
G1	۳۹۸۱	۰/۹۸۰۰	سطح بار ۱
	۴۰۹۴	۰/۹۸۰۰	سطح بار ۲
	۴۱۵۲	۰/۹۸۰۰	سطح بار ۳
G2	۱۷۳۶	۰/۹۶۴۶	سطح بار ۱
	۱۷۳۶	۰/۹۶۴۶	سطح بار ۲
	۱۷۳۶	۰/۹۶۴۶	سطح بار ۳
G3	۱۱۵۴	۱/۰۴۰۰	سطح بار ۱
	۱۱۵۴	۱/۰۴۰۰	سطح بار ۲
	۱۱۵۴	۱/۰۴۰۰	سطح بار ۳

پارامترهای ماشین:

ماشین ۱ شین بی‌نهایت

ماشین ۲ ظرفیت = ۲۲۰۰ MVA H = ۲/۰۹ , MVA

ماشین ۳ ظرفیت = ۱۴۰۰ MVA H = ۲/۳۳ , MVA

در زیر،پارامترهای ماشین ۲ و ماشین ۳ براساس MVA متناظر نشان داده شده:

R_a = ۰/۰۰۴۶ X_d = ۲/۰۷ X_q = ۱/۹۹

X_l = ۰/۱۵۵ X'_d = ۰/۲۸ X'_q = ۰/۴۹

X''_d = ۰/۲۱۵ X''_q = ۰/۲۱۵

T_{d0}' = ۴/۱۰ T_{q0}' = ۰/۵۶

T_{d0}'' = ۰/۰۳۳ T_{q0}'' = ۰/۰۶۲

تحریک‌کننده‌ها:

هر دو ماشین ۲ و ۳ دارای تحریک کننده‌هایی با بهرهٔ ۴۰۰ هستند. ثابت زمانی مدار حس کننده نیز ۰/۰۲ ثانیه است.

محدودکنندهٔ فوق تحریک برای ماشین ۳:

I_{fdmax1} = ۳/۰۲ pu I_{fdmax2} = ۴/۶۰ pu

I_{LIM} = ۳/۸۵ pu K_1 = ۰/۲۴۸ K_2 = ۱۲/۶

OXL تنها برای ژنراتور ۳ لحاظ شده است. نمودار بلوکی OXL در شکل ۱۴ ـ ۵ م و مشخصهٔ تابعی آن در شکل ۱۴ ـ ۶ م نشان داده شده است.

سه سطح بار سیستم را در نظر می‌گیریم:

سطح بار ۱: ۱۹۸۶ MVAr ,۶۶۵۵ MW

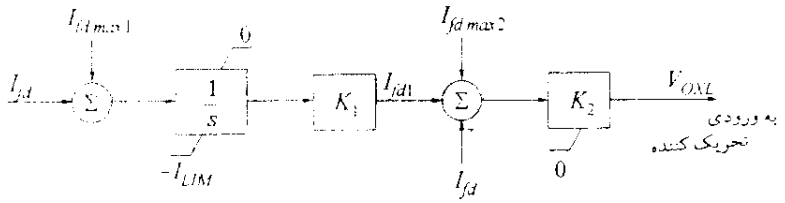
سطح بار ۲: ۲۰۱۶ MVAr ,۶۷۵۵ MW

سطح بار ۳: ۲۰۳۱ MVAr ,۶۸۰۵ MW

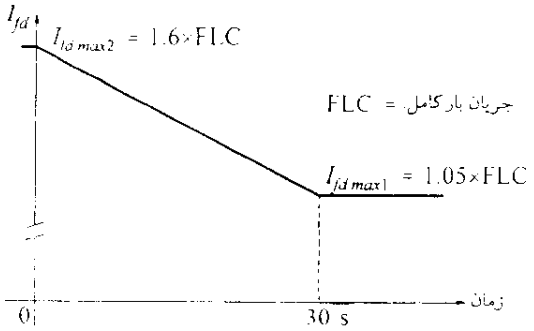
اغتشاش درنظر گرفته شده، از دست دادن یکی از خطوط بین شین‌های ۶ و ۷ است (بدون خطا).

پایداری ولتاژ سیستم را با نمایشهای زیر از بارها،در شینهای ۸ و ۱۱ بررسی کنید:

الف) بار در شین ۱۱ به صورت ۵۰٪ امپدانس ثابت و ۵۰٪ جریان ثابت برای هر دو مؤلفهٔ



شکل ۱۴ ـ ۵ م نمودار بلوکی OXL



شکل ۱۴ ـ ۶ م مشخصهٔ OXL

حقیقی و راکتیو مدل شده است؛ عمل ULTC ترانسفورمر (T6)، که این بار را تغذیه می‌کند، به صورت تفصیلی مدل شده است. بار در شین ۸ به صورت MVA ثابت برای هر دو مؤلفهٔ حقیقی و راکتیو مدل شده و فرض شده ترانسفورمر T_4 تغذیه کنندهٔ این بار، یک تپ ثابت دارد.

ب) مؤلفه توان حقیقی بار در شین ۸ به صورت یک موتور القایی معادل، با پارامترهای زیر نمایش داده شده است (برای توصیف مدل، فصل ۷، بخش ۷ ـ ۲ ـ ۱ را ببینید):

ظرفیت موتور = ۳۶۰۰ MVA ۶۰ HZ

X_s = ۰/۱۴۵ pu R_s = ۰/۰۱ pu X_m = ۳/۳ pu

H = ۰/۶ (ثانیه) X_r = ۰/۱۴۵ pu R_r = ۰/۰۰۸ pu

نمای گشتاور بار m = ۲/۰ است (یعنی آنکه، $T_L = T_0\,\omega_r^2$)

کلیهٔ مؤلفه‌های دیگر همانند (الف) مدل شده‌اند.

ج) بار در شین ۱۱ باعمل ULTC ترانسفورمر T6، به‌صورت(الف) نمایش داده‌شده است. بار در شین ۸ به‌صورت MVAی ثابت‌برای‌مؤلفهٔ‌راکتیو و یک‌بار کنترل‌شده ترموستاتی‌برای‌مؤلفهٔ‌حقیقی ب

پارامترهای زیر نمایش داده شده است (برای توصیف مدل، فصل ۷، شکل ۷ ـ ۴ را ببینید):

$K_p = ۰/۱$ $K_I = ۱/۰$ $K_۱ = ۱/۰$

$T_۱ = ۴۰$ (ثانیه) $T_A = ۲۰$ (ثانیه) $C_{max} = ۱/۵C_0$

حل

الف) شکلهای ۱۴ ـ ۷ م «الف، ب و ج» پاسخهای زمانیِ ولتاژها را در شینهای ۱۰، ۱۱ و ۷ را پس از، از دست دادن یکی از خطوط بین شینهای ۶ و ۷ و برای هر یک از سطوح بار نشان می‌دهد. نمودارهای متناظر جریان تحریک ژنراتور G3، خروجی توان راکتیو، و ولتاژ پایانه در شکلهای ۱۴ ـ ۸ م «الف، ب و ج» نشان داده شده است.

اثر از دست دادن خط، در ابتدا باعث افت ولتاژ می‌شود. برای بار سطح ۱، عمل ULTCی ترانسفورمر T6، ولتاژ شین را در مدتی در حدود ۴۰ ثانیه به مقداری نزدیک به مقدار مرجع خود باز می‌گرداند. جریان تحریک G3 زیر حد پیوستهٔ آن باقی می‌ماند و ولتاژ پایانه، به وسیلهٔ AVR در مقدار اولیه، حفظ می‌شود. ولتاژ شینهای ۱۰ و ۷ در مقادیری زیر مقادیر قبل از اغتشاش استقرار می‌یابند. بنابراین، سیستم از نظر ولتاژ، پایدار است.

با بارسطح ۲، همانندحالت‌بارسطح ۱، ولتاژشین ۱۱ پس از حدود ۴۰ ثانیه‌به نزدیکی مقدارمرجع خود بازگردانده می‌شود. لیکن، اکنون تقاضای توان راکتیو بر ژنراتورها، بیشتر است و جریان تحریک ژنراتور G3 از حد خود فراتر می‌رود. محدودکنندهٔ فوق تحریک G3 در زمانی در حدود ۱۸۰ ثانیه، شروع‌به کم‌کردن‌جریان‌تحریک‌می‌کند. به‌دنبال‌این‌عمل، رویدادهای‌زیر به‌ترتیب رخ‌می‌دهد:

- ولتاژ پایانهٔ G3، که پس از این با AVR کنترل نمی‌شود، افت می‌کند.
- ولتاژ شینهای ۱۱، ۱۰ و ۷ افت می‌کنند.
- ULTC ترانسفورمر T6 برای بازگرداندن ولتاژ و بار در شین ۱۱ عمل می‌نماید.
- تقاضا برای توان راکتیو بر ژنراتورها افزایش می‌یابد. OXL مربوط به G3 حفظ جریان تحریک در حد نهایی‌اش را ادامه می‌دهد و ولتاژ پایانهٔ G3، همچنان افت می‌کند.
- ولتاژ در سطح انتقال (شین ۷) افت می‌کند که خود باعث کاهش بیشتر ولتاژهای شین ۱۰ و شین ۱۱ می‌گردد.
- ULTCی ترانسفورمر T6 دوباره شروع به کار می‌کند، و دنبالهٔ حوادث بالا تکرار می‌شوند.

اثر خالص هر حرکت تپ ترانسفورمر T6، کاهشِ ولتاژِ شین ۱۱ (به جای افزایش آن) است. ولتاژِ شین ۱۱ آنقدر کاهش می‌یابد تا ULTC، در زمانی در حدود ۲۶۰ ثانیه به حد بالای حود

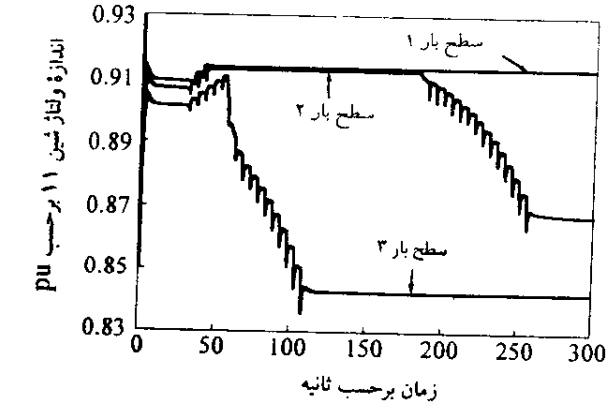
می‌رسد و ولتاژ در این نقطه پایدار می‌شود. ولتاژ در شین ۱۱ در pu ۰/۸۶۵ استقرار می‌یابد.

با بارسطح ۳، تقاضا برای توان راکتیو بالاتر است. در نتیجه، جریان تحریک در زمانی حدود ۵۰ ثانیه به حد نهایی خود می‌رسد. با از دست دادن کنترل ولتاژ به وسیلهٔ G3، ولتاژها در سطح انتقال و در شین ۱۱ با هرحرکت تپ ULTC افت پیدامی‌کنند. هنگامی که ULTC در زمانی در حدود ۱۱۰ ثانیه به حدنهایی خودمی‌رسد، ولتاژها پایدارمی‌شوند. ولتاژ شین ۱۱ در نزدیک pu ۰/۸۴ استقرار می‌یابد.

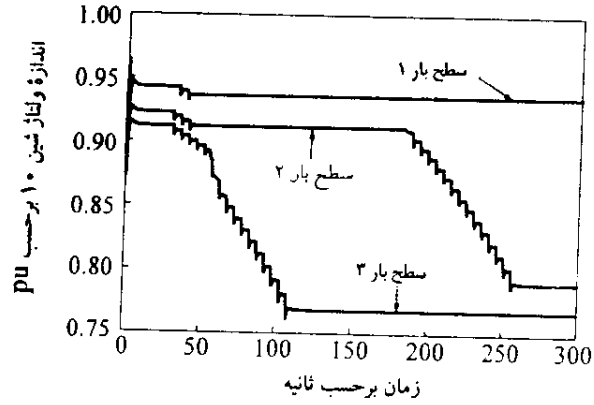
ب) در این حالت مؤلفهٔ توان حقیقی بار در شین ۸ به صورت یک موتور القایی نمایش داده شده است و لذا با حالت بالا متفاوت است و تنها بار سطح ۲ درنظر گرفته شده است. شکلهای ۱۴ ـ ۹ م «الف، ب و ج» نمودارهای سرعت، توان راکتیو و حقیقی موتور القایی را نشان می‌دهد. موتور در زمانی در حدود ۶۵ ثانیه متوقف می‌شود. این موضوع به کاهشی در توان حقیقی جذب شده به وسیلهٔ موتور منجر می‌شود. لیکن، توان راکتیو کشیده شده به وسیلهٔ موتور بسرعت افزایش می‌یابد. که مطابق شکلهای ۱۴ ـ ۱۰ م و ۱۴ ـ ۱۱ م به فروپاشی ولتاژ منجر می‌گردد. در شکل ۱۴ ـ ۱۱ م پاسخ ولتاژ با بار MVAی ثابت در شین ۸، همان‌طور که در «الف» محاسبه شد نیز نشان داده شده است.

ج) این حالت، یک بارِ کنترل شدهٔ ترموستاتی (T_c) را در شین ۸، با بار سیستم در سطح ۳، درنظر می‌گیرد. شکلهای ۱۴ ـ ۱۲ م «الف، ب و ج» نمودارهای ولتاژ در شین ۸، کنداکتانس بار TC و توان حقیقی کشیده شده به وسیلهٔ بار را نمایش می‌دهد. شکل ۱۴ ـ ۱۳ م نمودار ولتاژ متناظر را در شین ۱۱ (منحنی ۱) نشان می‌دهد. برای مقایسه، پاسخ ولتاژ شین ۱۱ همراه با بار مقاومتی ثابت در شین ۸ نیز در شکل ۱۴ ـ ۱۳ م (منحنی ۲) نشان داده شده است.

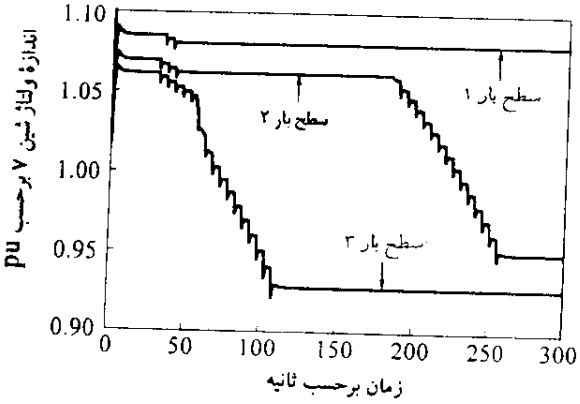
به دنبال از دست دادن خطی بین شینهای ۶ و ۷، ولتاژ شین ۱۱ افت می‌کند. در زمانی در حدود ۴۰ ثانیه، ULTC ترانسفورمر T6، ولتاژ شین ۱۱ را به مقدار مرجع خودش باز می‌گرداند. اگر بار در شین ۸ باری مقاومتی ثابت باشد، همان‌طور که با منحنی ۲ در شکل ۱۴ ـ ۱۳ م نشان داده شده است، ولتاژ، پایدار خواهد شد. با یک بار کنترل شدهٔ ترموستاتی، ولتاژ شین ۱۱ افت می‌کند و ULTC دوباره در زمانی در حدود ۹۰ ثانیه شروع به کار می‌نماید. عمل بار TC، باعث افت دوبارهٔ ولتاژ می‌شود. تداخل بین ULTC و بارِ TC تا زمانی در حدود ۱۷۰ ثانیه تا رسیدن ULTC به حد نهایی خود ادامه پیدا می‌کند.کنداکتانس‌بار TC و توان، افزایش پیدا می‌کنند تا توان به مقدار قبل از اغتشاش، ۳۳۴۵ MW، برسد. ولتاژ شین‌های ۸ و ۱۱ به ترتیب در حدود pu ۰/۸۵ و pu ۰/۸۴۵ پایدار می‌شوند.



(الف) ولتاژ شین ۱۱

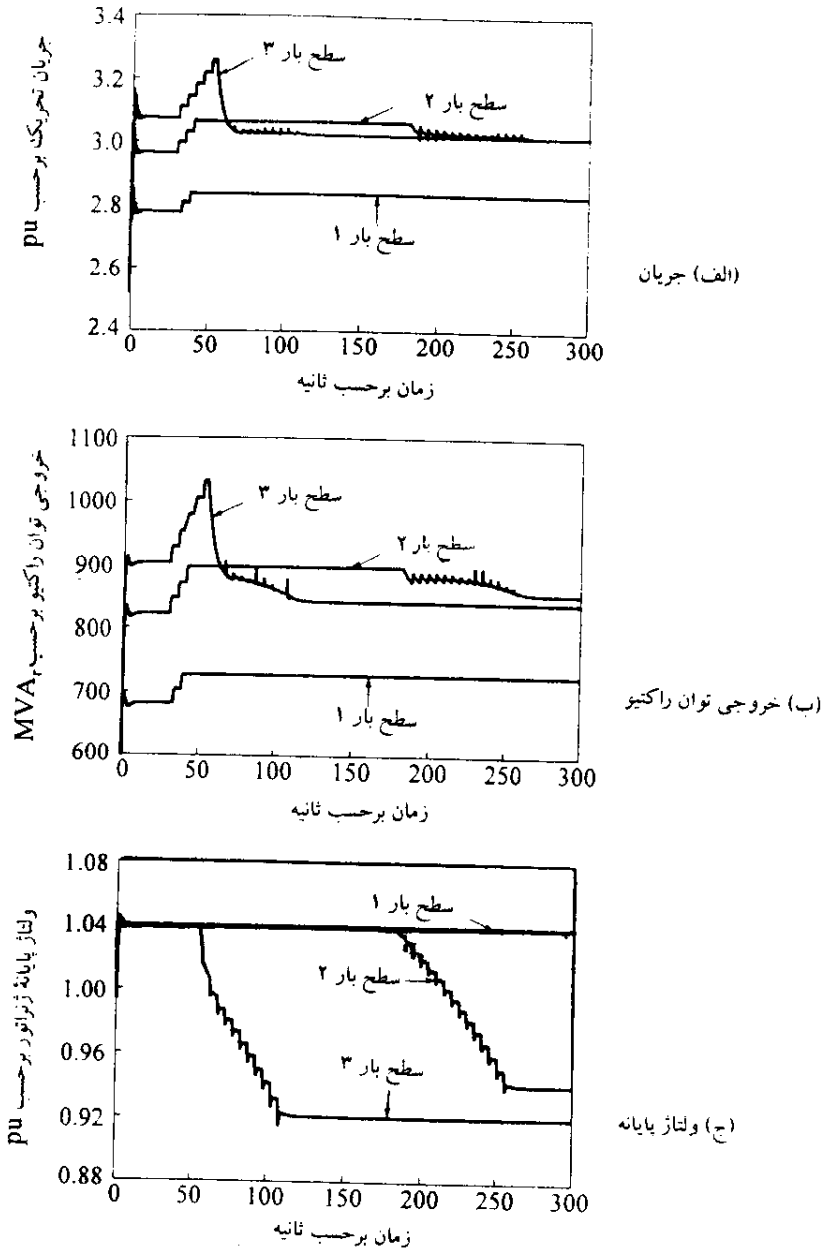


(ب) ولتاژ شین ۱۰

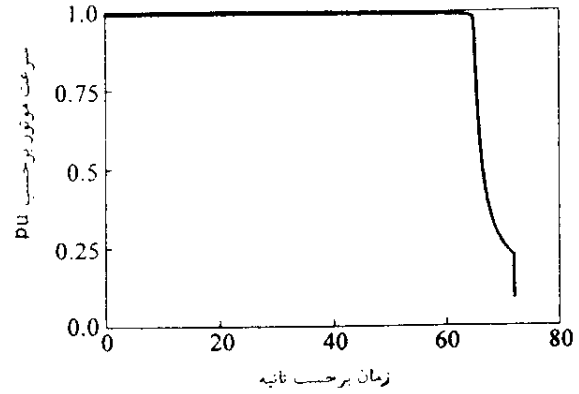


(ج) ولتاژ شین ۷

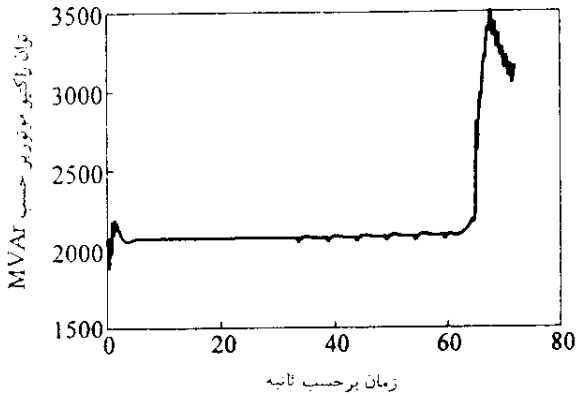
شکل ۱۴ ـ ۷ م ولتاژ شینهای ۷، ۱۰ و ۱۱.



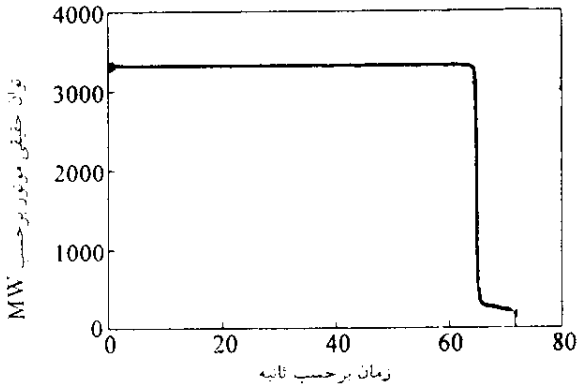
شکل ۱۴ ـ ۸ م پاسخهای متغیرهای ژنراتور G3.



(الف) سرعت موتور

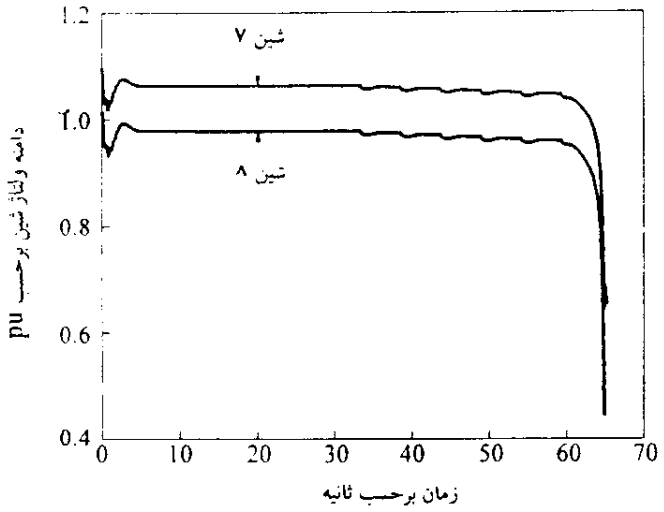


(ب)توان راکتیو جذب شده بوسیلهٔ موتور

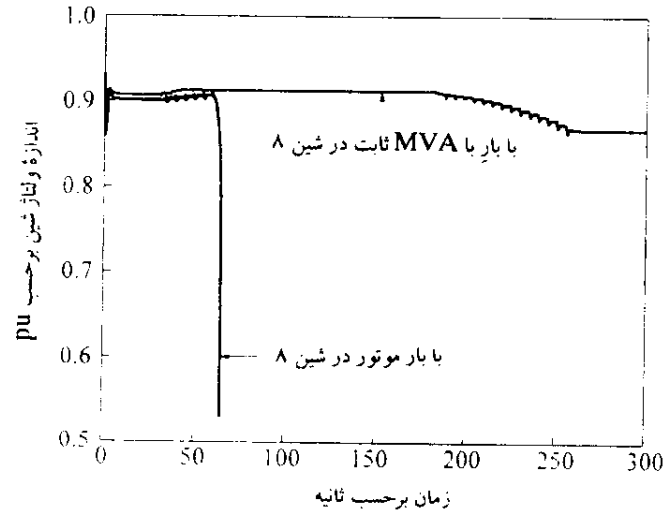


(ج) توان حقیقی جذب شده بوسیلهٔ موتور

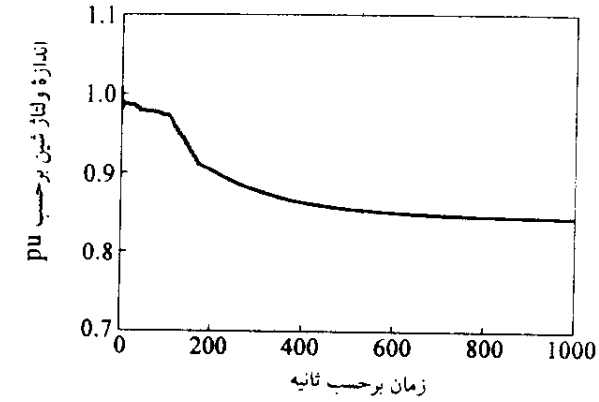
شکل ۱۴ ـ ۹ م پاسخ موتورالقایی، با سطح بار ۲.



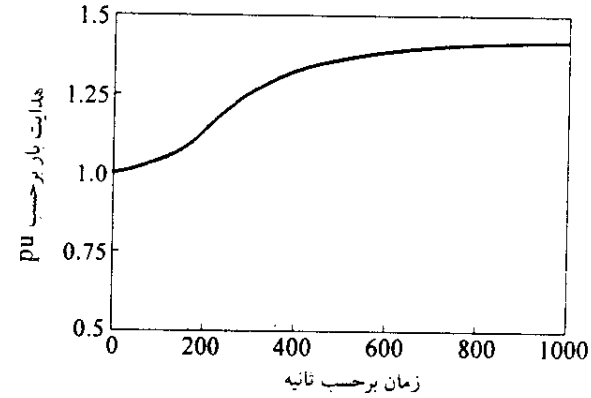
شکل ۱۴ ـ ۱۰ م اندازهٔ ولتاژ در شینهای ۷ و ۸ با بار موتور القایی در شین ۸، سیستم در سطح بار ۲



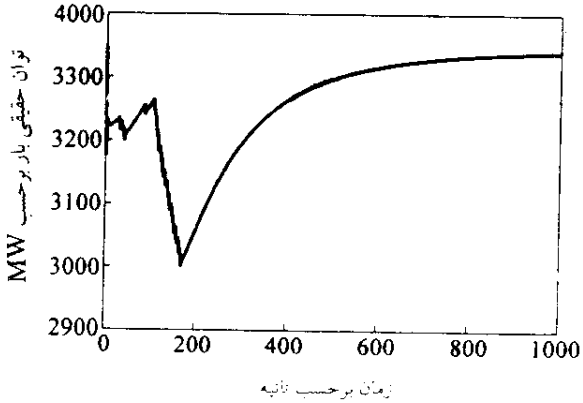
شکل ۱۴ ـ ۱۱ م پاسخ اندازهٔ ولتاژ در شین ۱۱ با بار MVA ثابت و با موتوری در شین ۸، سیستم در سطح بار ۲.



(الف) اندازهٔ ولتاژ شین ۸

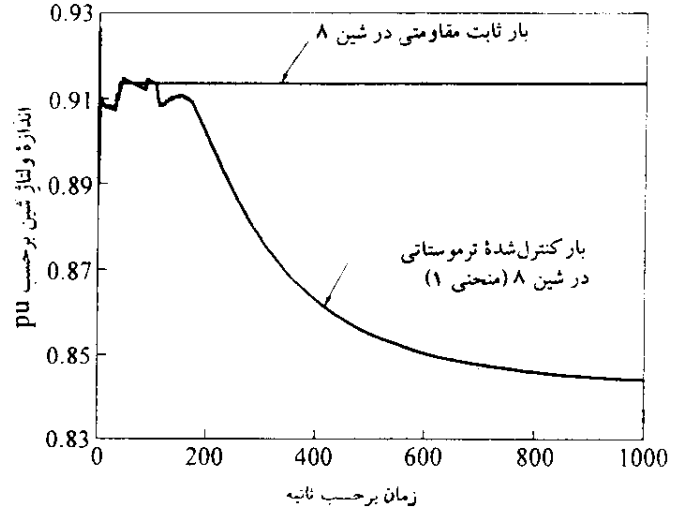


(ب) کنداکتانس بار TC در مبنای واحد مقدار اولیهٔ G_0



(ج) توان حقیقی تحویل شده به بار TC

شکل ۱۴ ـ ۱۲ م پاسخ بار کنترل شدهٔ ترموستاتی در شین ۸.



شکل ۱۴ ـ ۱۳ م پاسخ اندازهٔ ولتاژ در شین ۱۱ با بار TC و بار ثابت مقاومتی درشین ۸.

۱۴ ـ ۳ ـ ۳ تحلیل استاتیکی

روش استاتیکی، از وضعیتهای سیستم در محدوده‌های زمانی مختلف در طول مسیرِ حوزهٔ زمان، تصویر[1] می‌گیرد. در هر کدام از این محدوده‌های زمانی، مشتقات متغیرهای حالت (به عبارت دیگر، $\dot{\mathbf{x}}$) در معادلهٔ ۱۴ ـ ۴ صفر فرض می‌شود و متغیرهای حالت، مقادیری متناظر با محدودهٔ زمانیِ معین را اختیار می‌کنند. درنتیجه، معادلات کلی سیستم به معادلات جبری خالص تبدیل می‌شوند و بدین ترتیب بکارگیری روشهای تحلیل استاتیکی امکان‌پذیر می‌گردد.

در گذشته، صنعت برق برای تحلیل استاتیکی پایداری ولتاژ به طور عمده به برنامه‌های مرسوم پخش بار وابسته بوده است. پایداری با محاسبهٔ منحنیهای V - P و Q - V در شینهای بارِ انتخاب شده، تعیین می‌شود. عموماً، این منحنیها با اجرای تعداد زیادی برنامه‌های پخش بار و با استفاده از مدلهای مرسوم به دست می‌آیند. گرچه می‌توان چنین روشهایی را خودکار کرد، لیکن بسیار زمان‌بر هستند و بسادگی اطلاعات سودمندی در خصوص دلایل مشکلات پایداری به دست نمی‌دهند. علاوه بر این، این روشها بر شینهای منفرد تمرکز دارند، بدین معنا که مشخصه‌های پایداری با تأکید بر هر شین به صورت جداگانه، به دست آورده می‌شوند. این

1. Snapshot

موضوع ممکن است موقعیت پایداری را به طور غیرواقعی مخدوش نماید. همچنین، برای تحلیل V - Q و V - P باید شینها بدقت برگزیده شوند و ممکن است برای به دست آوردن اطلاعات کامل، تعداد زیادی از این منحنیها لازم باشد. درواقع، ممکن است به دلیل واگراییِ پخش بار، ناشی از مشکلات موجود در جای دیگری از سیستم، تولید منحنیهای V - Q به طور کامل امکان‌پذیر نباشد.

در منابع، روشهای خاصی برای تحلیل پایداری ولتاژ با استفاده از روش استاتیکی پیشنهاد شده است. برخی از این روشها در قسمت ۲ گزارش IEEE ۱۹۹۰ توضیح داده شده‌اند [۱]. در حالت کلی، این روشها کاربرد عملی وسیعی پیدا نکرده‌اند.

مراجع ۱۳ و ۱۴ کاربردهای عملی روشی را براساس حساسیت V - Q توصیف می‌کنند. روش تحلیل مُدال، توصیف شده در مراجع ۹ و ۱۰، نیز برای تحلیل پایداری ولتاژ سیستمهای عملی به کار گرفته شده است. در این بخش، این دو روش را توضیح می‌دهیم. مزایای این روشها آن است که از دیدگاه سیستمی، اطلاعات مربوط به پایداری ولتاژ را به دست می‌دهند و ناحیه‌هایی را که بالقوه مشکل دارند بوضوح شناسایی می‌کنند. روش تحلیل مُدال این مزیت اضافی را دارد که اطلاعاتی را نیز درخصوص مکانیزم ناپایداری به دست می‌دهد. دلیل اصلی درنظر گرفتن تحلیل حساسیت V - Q در اینجا آن است که مقدمهٔ خوبی برای تحلیل مُدال می‌باشد.

الف) تحلیل حساسیت V-Q

همان‌طور که در فصل ششم (بخش ۶ ـ ۴ ـ ۳) نشان داده شده است، قیود شبکهٔ نمایش داده شده با معادلهٔ ۱۴ ـ ۵ را می‌توان به صورت خطی شده زیر بیان کرد:

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{\mathbf{P}\theta} & \mathbf{J}_{\mathbf{PV}} \\ \mathbf{J}_{\mathbf{Q}\theta} & \mathbf{J}_{\mathbf{QV}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta \\ \Delta \mathbf{V} \end{pmatrix} \qquad (۶ _ ۱۴)$$

که در آن:

$\Delta \mathbf{P}$ = تغییر نموی در توان حقیقی شین؛

$\Delta \mathbf{Q}$ = تغییر نموی در تزریق توان راکتیو شین؛

$\Delta\theta$ = تغییر نموی در زاویهٔ ولتاژ شین؛

$\Delta \mathbf{V}$ = تغییر نموی در دامنهٔ ولتاژ شین است.

عناصر ماتریس ژاکوبین، حساسیت بین توان انتقالی و تغییرات ولتاژ شین را می‌دهند.

اگر از مدل مرسوم پخش بار در تحلیل پایداری ولتاژ استفاده شود، ماتریس ژاکوبین در

معادلهٔ ۱۴ ـ ۶ همانند ماتریس به دست آمده در حل معادلات پخش بار با استفاده از روش نیوتون ـ رافسن در فصل ششم خواهد شد. با مدلهای تکامل یافته‌ترِ وسایل، که با معادلهٔ ۱۴ ـ ۴ نشان داده شده است، می‌توان رابطهٔ خطی بین توان و ولتاژ را برای هر وسیله هنگامی که $\dot{\mathbf{x}} = 0$ است، به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{P}_d \\ \Delta \mathbf{Q}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{V}_d \\ \Delta \theta_d \end{pmatrix} \qquad (۱۴ - ۷)$$

$\Delta \mathbf{P}_d$ = تغییر نموی در خروجی توان حقیقی وسیله؛

$\Delta \mathbf{Q}_d$ = تغییر نموی در خروجی توان راکتیو وسیله؛

$\Delta \mathbf{V}_d$ = تغییر نموی در دامنهٔ ولتاژ وسیله؛

$\Delta \theta_d$ = تغییر نموی در زاویهٔ ولتاژ وسیله است.

عناصر ماتریس ژاکوبینِ معادله ۱۴ ـ ۶ مربوط به هر وسیله با $\mathbf{A}_{11}$، $\mathbf{A}_{12}$، $\mathbf{A}_{21}$ و $\mathbf{A}_{22}$ اصلاح شده‌اند تا ماتریس ژاکوبین سیستم را تشکیل دهند.

پایداری ولتاژ سیستم، تحت تأثیر هر دو $\mathbf{P}$ و $\mathbf{Q}$ قرار دارد. لیکن، در هر نقطهٔ کار می‌توانیم $\mathbf{P}$ را ثابت نگه داریم و پایداری ولتاژ را با درنظر گرفتن رابطهٔ نموی بین $\mathbf{Q}$ و $\mathbf{V}$ ارزیابی کنیم. این موضوع، مشابه روش منحنی $\mathbf{Q}$ - $\mathbf{V}$ است. اگرچه تغییرات نموی $\mathbf{P}$ در فرموله کردن نادیده گرفته می‌شود، اما تغییراتِ بار سیستم با سطح انتقال توان با مطالعهٔ رابطه نموی بین $\mathbf{Q}$ و $\mathbf{V}$ در نقاط مختلف کار، در نظر گرفته می‌شود.

براساس ملاحظات بالا، در معادلهٔ ۱۴ ـ ۶، $\Delta \mathbf{P}$ را مساوی صفر می‌دهیم، درنتیجه:

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{J}_R \, \Delta \mathbf{V} \qquad (۱۴ - ۸)$$

که در آن داریم:

$$\mathbf{J}_R = [\mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta} \, \mathbf{J}_{P\theta}^{-1} \, \mathbf{J}_{PV}] \qquad (۱۴ - ۹)$$

که $\mathbf{J}_R$ ماتریس ژاکوبینِ کاهش یافتهٔ سیستم است. از معادلهٔ ۱۴ ـ ۸، می‌توان نوشت:

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{J}_R^{-1} \, \Delta \mathbf{Q} \qquad (۱۴ - ۱۰)$$

ماتریس $\mathbf{J}_R^{-1}$، ژاکوبین $\mathbf{Q}$ - $\mathbf{V}$ کاهش یافته است که اُمین عنصر قطری آن بیانگر حساسیت $\mathbf{Q}$ - $\mathbf{V}$ در شین اُم است. به منظور افزایش کاراییِ محاسباتی، این ماتریس به طور صریح تشکیل نمی‌شود و حساسیتهای $\mathbf{Q}$ - $\mathbf{V}$ با حل معادلهٔ ۱۴ ـ ۸ محاسبه می‌گردند.

حساسیت **Q - V** در یک شین، شیب منحنیِ **Q - V** را در نقطهٔ کار داده شده نمایش می‌دهد. مقدار مثبت حساسیت نشان‌دهندهٔ عملکرد پایدار است و هرچه حساسیت کوچکتر باشد، سیستم پایدارتر خواهد بود. با کاهش حساسیت، دامنهٔ حساسیت افزایش می‌یابد و مقدار آن در حد پایداری، نامحدود می‌شود. برعکس، مقدار منفی حساسیت، نشان‌دهندهٔ عملکرد ناپایدار است و حساسیت منفیِ کوچک، نشان‌دهنده عملکرد بسیار ناپایدار است. به دلیل ماهیت غیرخطی روابط **Q - V**، دامنهٔ حساسیتها برای شرایط مختلف سیستم، معیار مستقیمی برای بیان درجهٔ نسبی پایداری به دست نمی‌دهد.

ب) تحلیل مُدال Q-V [۱۵,۹]

مشخصه‌های پایداری ولتاژ سیستم را می‌توان با محاسبهٔ مقادیر و بردارهای ویژهٔ (فصل ۱۲، بخش ۱۲ ـ ۲ را ببینید) ماتریس ژاکوبینِ کاهش یافته $\mathbf{J_R}$ تعریف شده با معادلهٔ ۱۴ ـ ۹، شناسایی نمود. برای این کار می‌نویسیم:

$$\mathbf{J_R} = \xi \, \Lambda \, \eta \qquad (۱۱ - ۱۴)$$

که در آن:

ξ = ماتریس بردار ویژهٔ راست $\mathbf{J_R}$؛

η = ماتریس بردار ویژهٔ چپ $\mathbf{J_R}$؛

و Λ = ماتریس قطری مقدارهای ویژهٔ $\mathbf{J_R}$ است.

از معادلهٔ ۱۴ ـ ۱۱، می‌توان نوشت:

$$\mathbf{J_R}^{-1} = \xi \, \Lambda^{-1} \, \eta \qquad (۱۲ - ۱۴)$$

با جایگزینی در معادلهٔ ۱۴ ـ ۱۰ نتیجه می‌شود:

$$\Delta \mathbf{V} = \xi \, \Lambda^{-1} \, \eta \, \Delta \mathbf{Q} \qquad (۱۳ - ۱۴)$$

و یا:

$$\Delta \mathbf{V} = \sum_i \frac{\xi_i \, \eta_i}{\lambda_i} \Delta \mathbf{Q} \qquad (۱۴ - ۱۴)$$

که در آن ξ_i، اُمین ستون بردار ویژهٔ راست و η_i، اُمین ردیف بردار ویژهٔ چپِ $\mathbf{J_R}$ است.

هر مقدار ویژهٔ λ_i و بردارهای ویژهٔ راست و چپ متناظر با ξ_i و η_i، اُمین مُد پاسخ V-Q را تعریف می‌کنند.

از آنجا که $\eta = \xi^{-1}$ است، معادلهٔ ۱۴ ـ ۱۳ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\eta\,\Delta\mathbf{v} = \Lambda^{-1}\,\eta\,\Delta\mathbf{Q}$$

یا:

$$\mathbf{v} = \Lambda^{-1}\,\mathbf{q} \qquad (۱۵ - ۱۴)$$

که‌در آن

$\mathbf{v} = \eta\,\Delta\mathbf{v}$ بردار تغییرات ولتاژِ مُدال

و $\mathbf{q} = \eta\,\Delta\mathbf{Q}$ بردار تغییرات توان راکتیو مُدال است.

تفاوت بین معادله‌های ۱۴ ـ ۱۰ و ۱۴ ـ ۱۵ در آن است که ماتریس Λ^{-1}، ماتریسی قطری است، در صورتی که در حالت کلی، $\mathbf{J}_R^{-1}$ غیرقطری است. معادلهٔ ۱۴ ـ ۱۵ معادلات مرتبهٔ اول غیرتزویجی را نشان می‌دهد؛ بنابراین، برای اُمین مُد داریم:

$$\mathbf{v}_i = \frac{1}{\lambda_i}\mathbf{q}_i \qquad (۱۶ - ۱۴)$$

اگر $\lambda_i > 0$ باشد، اُمین ولتاژ مُدال و اُمین تغییرات توان راکتیو مُدال، هم‌جهت هستند که نشان‌دهندهٔ *پایداری* ولتاژ سیستم است. اگر $\lambda_i < 0$ باشد، اُمین ولتاژ مُدال و اُمین تغییر توان راکتیو مُدال در جهتهای مخالف هستند، که نشان‌دهندهٔ *ناپایداری* ولتاژ سیستم است. دامنهٔ هر تغییر ولتاژ مُدال مساوی با حاصل ضرب معکوس λ_i در دامنهٔ تغییر توان راکتیو مُدال است. می‌توان چنین استنباط کرد که دامنهٔ λ_i درجهٔ *پایداری* اُمین ولتاژ مُدال را تعیین می‌کند. هرچه دامنهٔ λ_iی مثبت کوچکتر باشد، اُمین ولتاژ مُدال به ناپایداری نزدیکتر می‌شود. هنگامی که $\lambda_i = 0$ باشد، به این علت که هر تغییر در آن توان راکتیو مُدال، موجب تغییر نامحدودی در ولتاژ مُدال می‌شود، اُمین ولتاژ مُدال از هم فرو می‌پاشد.

اکنون رابطهٔ بین حساسیتهای V-Q شین و مقادیر ویژهٔ $\mathbf{J}_R$ را بررسی می‌کنیم. برای این کار، در معادله ۱۴ ـ ۱۴، قرار می‌دهیم، $\Delta\mathbf{Q} = \mathbf{e}_K$، که در آن کلیهٔ عناصر $\mathbf{e}_K$ به جز Kاُمین عنصر که برابر ۱ است، صفر هستند. پس:

$$\Delta\mathbf{v} = \sum_i \frac{\eta_{ik}\,\xi_i}{\lambda_i}$$

که در آن η_{ik}، kاُمین عنصر η_i است.

حساسیت Q - V در شین kاُم به صورت زیر داده می‌شود:

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} = \sum_i \frac{\xi_{ki}\,\eta_{ik}}{\lambda_i} \qquad (۱۷ - ۱۴)$$

از معادلهٔ بالا مشاهده می‌کنیم که حساسیتهای Q - V نمی‌توانند مُدهای منفرد فروپاشی ولتاژ را شناسایی کنند و به جای آن، اطلاعاتی راجع به اثر ترکیبی کلیهٔ مُدهای تغییرات توان راکتیو ولتاژ فراهم می‌کنند.

اگر از مقاومتهای شبکهٔ انتقال صرف‌نظر شود و ماتریس ادمیتانس گره Y_n متقارن باشد، ماتریس ژاکوبین کاهش یافته J_R نیز متقارن خواهد بود [۱۵]. و در این صورت ماتریس مقادیر و بردارهای ویژهٔ J_R هم حقیقی می‌باشند. بعلاوه، بردار ویژهٔ راست و بردار ویژهٔ چپ متناظر با هر مقدار ویژهٔ J_R، حقیقی می‌باشند.

با ترانسفورمرهای تغییر دهندهٔ فاز (که ماتریس Y_n را غیرمتقارن می‌کنند) و مقاومتهای خط، J_R فقط تقریباً متقارن است، اما مقادیر ویژهٔ J_R برای کلیهٔ اهداف عملی، حقیقی می‌باشند.

دامنهٔ مقادیر ویژه می‌تواند معیاری نسبی از نزدیکی به ناپایداری را ارائه دهد. گرچه باید اذعان داشت به علت غیرخطی بودن مسأله، مقادیر ویژه معیار مطلقی را ارائه نمی‌دهند. حالت مشابهی در تحلیل پایداری (زاویه) سیگنال کوچک رخ می‌دهد، که نشانه‌ای از درجهٔ میرایی است ولی معیار مطلقی از حاشیهٔ پایداری نمی‌باشد. اگر مطلوب، محاسبهٔ فاصله برحسب مگاوات تا ناپایداری ولتاژ باشد، سیستم به طور نموی تحت بار قرار می‌گیرد تا ناپایدار شود و تحلیل مُدال در هر نقطهٔ کار اعمال می‌گردد. بکارگیری تحلیل مُدال به تعیین میزان پایداری سیستم و نیز تعیین مقدار بار اضافه یا سطح انتقال توان که باید اضافه شود، کمک می‌کند. هنگامی که سیستم به نقطهٔ بحرانیِ پایداری ولتاژ می‌رسد، تحلیل مُدال در شناسایی نواحی بحرانی پایداری ولتاژ و عناصری که در هر مُد مشارکت دارند، مفید است.

مثال ۱۴ - ۳

برای سیستم خط ۵۰۰ KV، ۳۲۲ Km درنظر گرفته شده در مثال ۱۴ - ۱، معادلات پخش بار از طرف فرستنده به گیرنده را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$P = f(\theta, V)$$

$$Q = g(\theta, V)$$

عبارات را برای $J_{P\theta}$، J_{PV}، $J_{Q\theta}$ و J_{QV} تعریف شده با معادلات پخش بارِ خطی شده،

پیدا کنید:

$$\begin{pmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}J_{P\theta} & J_{PV}\\ J_{Q\theta} & J_{QV}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\theta\\ \Delta V\end{pmatrix}$$

الف) هنگامی که $P_2 = ۱۵۰۰$ MW است، مقادیر ویژهٔ ماتریس ژاکوبین Q - V ی کاهش یافته و حساسیتهای Q - V را با تزریق توان راکتیو مختلف زیر برای هر یک از دو ولتاژ متناظر بر روی منحنی Q - V محاسبه کنید:

۱. $Q_1 = ۵۰۰$ MVAr؛

۲. $Q_1 = ۴۰۰$ MVAr؛

۳. مقادیر Q_1 در نزدیکی بخش پایینی منحنی Q - V.

فرض کنید که به منظور تحلیل، منابع توان راکتیو و بار، مشخصه‌های P , Q ثابت دارند.

ب) پایداری ولتاژ را با محاسبهٔ مقادیر ویژهٔ ماتریس ژاکوبینِ Q - V ی کاهش یافته برای حالتهای زیر، تعیین کنید:

۱. $P = ۱۵۰۰$ MV، $Q_1 = ۴۵۰$ MVAr؛

۲. $P = ۱۹۰۰$ MV، $Q_1 = ۹۵۰$ MVAr.

فرض کنید که توان راکتیو Q_1، به وسیلهٔ یک خازن شنت فراهم شده است.

حل

از شکل ۱۴ ـ ۱ م «ب»، ماتریس ادمیتانس سیستم دوشینه عبارت است از:

$$Y = \begin{bmatrix} ۲/۱۴۲ - j\,۲۲/۸۹۷ & -۲/۱۴۲ + j\,۲۴/۹۷۳ \\ -۲/۱۴۲ + j\,۲۴/۹۷۳ & ۲/۱۴۲ - j\,۲۲/۸۹۷ \end{bmatrix} \qquad (۱۴ ـ ۱ م)$$

از معادلهٔ ۶ ـ ۱۰۱ فصل ششم، عبارت P و Q در شین kاُم به صورت زیر داده می‌شوند:

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \sum_{m=1}^{n} (G_{km} V_m \cos\theta_{km} + B_{km} V_m \sin\theta_{km}) \\ Q_k &= V_k \sum_{m=1}^{n} (G_{km} V_m \sin\theta_{km} - B_{km} V_m \cos\theta_{km}) \end{aligned} \qquad (۱۴ ـ ۲ م)$$

که در آن: $\theta_{KM} = \theta_K - \theta_M$ است.

برای سیستم دوشینه، داریم:

$$
\begin{aligned}
P_1 &= V_1[(۲/۱۴۲V_1 \cos\theta_{11} - ۲۲/۸۹۷ V_1 \sin\theta_{11}) + \\
&\quad (-۲/۱۴۲ V_2\cos\theta_{12} + ۲۴/۹۷۳ V_2 \sin\theta_{12})] \\
P_2 &= V_2[(-۲/۱۴۲ V_1 \cos\theta_{21} + ۲۴/۹۷۳ V_1 \sin\theta_{21}) + \\
&\quad (۲/۱۴۲ V_2 \cos\theta_{22} - ۲۲/۸۹۷ V_2 \sin\theta_{22})] \\
Q_1 &= V_1[(۲/۱۴۲ V_1 \sin\theta_{11} + ۲۲/۸۹۷ V_1 \cos\theta_{11}) + \\
&\quad (-۲/۱۴۲ V_2 \sin\theta_{12} - ۲۴/۹۷۳ V_2 \cos\theta_{12})] \\
Q_2 &= V_2[(-۲/۱۴۲ V_1 \sin\theta_{21} - ۲۴/۹۷۳ V_1 \cos\theta_{21}) + \\
&\quad (۲/۱۴۲ V_2 \sin\theta_{22} + ۲۲/۸۹۷ V_2 \cos\theta_{22})]
\end{aligned}
\qquad (۱۴ - ۳ م)
$$

که در آن

$$\theta_{21} = -\theta_{12} = ۰ \quad و \quad \theta_{11} = \theta_{22} = ۰$$

پارامترهای موردنظر، P_2 و Q_2 هستند. با $V_1 = ۱/۰$، می‌توان نوشت:

$$
\begin{aligned}
P_2 &= -۲/۱۴۲ V_2 \cos\theta + ۲۴/۹۷۳ V_2 \sin\theta + ۲/۱۴۲ V_2^2 \\
Q_2 &= -۲/۱۴۲ V_2 \sin\theta - ۲۴/۹۷۳ V_2 \cos\theta + ۲۲/۸۹۷ V_2^2
\end{aligned}
$$

از این‌رو روابط عبارات ژاکوبین به صورت زیر داده می‌شود:

$$
\begin{aligned}
J_{P\theta} &= \frac{\partial P_2}{\partial \theta} = ۲/۱۴۲ V_2 \sin\theta + ۲۴/۹۷۳ V_2 \cos\theta \\
J_{PV} &= \frac{\partial P_2}{\partial V_2} = -۲/۱۴۲ \cos\theta + ۲۴/۹۷۳ \sin\theta + ۴/۲۸۴ V_2 \\
J_{Q\theta} &= \frac{\partial Q_2}{\partial \theta} = -۲/۱۴۲ V_2 \cos\theta + ۲۴/۹۷۳ V_2 \sin\theta \\
J_{QV} &= \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = -۲/۱۴۲ \sin\theta - ۲۴/۹۷۳ \cos\theta + ۴۵/۷۹۴ V_2
\end{aligned}
\qquad (۱۴ - ۴ م)
$$

الف) معادلات خطی شدهٔ پخش بار عبارتند از:

$$
\begin{aligned}
\Delta P_2 &= J_{P\theta} \Delta\theta + J_{PV} \Delta V_2 \\
\Delta Q_2 &= J_{Q\theta} \Delta\theta + J_{QV} \Delta V_2
\end{aligned}
\qquad (۱۴ - ۵ م)
$$

با $\Delta P_2 = 0$، داریم:

$$\Delta Q_2 = (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \Delta V_2$$

یا:

$$\Delta Q_2 = J_R \Delta V_2$$

که در آن:

$$J_R = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}$$

روابطِ J_{QV}، $J_{Q\theta}$، $J_{P\theta}$ و J_{PV} با معادلهٔ ۱۴ ـ ۴ م داده می‌شوند. برای این سیستم ساده، J_R یک ماتریس ۱ × ۱ است و مقدار ویژهٔ ماتریس (λ) همان عنصر ماتریس است. حساسیت Q - V مساوی با عکس مقدار ویژه می‌باشد.

برای هر مقدار Q_1، دو پاسخ برای ولتاژ طرف گیرنده وجود دارد. جدول ۱۴ ـ ۱ م مقادیر V، θ، λ و dV/dQ با P = ۱۵۰۰ MW و ۳۰۵/۹ MVAr و ۳۰۶ و ۴۰۰ و Q = ۵۰۰ را نشان می‌دهد. برای هر حالت، مقدار ویژه و حساسیت V - Q هر دو در پاسخِ ولتاژ پایین منفی و در پاسخ ولتاژ بالا مثبت هستند. با Q = ۳۰۵/۹ MVAr (نزدیک به بخش پایینی منحنی Q - V) dV/dQ بزرگ و λ بسیار کوچک است.

جدول ۱۴ ـ ۱ م

Q_1 (MVAr)	پاسخ ولتاژ بالا				پاسخ ولتاژ پایین			
	V_2	θ	λ	dV/dQ	V_2	θ	λ	dV/dQ
۵۰۰/۰	۱/۰۲۴	−۳۷/۳°	۱۷/۰۳	۰/۰۵۹	۰/۶۷۱	−۶۶/۷°	−۳۹/۸۷	−۰/۰۲۵
۴۰۰/۰	۰/۹۵۶	−۴۰/۱°	۱۲/۴۱	۰/۰۸۱	۰/۷۰۶	−۶۰/۳°	−۲۰/۹۶	−۰/۰۴۸
۳۰۶/۰	۰/۸۲۰	−۴۸/۲°	۰/۵۲	۱/۹۲۳	۰/۸۱۲	−۴۸/۸°	−۰/۹۵	−۱/۰۵۵
۳۰۵/۹	۰/۸۱۴	−۴۸/۷°	۰/۰۲	۵۰/۱	۰/۸۱۵	−۴۸/۶°	−۰/۷۰	−۱/۴۳۴

ب) با یک خازن شنت متصل شده در طرف گیرنده، مقدار خودالقا برابر است با:

$$Y_{22} = 2/142 - j(22/897 - B_c)$$

۱. با P = ۱۵۰۰ MW و یک خازن شنت ۴۵۰ MVAr، داریم:

$$V_2 = 0/981 \qquad \theta = -39/1^\circ$$

از آنجا که B_c = ۴/۵ pu است، لذا:

$$Y_{۲۲} = ۲/۱۴۲ - j\,(۲۲/۸۹۷ - ۴/۵) = ۲/۱۴۲ - j\,۱۸/۳۹۷$$

با این مقدارِ جدید $Y_{۲۲}$، ماتریس ژاکوبین Q-V ی کاهش یافته، محاسبه شده با معادلهٔ ۱۴ ـ ۴ م عبارت است از:

$$J_R = ۵/۳۴۸$$

ملاحظه می‌شود که J_R، مثبت است که نشان‌دهندهٔ پایداری ولتاژ سیستم می‌باشد.

۲. با P = ۱۹۰۰ MW و یک خازن شنت ۹۵۰ MVAr، داریم:

$$V_۲ = ۰/۹۹۵ \qquad \theta_۲ = -۵۲/۹۷^\circ$$

از آنجا که B_c = ۹/۵ pu است، می‌توان نوشت:

$$Y_{۲۲} = ۲/۱۴۲ - j\,(۲۲/۸۹۷ - ۹/۵) = ۲/۱۴۲ - j\,۱/۳۹۷$$

و ماتریس ژاکوبین Q-V ی کاهش یافته، محاسبه شده با معادلهٔ ۱۴ ـ ۴ م عبارت است از:

$$J_R = -۱۳/۶۸۳$$

ملاحظه می‌شود که J_R منفی است، که نشان‌دهندهٔ ناپایداری ولتاژ سیستم می‌باشد.

ضرایب مشارکت شین

مشارکت نسبی شین k در مود i توسط *ضرایب مشارکت شین*[1] داده می‌شود:

$$P_{ki} = \xi_{ki}\,\eta_{ik} \qquad (۱۸ - ۱۴)$$

ازمعادلهٔ ۱۴ـ۱۷ مشاهده‌می‌کنیم‌که P_{ki} سهم λ_i را درحساسیت $V - Q$ در شین kاُم تعیین‌می‌کند.

ضرایب مشارکت شین، ناحیه‌های مربوط به هر مُد را تعیین می‌کنند. مجموع ضرایب مشارکت شین برای هر مُد برابر واحد است زیرا بردارهای ویژهٔ راست و چپ نرمالیزه شده‌اند. اندازهٔ مشارکت شین در هر مُد، میزان مؤثر بودن اقدامات انجام شده در آن شین را برای پایدارسازی مُد نشان می‌دهد.

1. Bus Participation Factor

در حالت کلی دو نوع مُد وجود دارد: اولین نوع دارای تعداد اندکی شین با مشارکتهای بزرگ و تعدادی شین با مشارکتهای نزدیک صفر است. که نشان‌دهندهٔ آن است که مُد، بسیار محلی است. دومین نوع، دارای شینهای بسیاری با مشارکتهای کوچک ولی درجه‌های مشابه است و سایر شینها مشارکتهای نزدیک به صفر دارند که نشان‌دهندهٔ آن است که مُد، محلی نمی‌باشد. اگر یک شین بار منفرد از طریق یک خط انتقال طولانی به شبکهٔ بسیار قوی‌ای وصل شده باشد، یک مُد نوعی محلی پدید می‌آید. یک مُد نوعی غیر محلی هنگامی ظاهر می‌شود که ناحیه‌ای در داخل یک سیستم بزرگ، بارگذاریِ سنگین شده باشد و منابع اصلی توان راکتیو برای این ناحیه مصرف شده باشد.

محاسبهٔ کلیهٔ مقادیر ویژهٔ $\mathbf{J}_R$، برای سیستمی عملی با چندین هزار شین، غیر عملی و غیر ضروری است. از طرف دیگر، محاسبهٔ مقدار ویژهٔ حداقل $\mathbf{J}_R$ بتنهایی کافی نیست، زیرا معمولاً بیش از یک مُد ضعیف متناظر با قسمتهای مختلف سیستم وجود دارد و ممکن است زمانی که سیستم تحت تنش قرار می‌گیرد مُد مربوط به مقدار ویژهٔ حداقل، مشکل سازترین مُد نباشد. در عمل، بندرت لازم است که بیش از ۵ تا ۱۰ تا از کوچکترین مقادیر ویژه برای شناسایی کلیهٔ مُدهای بحرانی محاسبه شوند.

ضرایب مشارکت شاخه

ضرایب مشارکت شاخهٔ وابسته به مُد iاُم را با فرض صفر بودن کلیهٔ عناصر بردار تغییرات توان راکتیو مُدال $\mathbf{q}$ به جز iامین آنها که برابر ۱ فرض می‌شود، محاسبه می‌کنیم. برای این کار، از معادلهٔ ۱۴ ـ ۱۵، بردار متناظر تغییرات توان راکتیو شین عبارت است از:

$$\Delta\mathbf{Q}^{(i)} = \eta^{-1}\,\mathbf{q} = \xi\,\mathbf{q} = \xi_i \qquad (۱۹ - ۱۴)$$

که در آن ξ_i، iاُمین بردار ویژهٔ راست $\mathbf{J}_R$ است. همچنین فرض می‌کنیم کلیهٔ بردارهای ویژهٔ راست، نرمالیزه شده‌اند و لذا:

$$\sum_j \xi_{ji}^2 = 1 \qquad (۲۰ - ۱۴)$$

با بردار تغییرات توان راکتیو مساوی با $\Delta\mathbf{Q}^{(i)}$، بردار تغییرات ولتاژ، $\Delta\mathbf{V}^{(i)}$، عبارت است از:

$$\Delta\mathbf{V}^{(i)} = \frac{1}{\lambda_i}\,\Delta\mathbf{Q}^{(i)} \qquad (۲۱ - ۱۴)$$

و بردار متناظر تغییر زاویهٔ شین برابر است با:

$$\Delta\theta^{(i)} = -\mathbf{J}_{P\theta}^{-1}\ \mathbf{J}_{PV}\,\Delta\,\mathbf{V}^{(i)} \qquad (۲۲-۱۴)$$

با تغییرات معلوم زاویه و ولتاژ برای هر دو طرف فرستنده و گیرنده، می‌توان تغییر خطی شده در تلفات راکتیو شاخه را محاسبه کرد.

مشارکت نسبی شاخهٔ ژاُم در مُد اُام با ضریب مشارکت شاخه داده می‌شود:

$$P_{ji} = \frac{\text{تلفات } \Delta Q \text{ برای شاخهٔ ژاُم}}{\text{حداکثر تلفات } \Delta Q \text{ برای کلیهٔ شاخه‌ها}} \qquad (۲۳-۱۴)$$

ضرایب مشارکت شاخه، نشان می‌دهد که برای هر مُد کدامین شاخه، بیشترین توان راکتیو را در پاسخ به تغییر نمویِ بار راکتیو مصرف می‌کند. شاخه‌های با مشارکتهای بالا یا دارای ارتباطات ضعیفی هستند و یا بشدت بارگذاری شده‌اند. ضرایب مشارکت شاخه‌ها، برای شناسایی تدابیر کمکی در کاهش مسائلِ پایداریِ ولتاژ و نیز برای انتخاب پیشامد، سودمند هستند.

ضرایب مشارکت ژنراتور

همانند حالت مشارکت شاخه، برای تغییر توان راکتیو معلوم، تغییرات ولتاژ و زاویه در هر پایانهٔ ماشین تعیین می‌شوند و از این پارامترها برای محاسبهٔ تغییر در خروجی توان راکتیو برای هر ماشین استفاده می‌شود.

مشارکت نسبی ماشین m در مُد اُام با ضریب مشارکت ژنراتور داده می‌شود:

$$P_{mi} = \frac{\Delta Q_m \text{ برای ماشین } m}{\text{حداکثر } \Delta Q \text{ برای کلیهٔ ماشینها}} \qquad (۲۴-۱۴)$$

ضرایب مشارکت ژنراتور نشان می‌دهند که برای هر مُد، کدامین ژنراتور بیشترین توان راکتیو را در پاسخ به تغییر نموی در بارگذاریِ راکتیو سیستم، فراهم می‌آورد. مشارکتهای ژنراتور، اطلاعات مهمی را دربارهٔ توزیع مناسب ذخیره‌های راکتیو بین کلیهٔ ماشینها، به‌منظور حفظ حاشیهٔ پایداری ولتاژ، به دست می‌دهد.

محاسبهٔ مقادیر ویژهٔ کوچک [۱۵، ۱۹]. چندین روش برای محاسبهٔ زیر مجموعه‌ای منتخب از مقادیر ویژهٔ یک ماتریس حقیقی وجود دارد [۱۶ - ۱۸]. در برنامه EPRI VSTAB [۱۹]، از یک روش تکراری همزمان کوتاه و بلند معکوس ضمنی استفاده شده است. این روش، ترکیبی از روشهای *تکرار همزان کوتاه و بلند* (LOPSI) و *تکرار معکوس ضمنی* (IMPII) می‌باشد.

الگوریتم LOPSI

روشهای تکرار همزمان، برای به دست آوردن مقادیر ویژهٔ غالب و بردارهای ویژهٔ ماتریسهای غیر متقارنِ حقیقی سودمند هستند. این روشها، پاسخ ویژهٔ دقیقی از یک ماتریس تکرار کوچکتر در هر سیکل تکرار را شامل می‌شوند، بُعد این ماتریس به تعداد بردارهایی که به طور همزمان پردازش می‌شوند، بستگی دارد. از فرایند دو تکرار برای به دست آوردن بردارهای ویژهٔ چپ و راست به طور همزمان استفاده می‌شود. از فرایند تکرار کوتاه و بلند برای به دست آوردن تنها یک مجموعه از بردارهای ویژه و یا برای به دست آوردن بردارهای ویژهٔ راست و چپ به طور ترتیبی استفاده می‌گردد. شرح تفصیلیِ روش تکرار همزمان را می‌توان در مرجع ۱۶ پیدا کرد.

در اینجا به اختصار، روش اعمال الگوریتم LOPSI را برای محاسبهٔ مجموعه‌ای از مقادیر ویژهٔ غالب و بردارهای ویژهٔ متناظر با ماتریس حقیقیِ **A** توضیح می‌دهیم. می‌توان با اعمال همین روش به $\mathbf{A}^T$ مقادیر ویژهٔ غالب و بردارهای ویژهٔ چپ متناظر را نیز به دست آورد.

هر سیکل تکرار الگوریتم LOPSI در برگیرندهٔ عملیات پیش ضرب و باز جهت‌یابی[1] و به دنبال آن نرمالیزه کردن و آزمون همگرایی است. فرض کنید **A** یک ماتریس نامتقارن حقیقی از مرتبهٔ n باشد که می‌خواهیم r مقادیر ویژهٔ غالب و بردارهای ویژهٔ راست متناظر با آنها را محاسبه کنیم. یک مجموعه از بردارهای آزمایشی $\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1\ \mathbf{R}_2 \dots \mathbf{R}_r]$ را در نظر بگیرید و فرض کنید این بردارها به گونه‌ای نرمالیزه شده‌اند که حداکثر اندازهٔ عنصر هر ستون **R**، ۱ می‌باشد. باپیش‌ضرب‌کردن **R** توسط **A** و نمایش‌مجموعهٔ بردارهای حاصل با $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1\ \mathbf{S}_2 \dots \mathbf{S}_r]$، داریم:

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}\,\mathbf{R} \qquad (۲۵-۱۴)$$

فرض کنید $\Lambda = [\Lambda_a \mid \Lambda_b] = \mathrm{diag}\,[\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_r \mid \lambda_{r+1} \dots \lambda_n]$، یک ماتریس قطری از مقادیر ویژهٔ **A** باشد که مقادیر ویژه، به صورت نزولی (نسبت به قدر مطلق دامنه) مرتب شده‌اند، و $\Phi = [\Phi_a \mid \Phi_b] = [\phi_1 \phi_2 \dots \phi_r \mid \phi_{r+1} \dots \phi_n]$ ماتریس بردارهای ویژهٔ راست متناظر با **A** باشد، به گونه‌ای که:

$$\mathbf{A}\,\Phi_a = \Phi_a \Lambda_a$$

و:

$$\mathbf{A}\,\Phi_b = \Phi_b \Lambda_b \qquad (۲۶-۱۴)$$

بردارهای آزمایشی **R** را می‌توان به صورت ترکیبی خطی از مجموعهٔ کامل بردارهای ویژه،

1. Reorientation

نمایش داد:

$$\mathbf{R} = \Phi_a \mathbf{C}_a + \Phi_b \mathbf{C}_b \qquad (۲۷ - ۱۴)$$

که در آن $\mathbf{C}_a$ و $\mathbf{C}_b$ به ترتیب ماتریسهای ضرایب با اندازهٔ $r \times r$ و $(n - r) \times r$، هستند. از معادلات ۱۴ ـ ۲۵ تا ۱۴ ـ ۲۷ نتیجه می‌شود:

$$\mathbf{S} = \Phi_a \Lambda_a \mathbf{C}_a + \Phi_b \Lambda_b \mathbf{C}_b \qquad (۲۸ - ۱۴)$$

سهم بردارهای ویژهٔ پایین‌تر در $\mathbf{S}$، به طور نسبی کمتر از سهم آنها در $\mathbf{R}$ است. پس از تعدادی تکرار، به واسطهٔ فرایند محو تکرارهای قبلی، ضرایب $\mathbf{C}_b$ بسیار کوچکتر از ضرایب $\mathbf{C}_a$ خواهند بود.

فرایند باز جهت‌یابی، پاسخ ویژهٔ کامل ماتریس تکرار $r \times r$ مربوط به $\mathbf{B}$ را که از معادلهٔ زیر به دست می‌آید، در بر می‌گیرد:

$$\mathbf{G}\mathbf{B} = \mathbf{H} \qquad (۲۹ - ۱۴)$$

که در آن $\mathbf{G} = \mathbf{R}^T \mathbf{R}$ و $\mathbf{H} = \mathbf{R}^T \mathbf{S}$ است.

با جایگزینی مقادیر $\mathbf{R}$ و $\mathbf{S}$ داده شده با معادلات ۱۴ ـ ۲۷ و ۱۴ ـ ۲۸ و فرض آنکه ضرایب $\mathbf{C}_b$ در مقایسه با ضرایب $\mathbf{C}_a$ قابل صرفنظرکردن هستند، می‌توان نشان داد:

$$\mathbf{R}^T \Phi_a \mathbf{C}_a \mathbf{B} \approx \mathbf{R}^T \Phi_a \Lambda_a \mathbf{C}_a \qquad (۳۰ - ۱۴)$$

اگر $\mathbf{R}^T \Phi_a$ غیر منفرد باشد، داریم:

$$\mathbf{C}_a \mathbf{B} \approx \Lambda_a \mathbf{C}_a \qquad (۳۱ - ۱۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که ماتریس بردارهای ویژهٔ چپ $\mathbf{B}$ تقریبی از $\mathbf{C}_a$ و مقادیر ویژهٔ $\mathbf{B}$ تقریبی از Λ_a است. اگر $\mathbf{T}$ ماتریس $r \times r$ مربوط به بردارهای ویژهٔ راست $\mathbf{B}$ باشد، آنگاه:

$$\mathbf{T} \approx \mathbf{C}_a^{-1} \qquad (۳۲ - ۱۴)$$

از این رو، مجموعهٔ بردارهای به دست آمده به وسیلهٔ ضرب زیر:

$$\mathbf{W} = \mathbf{S}\mathbf{T} = \Phi_a \Lambda_a + \Phi_b \Lambda_b \mathbf{C}_b \mathbf{C}_a^{-1} \qquad (۳۳ - ۱۴)$$

مجموعه‌ای اصلاح شده از بردارهای ویژهٔ راست را می‌دهد.

بردارهای ستونیِ ماتریس **W**، به گونه‌ای نرمالیزه می‌شوند که بزرگترین عنصر هر بردار ۱ باشد. علاوه بر این **W** با بردارهای ستونیِ نرمالیزه شده به وسیلهٔ $\mathbf{W}^*$ نمایش داده می‌شود.

اینک تعریف می‌کنیم، $\Delta\mathbf{R} = |\mathbf{R}^i - \mathbf{R}^{i-1}|$، که $\mathbf{R}^i$ و $\mathbf{R}^{i-1}$ به ترتیب بردارهای ویژهٔ حاصل از تکرار iاُم و (i − ۱)اُم است، تا هنگامی که بزرگترین عنصر $\Delta\mathbf{R}$ کمتر از خطای معلومی شود، فرایند تکرار ادامه می‌یابد.

به طور خلاصه، گامهای روش LOPSI برای محاسبهٔ r مقادیر ویژهٔ غالب و بردارهای ویژهٔ راستِ متناظر، به شرح ذیل است:

الف) r بردار آزمایشی اولیه $\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1\ \mathbf{R}_2 \ldots \mathbf{R}_r]$ را انتخاب کنید،

ب) **A** را در **R** پیش ضرب کنید: $\mathbf{S} = \mathbf{A}\,\mathbf{R}$،

ج) $\mathbf{G} = \mathbf{R}^T\mathbf{R}$، $\mathbf{H} = \mathbf{R}^T\mathbf{S}$ را تعیین نمایید،

د) با حل $\mathbf{GB} = \mathbf{H}$، **B** را به دست آورید،

ه) پاسخ ویژهٔ کامل **B** را تعیین کنید،

و) $\mathbf{W} = \mathbf{ST}$ را تعیین کنید، که در آن **T** ماتریس بردار ویژهٔ راست **B** است،

ز) قرار دهید $\mathbf{R} = \mathbf{W}^*$، که در آن $\mathbf{W}^*$، ماتریس نرمالیزه شدهٔ **W** است به گونه‌ای که بزرگترین عنصر کلیهٔ بردارها ۱ است،

ح) همگرایی را بیازمایید؛ اگر همگرا شده است، توقف کنید. در غیر این صورت، به گام ب باز گردید.

در بین تمامی r بردار ویژه، آنهایی نخست همگرا می‌شوند که اندازهٔ مقادیر ویژهٔ متناظرشان بزرگتر باشد. بنابراین، اگر (j − ۱) بردار، آزمون همگرایی را برآورده سازند، این بردارها قفل شده، تکرار فقط با بردارهای باقیمانده از r بردار، ادامه می‌یابد. این روش قفل کردن موجب صرفه‌جویی در زمان محاسبات می‌شود.

همگرایی الگوریتم LOPSI به‌مقدار $|\lambda_r/\lambda_{r+1}|$ بستگی دارد. اگر m مقدار ویژهٔ غالب، لازم باشد، پیشنهاد می‌شود با وارد کردن تعدادی بردار محافظ اضافی، r بزرگتر از m گردد. این کار نه تنها وقوع همگرایی سریع مقادیر ویژه و بردارهای ویژهٔ لازم را ممکن می‌سازد بلکه تضمین می‌کند که بروز مقادیر ویژهٔ مختلط مزدوج در موقعیتهای λ_m و λ_{m+1} نتیجهٔ خاصی نداشته باشد.

الگوریتم IILSI

دوباره به مسألهٔ پاسخ ویژهٔ $\mathbf{J}_R$ باز می‌گردیم. از آنجا که به مقادیر ویژه‌ای با کوچکترین اندازه که متناظر با بزرگترین مقدارهای ویژه $\mathbf{J}_R^{-1}$ هستند علاقه‌مندیم، لذا الگوریتم LOPSI باید به $\mathbf{J}_R^{-1}$

اعمال شود. در هر تکرار، عمل پیش ضرب کردن به شکل زیر است:

$$\mathbf{S} = \mathbf{J}_R^{-1}\mathbf{R} \qquad (۳۴ - ۱۴)$$

بدین ترتیب الگوریتم LOPSI، به الگوریتم LOPSIی معکوس، تبدیل می‌شود.

حل مستقیم معادلهٔ ۱۴ ـ ۳۴ مستلزم عملیاتی ماتریسی روی $\mathbf{J}_R$ است. باید توجه کرد که $\mathbf{J}_R = \mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta}\mathbf{J}_{P\theta}^{-1}\mathbf{J}_{PV}$ است، اما به واسطهٔ کاهش، پراکنده نمی‌باشد. برای استفادهٔ کامل از ویژگی پراکندگی ماتریس ژاکوبین، $\mathbf{S}$ در ماتریس ۱۴ ـ ۳۴، با حل مجموعه معادلات خطی پراکندهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{Z} \\ \mathbf{S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{R} \end{pmatrix} \qquad (۳۵ - ۱۴)$$

بسادگی می‌توان نشان داد که $\mathbf{S}$ به دست آمده از حل معادلهٔ ۱۴ ـ ۳۵ همانند $\mathbf{S}$ داده شده در معادلهٔ ۱۴ ـ ۳۴ است. چون معادلهٔ ۱۴ ـ ۳۴ به طور ضمنی با حل معادلهٔ ۱۴ ـ ۳۵ حل می‌شود، الگوریتم LOPSIی معکوس به *الگوریتم تکرار همزمان کوتاه و بلند معکوس ضمنی* (IILSI) تبدیل می‌شود.

الگوریتم IILSI برای محاسبهٔ کوچکترین مقادیر ویژه و بردارهای ویژهٔ راست و چپ متناظر، به نوبت به $\mathbf{J}_R$ و $\mathbf{J}_R^{-1}$، اعمال می‌شود.

نمایش تحلیل مُدال

برای نمایش کاربرد تحلیل مُدال، سیستم ۳۹ شینه و ۱۰ ماشینهٔ شکل ۱۴ ـ ۳ را در نظر بگیرید. در بخش ۱۴ ـ ۱ ـ ۱، مشخصه‌های V−P و Q−V این سیستم را به دست آوردیم (شکلهای ۱۴ ـ ۴ و ۱۴ ـ ۵ را ببینید). در اینجا تحلیل مُدال را در سه وضعیت کاری (متناظر با نقاط A، B و C بر روی منحنی V − P شکل ۱۴ ـ ۴)، انجام می‌دهیم.

جدول ۱۴ ـ ۱ پنج مقدار ویژهٔ کوچکترِ $\mathbf{J}_R$ را در هر یک از سه نقطهٔ کار ارائه می‌کند. مشاهده می‌کنیم که با میل سیستم به سمت ناپایداری، دامنهٔ مقادیر ویژه، کاهش می‌یابد. در نقطهٔ کار C، کوچکترین مقدار ویژه ۰/۰۰۸۳ می‌باشد، که نشان می‌دهد سیستم در مرز ناپایداری قرار دارد.

جدول ۱۴ ـ ۱ پنج مقدار ویژهٔ کوچکتر ماتریس J_R

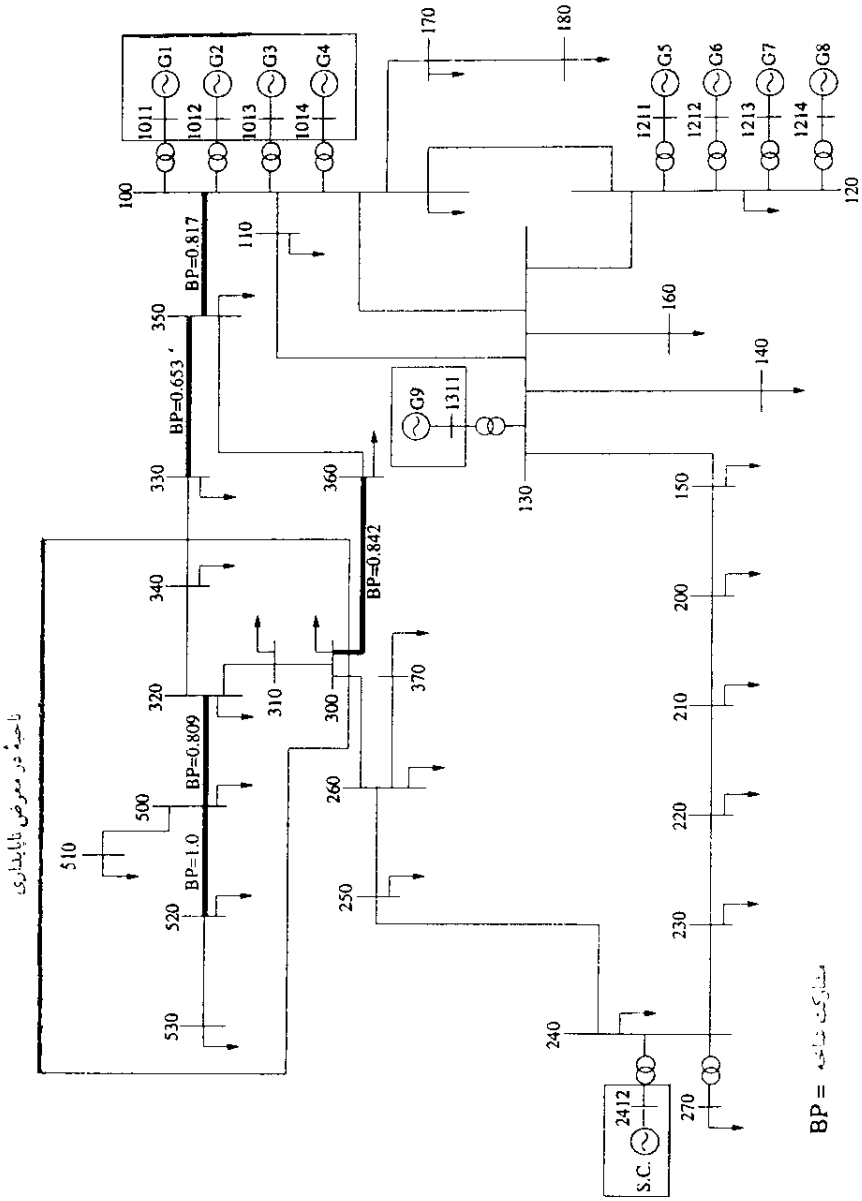
نقطهٔ کار	A	B	C
λ_1	۰/۳۸۶۷	۰/۱۴۴۶	۰/۰۰۸۳
λ_2	۱/۰۲۷۱	۰/۵۵۵۰	۰/۳۲۰۹
λ_3	۲/۴۰۴۹	۱/۵۱۳۳	۰/۹۳۳۴
λ_4	۴/۱۰۳۱	۲/۶۲۸۰	۱/۸۷۵۷
λ_5	۴/۲۶۹۹	۳/۰۲۰۹	۲/۳۳۷۳

جدول ۱۴ ـ ۲ مشارکتهای شین، شاخه و ژنراتور را برای مُد با کمترین درجهٔ پایداری (λ = ۰/۰۰۸۳) در نقطهٔ کار C ارائه می‌کند. شکل ۱۴ ـ ۷، ناحیهٔ در معرض ناپایداری ولتاژ (براساس مشارکتهای شین) و شاخه‌های با مشارکتهای بالاتر را در مُدی که حداقل میزان پایداری را دارد، شناسایی می‌کند

جدول ۱۴ ـ ۲ مشارکتهای شین، شاخه، و ژنراتور در مُدی که حداقل میزان پایداری را داراست (برای نقطهٔ کار C)

مشارکت شین		مشارکت شاخه		مشارکت ژنراتور	
شین	مشارکت	شاخه	مشارکت	شین	مشارکت
۵۳۰	۰/۲۶۳۸	۵۲۰ ـ ۵۰۰	۱/۰۰۰۰	۱۳۱۱	۱/۰۰۰۰
۵۲۰	/۲۰۹۱	۳۶۰ ـ ۳۰۰	۰/۸۴۱۴	۲۴۱۲	۰/۲۷۸۶
۵۱۰	۰/۱۰۲۵	۳۵۰ ـ ۱۰۰	۰/۸۱۷۵	۱۰۱۱	۰/۲۱۰۳
۵۰۰	۰/۰۹۴۱	۵۰۰ ـ ۳۲۰	۰/۸۰۹۳	۱۰۱۴	۰/۲۰۳۶
۳۲۰	۰/۰۴۸۲	۳۵۰ ـ ۳۳۰	۰/۶۵۳۴	۱۰۱۳	۰/۲۰۳۶
۳۱۰	۰/۰۳۱۹			۱۰۱۲	۰/۲۰۳۶
۳۰۰	۰/۰۲۹۹۶				
۳۴۰	۰/۰۲۷۹				

مقایسهٔ این نتایج با مشخصه‌های V - Qی نشان داده شده در شکل ۱۴ ـ ۵ «ج» جالب است. منحنیهای V - Q نشان می‌دهند که شینهای ۵۳۰ و ۵۱۰اُم، حاشیهٔ راکتیو صفر دارند. از



شکل ۱۴ - ۷ شینها و شاخه‌های با بالاترین مشارکت در مُدی که حداقل میزان پایداری را دارد

جدول ۱۴ ـ ۲ نیز مشاهده می‌کنیم که این شین‌ها دارای مشارکت زیادی در مُدی هستند که در معرض ناپایداری قرار دارد. مزیت تحلیل مُدال آن است که بروشنی گروههایی از شینها را که در ناپایداری مشارکت دارند، شناسایی می‌نماید. تحلیل Q - V، که روندی تک شین می‌باشد، نمی‌تواند ارتباطی بین نتایج به دست آمده برای شینهای منفرد را فراهم آورد و ممکن است برای سیستمهای عملی بزرگ، یافتن تعداد زیادی از منحنیهای Q - V به منظور پیدا کردن ناحیهٔ مشکل‌ساز، لازم باشد. به علت روشی که منحنی Q - Vی سیستم را تحت تنش بار قرار می‌دهد، ممکن است همیشه کامل کردن منحنی امکان‌پذیر نباشد، در آن صورت باید برای پیدا کردن شین بحرانی‌تر پیگیری ادامه یابد. تحلیل مُدال، این مشکل را برطرف می‌کند و بسادگی بر مبنای دیدگاه سیستمی، ناحیه‌هایی را که به صورت بالقوه مشکل‌سازند، شناسایی می‌کند.

تقریبهای حالت گذرا

در تحلیل پایداری ولتاژ، به دنبال بروز پیشامد، چندین محدودهٔ زمانی مختلف وجود دارد که در آنها وسایل مختلفی برای اثر گذاشتن بر عملکرد سیستم عمل می‌کنند. برقراری شرایط سیستم در حین هر محدودهٔ زمانی، بخصوص اگر نتوان به حالت ماندگار رسید، سودمند می‌باشد و مطلوب است که عملهای کنترلی را که موجب ناپایداری می‌گردند، تعیین کنیم. این ایده به مفهوم تقریبهای حالت گذرا منجر می‌شود. از معادلات جبری برای نمایش وضعیت سیستم، که تقریبهایی از محدوده‌های زمانی مختلف در طول مسیر گذرای سیستم هستند، استفاده می‌شود. تصاویر شرایط سیستم، تقریبهای حالت گذرا را نمایش می‌دهند.

برای بررسی پایداری ولتاژسیستم می‌توان تحلیل مُدال را به‌هریک ازاین تصاویر اعمال‌کرد.

نزدیکی به ناپایداری

نزدیکی به ناپایداری ولتاژ سیگنال کوچک با افزایش گام به گام تولید ـ بار تا سرحد ناپایداری و یا واگراییِ پخش بار، تعیین می‌شود. افزایش بار ممکن است در ناحیه، منطقه یا شینهای منفرد صورت گیرد. افزایش تولید از ترتیب بارگذاری، که معمولاً برای هر سیستم شکل خاصی دارد، پیروی می‌کند. البته لازم است عوامل غیر خطی را که هنگام حرکت از یک حالت به حالت دیگر با آن مواجه می‌شویم، به حساب آوریم.

تحلیل مُدالی که در نقاط کار معین انجام می‌شود، اطلاعاتی دربارهٔ ناحیه‌هایی که در معرض ناپایداری قرار دارند و ضرایب مشارکت تولید، به دست می‌دهد. در نقطهٔ فروپاشی، بردار ویژهٔ چپ، مؤثرترین جهتِ بارگذاری سیستم را برای حداکثر کردن پایداری ولتاژ شناسایی می‌کند. علاوه بر این، معیارهایی از قبیل ذخیره‌های راکتیو، تلفات و ولتاژهای شین، اطلاعات

ارزشمندی را در خصوص مکانیزم ناپایداری فراهم می‌آورند.

مراجع ۲۰ تا ۲۵ روشهای خاصی را برای تعیین نقطهٔ فروپاشی ولتاژ و نزدیکی به ناپایداری ولتاژ توصیف می‌کنند. بخشهای آتی دو مورد از این روشها را بررسی می‌کنند.

۱۴ ـ ۳ ـ ۴ تعیین کوتاهترین فاصله تا ناپایداری

معمولاً فاصله تا ناپایداری، به کمک افزایش بار سیستم به صورت از پیش تعریف شده‌ای تعیین می‌شود، که نشان‌دهندهٔ محتملترین طرح بارگذاری، براساس داده‌های گذشته و پیشگویی است. اما اغلب علاقه‌مندیم که الگوی بارگذاری را که به کوچکترین حاشیهٔ پایداری منجر می‌شود، بشناسیم. در ادامه، براساس روش توصیف شده در مرجع ۲۴، روش تعیین حداقل حاشیهٔ پایداری MVA را توضیح می‌دهیم.

نظریهٔ اصلی

مطلوب آن است که مجموعهٔ نموهای MW و MVAr بار را چنان بیابیم که جمع برداری آنها حداقل بوده، هنگامی که بر نقطهٔ کار اولیه سوار می‌شوند موجب غیر منفرد شدن ماتریس ژاکوبینِ پخش بار شوند. می‌توان با دسته‌بندی معادلات پخش بار به صورت زیر، به این هدف دست یافت:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \rho) = g\begin{pmatrix}\mathbf{V}\\ \theta\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\mathbf{P}\\ \mathbf{Q}\end{pmatrix} = 0 \qquad (۳۶ ـ ۱۴)$$

که در آن داریم:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix}\mathbf{V}\\ \theta\end{pmatrix} \qquad \rho = \begin{pmatrix}\mathbf{P}\\ \mathbf{Q}\end{pmatrix}$$

در اینجا $\mathbf{x}$ بردار سیستم است، و ρ بردار پارامترهاست که عناصر آن، توان بار حقیقی و راکتیو و نیز توان حقیقی ژنراتور است. هر دو $\mathbf{x}$ و ρ، بردارهای $N = 2N_{PQ} + N_{PV}$ بُعدی هستند، که در آن N_{PQ} مجموع کل شینهای PQ و N_{PV} مجموع کل شین‌های PV است. تابع برداری غیر خطیِ $\mathbf{f}$ نیز N بُعدی است.

فرض کنید $\mathbf{J}_x$ و $\mathbf{J}_\rho$ به ترتیب، ماتریسهای ژاکوبین تابع برداریِ $\mathbf{f}$ نسبت به $\mathbf{x}$ و ρ باشند. ماتریس $\mathbf{J}_x$ همانند ماتریس ژاکوبینِ پخش بار معادلهٔ ۱۴ ـ ۶ است. برای بردار پارامتر معلوم ρ_i،

می‌توان با حل معادلهٔ ۱۴ ـ ۳۶، به کمک هر یک از روشهای حل پخش بار، توصیف شده در فصل ششم، بردار حالت سیستم ($\mathbf{x}_i$) را به دست آورد. هر بردار پارامتر ρ_i موقعیت خاصی از سیستم را برحسب بارهای حقیقی و راکتیو، و تولید حقیقی، نمایش می‌دهد. اگر بردار پارامتر ρ_* و بردار حالت سیستم متناظر $\mathbf{x}_*$، به گونه‌ای باشند که ماتریس ژاکوبین پخش بار ($\mathbf{J}_x$)، منفرد باشد، سیستم به نقطهٔ بحرانیِ پایداریِ ولتاژ می‌رسد. فرض کنید که S، فوق سطحی[1] را در فضای پارامتری N بعدی نشان دهد که اگر ρ_* نقطه‌ای بر روی S باشد $\mathbf{J}_x(\mathbf{x}_*, \rho_*)$ منفرد شود.

حال می‌خواهیم بردار پارامتر ρ_* را بر روی S چنان تعیین کنیم که برای یک نقطه کار اولیهٔ معلوم سیستم ($\mathbf{x}_\circ, \rho_\circ$)، فاصلهٔ بین $\rho_\circ$ و ρ_* (یعنی $k = |\rho_* - \rho_\circ|$)، برای فاصلهٔ بین $\rho_\circ$ و S حداقل محلی باشد.

با فرض اینکه S، فوق سطحی هموار در نزدیکی ρ_* است، بردار عمود[2] بر این فوق سطح در ($\mathbf{x}_*, \rho_*$) به صورت زیر داده می‌شود:

$$\eta_* = \mathbf{w}_* \mathbf{J}_p \qquad (۳۷ - ۱۴)$$

که در آن $\mathbf{w}_*$ بردار ویژهٔ چپ $\mathbf{J}_x(\mathbf{x}_*, \rho_*)$ متناظر با مقدار ویژهٔ صفر است و η_* چنان نرمالیزه شده که $|\eta_*| = ۱$ باشد.

با شروع از نقطه کار اولیهٔ سیستم ($\mathbf{x}_\circ, \rho_\circ$)، با افزایش ρ به طور نموی، سیستم در یک جهت خاص تحت تنش بار قرار داده می‌شود. هر زمان که ρ افزایش می‌یابد. معادلهٔ ۱۴ ـ ۳۶ برای به دست آوردن بردار حالت سیستم $\mathbf{x}$، حل می‌شود و ρ به طور پیوسته در طول همان جهت افزایش می‌یابد تا اینکه در نقطهٔ بحرانیِ پایداریِ ولتاژ ($\mathbf{x}_*, \rho_*$)، ماتریس ژاکوبینِ پخش بار $\mathbf{J}_x$ منفرد شود یعنی:

$$\rho_* = \rho_\circ + k\eta \qquad (۳۸ - ۱۴)$$

که در آن k فاصلهٔ بین نقطهٔ کار اولیهٔ سیستم ($\mathbf{x}_\circ, \rho_\circ$) و نقطهٔ بحرانیِ پایداریِ ولتاژ ($\mathbf{x}_*, \rho_*$) (با تعریف $k = |\rho_* - \rho_\circ|$) است.

برای یک نقطهٔ کار اولیه معلوم سیستم ($\mathbf{x}_\circ, \rho_\circ$)، ρ می‌تواند در طول جهتهای مختلفی، زیاد شود. بدیهی است که مقدار k به جهتی که در طول آن ρ افزایش می‌یابد، بستگی دارد. هدف ما پیدا کردن جهت بردار پارامتر ρ به گونه‌ای است که k حداقل محلی باشد.

دستورالعمل زیر بردار η_* را، که در طول آن فاصلهٔ بین نقطهٔ تعادل اولیه ($\mathbf{x}_\circ, \rho_\circ$) و نقطهٔ

1. Hypersurface 2. Normal Vector

ویژهٔ $(\mathbf{x}_\circ, \rho_\circ)$، کوتاهترین می‌باشد، تعیین می‌کند:

۱. $\eta_\circ$ را با شرط $|\eta_\circ| = ۱$، به عنوان حدس اولیه برای جهت $\eta_\circ$ قرار دهید؛

۲. سیستم را با افزایش ρ به طور نموی در طول جهت η_i، تا منفرد شدن $\mathbf{J}_x$، تحت فشار قرار دهید. بدین معنا که k_i، ρ_i و $\mathbf{x}_i$ را چنان بیابید که $\rho_i = \rho_\circ + k_i \eta_i$ بر روی سطح S قرار گیرد؛

۳. قرار دهید: $\eta_{i+۱} = \mathbf{w}_i \mathbf{J}_p$، که: $|\eta_{i+۱}| = ۱$؛

۴. گامهای ۱، ۲، ۳ را تا همگرایی η_i به یک مقدار مشخص $(\eta_\circ)$ تکرار کنید. در این صورت $\rho_\circ = \rho_\circ + k_\circ \eta_\circ$ موقعیت تعادلِ متناظر است.

مثالی از سیستم شعاعیِ ساده

به منظور نمایش، سیستم شعاعیِ شکل ۱۴ ـ ۸ را در نظر می‌گیریم. متناظر با معادله ۱۴ ـ ۳۶، داریم:

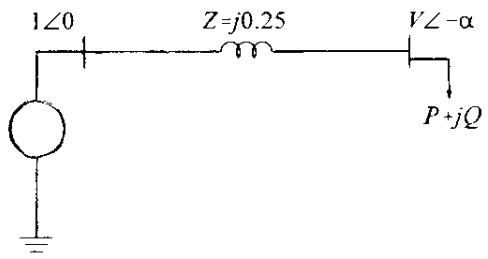
$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \rho) = \begin{pmatrix} ۴V\sin\alpha - P \\ ۴V\cos\alpha - ۴V^۲ - Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ۰ \\ ۰ \end{pmatrix} \qquad (۳۹ ـ ۱۴)$$

با:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} V \\ \alpha \end{pmatrix} \quad \text{و} \quad \rho = \begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix}$$

ماتریسهای ژاکوبین عبارتند از:

$$\mathbf{J}_x = \begin{pmatrix} ۴V\cos\alpha & ۴\sin\alpha \\ -۴V\sin\alpha & ۴\cos\alpha - ۸V \end{pmatrix} \qquad (۴۰ ـ ۱۴)$$



شکل ۱۴ ـ ۸ سیستم شعاعی ساده

و:

$$J_p = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \qquad (۴۱ - ۱۴)$$

دترمینان J_x برابر است با:

$$\det(J_x) = 16V - 32V^2\cos\alpha \qquad (۴۲ - ۱۴)$$

بر روی فوق سطح S، $\det(J_x) = 0$ است، یعنی:

$$16V - 32V^2\cos\alpha = 0$$

یا:

$$V = \frac{1}{2\cos\alpha} \qquad (۴۳ - ۱۴)$$

معادلهٔ ۱۴ ـ ۴۳ رابطهٔ بین V و α را هنگامی که J_x منفرد است، توصیف می‌کند. از معادله‌های ۱۴ ـ ۳۹ و ۱۴ ـ ۴۳، عبارت زیر را برای توصیف فوق سطح S در فضای پارامتری بیان می‌کنیم:

$$P^2 + 4Q - 4 = 0 \qquad (۴۴ - ۱۴)$$

فرض کنید که موقعیت کار اولیهٔ سیستم به صورت زیر باشد:

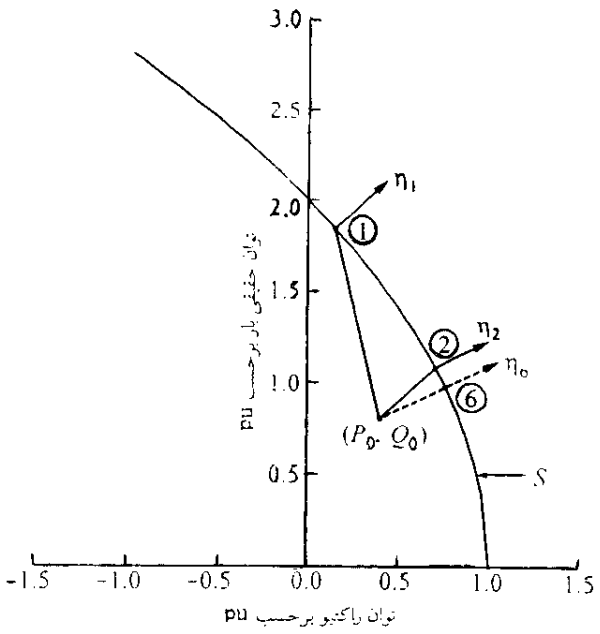
$$P_0 = 0/8 \qquad Q_0 = 0/4 \qquad V_0 = 0/8554 \qquad \alpha_0 = 13/52^\circ$$

جدول ۱۴ ـ ۳ فرایند تکرار را برای پیداکردن نقطهٔ ناپایداریِ ولتاژ، به طوری که نزدیکترین نقطه به موقعیت کار اولیه باشد، نشان می‌دهد.

جدول ۱۴ ـ ۳ محاسبهٔ کوتاهترین فاصله تا ناپایداری ولتاژ

برای سیستم شکل ۱۴ ـ ۸

تکرار	بردار ویژهٔ چپ η_i	فاصله تا ناپایداری (k_i)	P_i ، Q_i
۱	$[0/9725 \quad -0/2331]^T$	۱/۰۷۲۵	۰/۱۵۰۰ و ۱/۸۴۳۰
۲	$[0/6776 \quad 0/7354]^T$	۰/۴۱۷۳	۰/۷۰۶۹ و ۱/۰۸۲۸
۳	$[0/4869 \quad 0/8735]^T$	۰/۴۰۶۱	۰/۷۵۴۱ و ۰/۹۹۷۷
۴	$[0/4443 \quad 0/8959]^T$	۰/۴۰۲۴	۰/۷۶۰۵ و ۰/۹۷۸۸
۵	$[0/4405 \quad 0/8977]^T$	۰/۴۰۱۶	۰/۷۶۰۵ و ۰/۹۷۶۹
۶	$[0/4378 \quad 0/8991]^T$	۰/۴۰۱۵	۰/۷۶۱۰ و ۰/۹۷۵۸



شکل ۱۴ ـ ۹ سطح ویژهٔ S در صفحه Q − P و همگرایی فرایند تکرار

شکل ۱۴ ـ ۹ سطح منفرد S را در فضای پارامتری با مؤلفه‌های حقیقی و راکتیو بار به عنوان مختصات نشان می‌دهد. بر روی شکل، نقطهٔ (P_0, Q_0) نشان‌دهندهٔ موقعیت کار اولیه است. سطح S، مکان کلیهٔ ترکیبهای P و Q را که منجر به مقدار ویژهٔ صفر ژاکوبین می‌شود، نمایش می‌دهد. کلیهٔ نقاط زیر سطح S نشان‌دهندهٔ موقعیتهای پایدارِ ولتاژ، و کلیهٔ نقاط بالای سطح S نشان‌دهندهٔ موقعیتهای ناپایدار است.

توصیف کلی روش

برای هر سیستمی، روش کلیِ یافتن فاصلهٔ حداقل از سطحِ بارِ اولیهٔ P_0، Q_0 تا S به صورت زیر است:

۱. بار را از P_0 و Q_0 در جهتی خاص (انتخاب جهت اولیه بعداً مورد بررسی قرار می‌گیرد) آنقدر افزایش دهید، تا یکی از مقادیر ویژهٔ ماتریس ژاکوبین عملاً صفر شود. سطح بار P_1 و Q_1، متناظر با این نقطه، حد پایداری را نشان می‌دهد. این نقطه (P_1 و Q_1)، بر روی سطح S یا بسیار نزدیک به آن قرار دارد.

۲. برای حالت P_1 و Q_1، تحلیل مدال را انجام دهید و بردار ویژهٔ چپ ماتریس ژاکوبین کامل را تعیین کنید. بردار ویژهٔ چپ، عناصری را در بر می‌گیرد که نمونه‌هایی از بار MW و MVAr را برای هر شین به دست می‌دهد. بردار ویژه در کوتاهترین جهت به سمت نقطهٔ منفرد جهت می‌یابد و بنابراین بر S عمود است.

۳. به سطح بار حالتِ پایه (P_0 و Q_0) برگردید و سیستم را دوباره بارگذاری کنید، اما این بار در جهتی که توسط بردار ویژهٔ چپ حاصل از گام (۲) داده شده است. هنگامی که به سطح S برسیم بردار ویژهٔ چپ جدید محاسبه می‌شود.

۴. دوباره به حالتِ پایه (P_0 و Q_0) بر می‌گردیم و سیستم را در جهت بردار ویژهٔ چپ جدید حاصل از گام (۳)، بارگذاری می‌کنیم و این فرایند را آنقدر تکرار می‌کنیم تا مقادیر ویژهٔ محاسبه شده با تکرار جدید تغییر نکنند. در این صورت فرایند، همگرا شده است.

هنگامی که فرایند همگرا شود، پاسخ آن (P و Q) فاصله را تا سطح S از P_0، Q_0 به دست می‌دهد. این فرایند می‌تواند به سیستمهای عملی بزرگ نیز اعمال شود، لیکن در این حالت، S یک مکان ساده نیست بلکه یک فوق سطح در فضای پارامتری ۲N بُعدی است، که در آن N مجموع تعداد شینهای بار است (گرچه ما در انتخاب فضای پارامتری مورد استفاده، آزاد هستیم). شکل این فوق سطح نامعلوم است، و بنابراین می‌توان انتظار داشت که این فرایند، فقط *حداقل محلی* را پیدا کند. به علت مواجهه با پدیده‌های غیر خطی در بارگذاری سیستم از P_0، Q_0 به S، حداقلِّ محلیِ پیدا شده به جهت اولیهٔ انتخاب شده بستگی دارد. می‌توان از بردار ویژهٔ چپ متناظر با حداقل مقدار ویژهٔ ماتریس ژاکوبین در P_0، Q_0 به عنوان جهت اولیه، استفاده کرد، لیکن ممکن‌است استفاده از بارگذاری‌یکنواخت (براساس الگوی بارگذاری مورد انتظار) مناسبتر باشد.

مثالی از سیستمهای بزرگ

این سیستم، ۶۰۰ شین دارد. توان کلی بار در حالت پایهٔ MW ۲۴/۵۹۴، MVAr ۱۴/۱۱۲ است. حدس اولیه برای جهتِ تحت فشار گذاشتن سیستم یعنی η_0، چنان است که توان بار حقیقی و راکتیو در حالت پایه به طور یکنواخت مقیاس شده است، و افزایش در توان حقیقی بار با مقیاس کردن یکنواخت تولید حقیقی کلیهٔ ژنراتورها، تطبیق داده می‌شود. جدول ۱۴ ـ ۴ نتایج این مطالعه را خلاصه کرده است. جدول ۱۴ ـ ۵ در هر تکرار، عناصر بردار η_1 مرتبط با ۲۰ شین بالا را با بزرگترین افزایش در بار توان حقیقی نشان می‌دهد.

POWEREN.IR

جدول ۱۴ ـ ۴ خلاصه‌ای از تکرارها برای یافتن کوتاهترین فاصله تا ناپایداری ولتاژ در سیستم آزمایشیِ ۶۰۰ شینه

تکرار	فاصله تا ناپایداری (K_1)	بار کل P و Q در (x_0, ρ_0)	کوچکترین مقدار ویژهٔ J_x در (x_0, ρ_0)
۰		۱۴۱۱۲ MVAr و ۲۴۵۹۴ MW	۰/۰۳۴
۱	۱۱۶	۱۴۷۶۳ MVAr و ۲۵۷۲۹ MW	۰/۰۳۴
۲	۳۸	۱۴۰۴۶ MVAr و ۲۵۲۸۵ MW	− ۰/۰۱۵
۳	۳۰	۱۴۲۰۷ MVAr و ۲۴۷۸۸ MW	− ۰/۰۱۴
۴	۳۰	۱۴۲۰۷ MVAr و ۲۴۷۸۷ MW	۰/۰۱۳

از جدول ۱۴ ـ ۴ مشاهده می‌کنیم که با افزایشِ یکنواخت اولیه بار، حد پایداری در حدود ۲۵۷۲۹ MW است (افزایشی در حدود ۱۱۳۵ MW). مجموع برداری کلیهٔ افزایشهای توان حقیقی و راکتیو بار ۱۱۶ است. کوچکترین مقدار ویژهٔ J_x برابر با ۰/۰۳۴ است که نشان می‌دهد سیستم در نزدیکیِ ناپایداری قرار دارد. بردار ویژهٔ چپ متناظر با مقدار ویژهٔ حداقل، جهت بارگذاری را برای تکرار بعدی می‌دهد. جدول ۱۴ ـ ۵، ۲۰ عنصر اول بردار ویژهٔ چپ را فهرست کرده است. بار در هر شین متناسب با مؤلفه‌های متناظر بردار ویژه، افزایش داده می‌شود.

مشاهده می‌کنیم که فرایند، بسرعت همگرا می‌شود. در همگرایی، طول بردار افزایش بار تنها ۳۰ است، که به مقدار چشمگیری از جهت اولیهٔ افزایش یکنواخت بار کوچکتر است. مجموع افزایش بارِ مگاوات برای جهت بارگذاری حداقل تنها ۱۹۳ MW بالاتر از حالت پایه است که ۹۴۲ MW کمتر از حاشیهٔ پیدا شده با بارگذاریِ یکنواخت است.

۱۴ ـ ۳ ـ ۵ تحلیل پخش بار تداومی

ماتریس ژاکوبین معادلهٔ ۱۴ ـ ۶ در حد پایداریِ ولتاژ، منفرد می‌شود. در نتیجه، الگوریتمهای مرسوم پخش بار در نقاط کارِ نزدیک به حد پایداری در معرض مشکلات همگرایی قرار دارند. تحلیل پخش بار تداومی با فرموله کردن مجدد معادلات پخش بار به گونه‌ای این مسأله را حل می‌کند که در تمامی حالتهای ممکن بارگذاری، خوش رفتار باقی بمانند. بدین ترتیب حل مسألهٔ پخش بار، برای نقاط تعادل پایدار و ناپایدار امکان‌پذیر می‌شود (یعنی برای هر دو قسمت بالا و پایینی منحنیِ V−P).

روش پخش بار تداومی کاربردی در این بخش براساس روش توصیف شده در مرجع ۲۳

جدول ۱۴ ـ ۵ ۲۰ عنصر اول بردار η_1 در هر تکرار

تکرار ۱			تکرار ۲			تکرار ۴		
شین	E_P	E_Q	شین	E_P	E_Q	شین	E_P	E_Q
۲۷۹	۰/۱۴۶	−۰/۰۰۵	۲۵۷	۰/۱۴۱	۰/۰۰۱	۲۵۷	۰/۱۳۸	۰/۰۰۱
۲۷۸	۰/۱۴۶	−۰/۰۰۵	۲۶۰	۰/۱۴۰	۰/۰۰۰	۲۶۰	۰/۱۳۸	۰/۰۰۰
۲۸۱	۰/۱۴۶	−۰/۰۰۵	۲۸۳	۰/۱۴۰	۰/۰۰۰	۲۵۸	۰/۱۳۸	۰/۰۰۸
۲۸۰	۰/۱۴۵	−۰/۰۰۵	۲۸۲	۰/۱۴۰	۰/۰۰۰	۲۸۳	۰/۱۳۷	۰/۰۰۰
۲۹۳	۰/۱۴۲	−۰/۰۰۴	۲۸۴	۰/۱۴۰	۰/۰۰۰	۲۸۲	۰/۱۳۷	۰/۰۰۰
۲۸۲	۰/۱۳۳	−۰/۰۰۲	۲۵۸	۰/۱۳۸	۰/۰۰۸	۲۸۴	۰/۱۳۷	۰/۰۰۰
۲۸۳	۰/۱۳۳	۰/۰۰۰	۲۵۶	۰/۱۳۷	۰/۰۰۵	۲۵۶	۰/۱۳۷	۰/۰۰۵
۲۸۴	۰/۱۳۲	۰/۰۰۰	۲۴۶	۰/۱۳۷	۰/۰۰۵	۲۴۷	۰/۱۳۷	۰/۰۰۸
۲۶۰	۰/۱۳۱	−۰/۰۰۲	۲۴۷	۰/۱۳۷	۰/۰۰۸	۲۴۶	۰/۱۳۷	۰/۰۰۵
۲۵۷	۰/۱۳۱	−۰/۰۰۲	۲۹۳	۰/۱۳۶	۰/۰۰۱	۲۴۸	۰/۱۳۶	۰/۰۰۴
۲۵۶	۰/۱۲۰	۰/۰۰۰	۲۴۸	۰/۱۳۶	۰/۰۰۴	۲۹۴	۰/۱۳۵	۰/۰۱۱
۲۴۶	۰/۱۱۸	۰/۰۰۰	۲۷۹	۰/۱۳۵	۰/۰۰۱	۲۶۵	۰/۱۳۴	۰/۰۰۴
۲۶۵	۰/۱۱۷	۰/۰۰۰	۲۷۸	۰/۱۳۵	۰/۰۰۲	۲۹۳	۰/۱۳۴	۰/۰۰۱
۲۴۸	۰/۱۱۷	۰/۰۰۰	۲۸۰	۰/۱۳۵	۰/۰۰۱	۲۶۱	۰/۱۳۳	۰/۰۰۷
۲۵۸	۰/۱۱۷	۰/۰۰۲	۲۸۱	۰/۱۳۵	۰/۰۰۱	۲۶۷	۰/۱۳۳	۰/۰۱۰
۲۴۷	۰/۱۱۶	۰/۰۰۲	۲۶۵	۰/۱۳۴	۰/۰۰۴	۲۵۰	۰/۱۳۳	۰/۰۰۶
۲۷۰	۰/۱۱۲	۰/۰۰۰	۲۹۴	۰/۱۳۴	۰/۰۱۱	۲۶۹	۰/۱۳۳	۰/۰۱۰
۲۹۲	۰/۱۱۲	۰/۰۰۰	۲۶۱	۰/۱۳۳	۰/۰۰۷	۲۸۱	۰/۱۳۲	۰/۰۰۱
۲۶۱	۰/۱۱۱	۰/۰۰۱	۲۵۰	۰/۱۳۲	۰/۰۰۶	۲۶۸	۰/۱۳۲	۰/۰۰۹
۲۷۷	۰/۱۱۱	۰/۰۰۰	۲۶۷	۰/۱۳۲	۰/۰۱۰	۲۷۹	۰/۱۳۲	۰/۰۰۲

توجه: E_P و E_Q، جمله‌های P و Q ی بردار ویژهٔ چپ (η_1) هستند.

است. این روش از یک روش *تداومی پارامتری شدهٔ محلی*[1] استفاده می‌کند و در ردهٔ کلی روشهای حل معادلات جبری غیر خطی‌ای قرار می‌گیرد که به عنوان *روشهای دنبال‌کنندهٔ مسیر*[2] معروف هستند [۳۰ و ۳۱].

1. Locally Parameterized
2. Path - Following

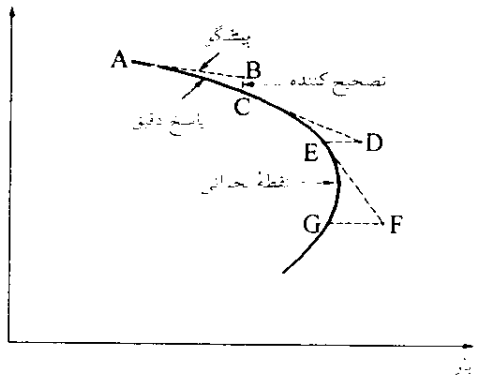
اصول اساسی

تحلیل پخش بار تداومی، همان‌طور که در شکل ۱۴ ـ ۱۰ نشان داده شده است، از یک فرایند تکراری، شامل گامهای پیشگو و تصحیح کننده استفاده می‌کند. با شروع از یک پاسخ اولیهٔ معلوم (A)، پیشگوی مماسی برای تخمین پاسخ (B) برای یک الگوی مشخص شده از افزایش بار، استفاده می‌شود. سپس با فرض ثابت بودن بار سیستم، گام تصحیح کننده، پاسخ دقیق (C) را با استفاده از تحلیل مرسوم پخش بار تعیین می‌کند. آنگاه براساس یک پیشگوی مماسیِ جدید، ولتاژها برای افزایش بیشتر در بار، پیش‌بینی می‌شوند. اگر بارِ تخمینیِ جدید (D) فراتر از حداکثر بارِ روی پاسخ دقیق باشد، دیگر گام تصحیح کنندهٔ با بارهای ثابت، همگرا نخواهد شد؛ بنابراین، گام تصحیح کننده‌ای با ولتاژ ثابت در شین موردنظر اعمال می‌گردد تا پاسخ دقیق (E) پیدا شود. با فرا رسیدن حد پایداریِ ولتاژ، برای تعیین دقیق بار حداکثر، باید بتدریج از اندازهٔ افزایش بار در حین گامهای پیشگوی متوالی، کاست.

فرموله‌کردن ریاضی

معادله‌های اساسی، مشابه معادله‌های تحلیل استاندارد پخش بار هستند و تنها تفاوت آنها در این است که افزایش بار به صورت یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود. می‌توان معادله‌های پخش بار فرموله شده را با در نظر گرفتن تولید فزاینده با افزایش بار، به صورت زیر بیان کرد:

$$\mathbf{F}(\theta, \mathbf{V}) = \lambda \mathbf{K} \qquad (۴۵ - ۱۴)$$



شکل ۱۴ ـ ۱۰ یک توالی نوعی از روند محاسبات در تحلیل پخش بار تداومی

که در آن:

λ، پارامتر بار؛

θ، بردار زوایای ولتاژ شین؛

$\mathbf{V}$، بردار دامنه‌های ولتاژ شین؛

$\mathbf{K}$، بردار نشان‌دهندهٔ درصد تغییر بار در هر شین است.

مجموعه معادله‌های غیر خطی بالا با مشخص کردن مقداری برای λ، به گونه‌ای که $0 < \lambda < \lambda_{critical}$ باشد، حل می‌شود؛ که در آن $\lambda = 0$ موقعیت بار پایه، و $\lambda = \lambda_{critical}$، بار بحرانی را نشان می‌دهد.

معادلهٔ ۱۴ ـ ۴۵ را می‌توان به صورت زیر باز نوشت:

$$\mathbf{F}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) = 0 \qquad (۴۶ - ۱۴)$$

گام پیشگو. در گام پیشگو، از تقریبی خطی برای تخمین پاسخ دقیق به هنگام بروز تغییری در یکی از متغیرهای حالت (یعنی، θ، $\mathbf{V}$ یا λ) استفاده می‌شود.

با گرفتن مشتق از طرفین معادلهٔ ۱۴ ـ ۴۶، با متغیرهای حالت متناظر با پاسخ اولیه، به مجموعه معادله‌های خطی زیر می‌رسیم:

$$\mathbf{F}_\theta \, d\theta + \mathbf{F}_V \, d\mathbf{V} + \mathbf{F}_\lambda \, d\lambda = 0$$

یا:

$$[\mathbf{F}_\theta \; \mathbf{F}_V \; \mathbf{F}_\lambda] \begin{pmatrix} d\theta \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{pmatrix} = 0 \qquad (۴۷ - ۱۴)$$

از آنجا که وارد کردن λ در معادله‌های پخش بار، یک متغیر مجهول را به معادله‌ها افزوده است، به معادلهٔ اضافهٔ دیگری برای حل معادله‌های بالا نیاز داریم. این کار با قرار دادن یکی از مؤلفه‌های بردار مماس مساوی با ۱ + یا ۱ − برآورده می‌شود. این مؤلفه، *پارامتر تداومی*[1] نامیده می‌شود. اکنون می‌توان معادلهٔ ۱۴ ـ ۴۷ را چنین نوشت:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{F}_\theta & \mathbf{F}_V & \mathbf{F}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\theta \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{pmatrix} \qquad (۴۸ - ۱۴)$$

1. Continuation Parameter

که در آن $\mathbf{e}_k$ یک بردار ردیفی است که به جز عنصر kاُم، که مساوی ۱ می‌باشد (متناظر با پارامتر تداومی)، سایر عناصر آن صفر است.

در آغاز روند، پارامتر بار (λ) به عنوان پارامتر تداومی انتخاب و مؤلفهٔ متناظر بردار مماسی برابر با ۱ + قرار داده می‌شود. در حین گامهای پیشگوی بعدی، به دلایلی که بعداً گفته می‌شود، پارامتر تداومی، به عنوان متغیر حالتی انتخابی می‌شود که بزرگترین آهنگ تغییر را در نزدیکیِ پاسخ داده شده دارد و علامت شیب آن، علامت مؤلفه متناظر با بردار مماس را تعیین می‌کند. با نزدیک شدن به بار حداکثر، نوعاً ولتاژی به عنوان پارامتر انتخاب می‌شود که بیشترین تغییر را داراست. هنگامی که بردار مماس معلوم شد، پاسخ بعدی به صورت ذیل پیش‌بینی می‌شود.

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \mathbf{V} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_\circ \\ \mathbf{V}_\circ \\ \lambda_\circ \end{pmatrix} + \sigma \begin{pmatrix} d\theta \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{pmatrix} \qquad (۴۹ - ۱۴)$$

که در آن زیرنویس «۰» مقادیر متغیرهای حالت را در شروع گامِ پیشگویی نشان می‌دهد. اندازهٔ گام σ به گونه‌ای انتخاب می‌شود که پاسخ پخش بار با پارامتر تداومی مشخص شده، وجود داشته باشد. اگر برای یک اندازهٔ گامِ معلوم، نتوان در گامِ تصحیح کننده، پاسخی پیدا کرد، اندازهٔ گام کاهش داده می‌شود و گامِ تصحیح کننده تا به دست آوردن پاسخ، تکرار می‌شود.

گام تصحیح کننده. در گام تصحیح کننده، به مجموعهٔ اصلی معادله‌ها ($\mathbf{F}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) = \circ$)، معادله‌ای افزوده می‌شود که متغیر حالت انتخاب شده را به عنوان پارامتر تداومی مشخص می‌کند. از این رو مجموعهٔ جدید معادله‌ها چنین است:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{F}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) \\ x_k - \eta \end{pmatrix} = [\circ] \qquad (۵۰ - ۱۴)$$

در معادلهٔ بالا، x_k متغیر حالتی است که به عنوان پارامتر تداومی انتخاب شده است و η مساوی با مقدار پیش‌بینی شدهٔ x_k می‌باشد. این مجموعه معادله‌ها را می‌توان با روش پخش بار نیوتون - رافسن، که اندکی اصلاح شده است، حل کرد. معرفی معادلهٔ اضافیِ تعریف کنندهٔ x_k، ماتریس ژاکوبین را در نقطهٔ کار بحرانی غیر منفرد می‌کند. تحلیل پخش بار تداومی را می‌توان فراتر از نقطهٔ بحرانی نیز ادامه داد و پاسخهایی متناظر با قسمت پایینی منحنی V−P به دست آورد.

مؤلفهٔ مماس λ (یعنی، $d\lambda$) برای قسمت بالای منحنی V−P، مثبت؛ در نقطهٔ بحرانی، صفر و فراتر از نقطهٔ بحرانی، منفی است. از این رو از علامت $d\lambda$ می‌توان متوجه شد که آیا نقطهٔ بحرانی فرا رسیده است یا خیر.

اگر پارامتر تداومی، افزایش بار باشد، تصحیح کننده خطی عمودی (برای نمونه، پاره خط BC در شکل ۱۴ ـ ۱۰) بر روی صفحهٔ P − V است. از سوی دیگر، اگر دامنهٔ ولتاژ، پارامتر تداومی باشد، تصحیح کننده، خطی افقی است (برای نمونه، پاره خط DE).

انتخاب پارامتر تداومی. انتخاب پارامترهای تداومی مناسب بخصوص برای گامهای تصحیح کننده، مهم است. زیرا ممکن است انتخاب ضعیف پارامتر به واگرایی پاسخ منتهی شود. برای نمونه، بکارگیری پارامتر بارِ λ، به عنوان پارامتر تداومی در ناحیهٔ نقطهٔ بحرانی ممکن است در صورت بالا زدن تخمین از بار حداکثر، به واگراییِ پاسخ منجر شود. از طرف دیگر، هنگامی که دامنهٔ ولتاژ به عنوان پارامتر تداومی به کار گرفته می‌شود، در صورتی که از گامهای بزرگ در تغییر ولتاژ استفاده شود، ممکن است پاسخ واگرا شود. یک انتخاب خوب به عنوان پارامتر تداومی، متغیرِ حالتی است که بزرگترین آهنگ تغییر را در نزدیکیِ پاسخِ داده شده دارد.

اطلاعات حساسیت

در تحلیل پخش بار تداومی، عناصر بردار مماس، نشان‌دهندهٔ تغییرات دیفرانسیلیِ متغیرهای حالت در پاسخ به تغییر دیفرانسیلی در بار سیستم هستند. بنابراین، عناصر dV در یک بردار مماسِ مشخص در شناسایی «شین‌های ضعیف» (یعنی شینهایی که تغییرات ولتاژ بزرگی را در پاسخ به تغییر بار تجربه می‌کنند)، سودمندند.

استفاده از روشهای مرسوم و تداومی به صورت مکمل

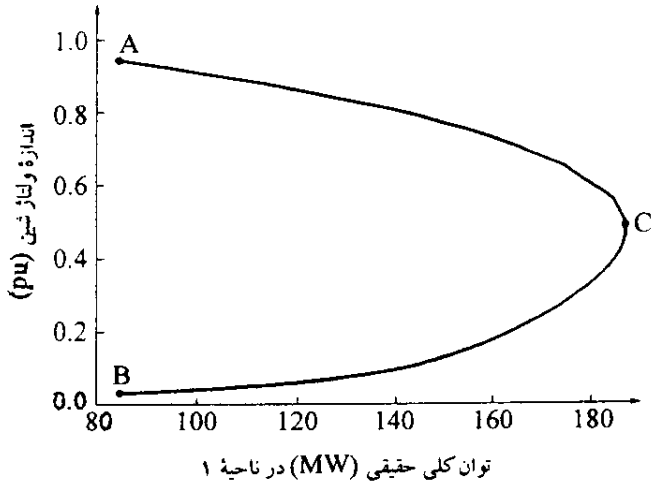
روش تداومی تحلیل پخش بار، مقاوم و انعطاف‌پذیر است. این روش برای حل مسائل پخش بار درگیر با مشکلاتِ همگراییِ بسیار مناسب است. لیکن، روشی بسیار کُند و زمان‌بر است.

بهترین روش کلی برای محاسبهٔ پاسخهای پخش بار تا نقطهٔ بحرانی و فراتر از آن، استفاده از روشهای مرسوم و تداومی تحلیل پخش بار به صورت مکمل یکدیگر است. در این شیوه، با شروع از حالت پایه، معادلهٔ ۱۴ ـ ۴۵ را با استفاده از یک روش معمولی (مثلاً نیوتون ـ رافسن یا دکوپله شدهٔ سریع) حل می‌کنیم، و بدین ترتیب پاسخهای پخش بار را برای سطوح باری که پی در پی افزایش می‌یابند، محاسبه می‌کنیم تا جایی که دیگر نتوان پاسخی پیدا کرد. از آن نقطه به بعد، روش تداومی را برای به دست آوردن پاسخهای پخش بار به کار می‌بندیم. معمولاً، روشهای مرسوم می‌توانند پاسخها را تا نقطهٔ بحرانی به دست آورند و روش تداومی فقط در صورتی لازم می‌شود که پاسخها دقیقاً در نقطهٔ بحرانی و بعد از آن مورد نیاز باشند.

نمایش کاربرد پخش بار تداومی

برای نمایش کاربرد تحلیل پخش بار تداومی، بار دیگر سیستم شکل ۱۴ ـ ۳ را در نظر می‌گیریم. خواص پایداری ولتاژ این سیستم در بخش ۱۴ـ۱ـ۱ با محاسبهٔ مشخصه‌های P − V و V − Q، و در بخش ۱۴ـ۳ـ۳ با اعمال تحلیل مُدال، مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که پاسخهای پخش بار با استفاده از روشهای مرسوم به دست آورده شدند، تحلیل پایداری ولتاژ باید فقط به نقاط تعادل پایدار، یعنی قسمت بالای منحنی P − V، محدود شود. در موقعیت کار حدیِ در نظر گرفته شده (نقطهٔ C بر روی منحنی P − V شکل ۱۴ ـ ۴)، همان‌طور که از مقادیر ویژهٔ جدول ۱۴ ـ ۱ مشاهده می‌شود، سیستم در آستانهٔ ناپایداری قرار دارد ولی واقعاً ناپایدار نیست.

اکنون با استفاده از تحلیل پخش بار تداومی، تحلیل را به نقاط کار بعد از نقطهٔ بحرانی بسط می‌دهیم. بار در ناحیهٔ ۱ شکل ۱۴ ـ ۳ (هاشور خورده)، همان‌طور که در بخش ۱۴ـ۱ـ۱ توضیح داده شد، با فرض اینکه بارها دارای مشخصه‌های MVA ثابت هستند، افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ ـ ۱۱ منحنی P − V *کامل* را برای سیستم نشان می‌دهد. قسمت بالای منحنی (A تا C) با استفاده از یکی از روشهای مرسوم پخش بار (دکوپله شدهٔ سریع) محاسبه شده که مشابه مشخصهٔ نشان داده شده در شکل ۱۴ ـ ۴ است. لیکن، قسمت پایین منحنی (C تا B)، با استفاده از تحلیل پخش بار تداومی محاسبه گردیده است.



شکل ۱۴ ـ ۱۱ منحنی P-V در شین ۵۳۰ ام نشان داده شده در شکل ۱۴ ـ ۳

نقطهٔ C نقطهٔ کار بحرانی را نشان می‌دهد. بار متناظر ناحیهٔ ۱ برابر با MW ۱۸۶/۹۸ است. برای این موقعیت کاری، ۱۰ عنصر اول ضرایب حساسیت (عناصر dV بردار مماس) در جدول ۱۴ ـ ۶ فهرست شده است. ۱۰ عنصر اول ضرایب مشارکت شین، متناظر با مُدهایی که دارای کمترین میزان پایداری هستند (بخش ۱۴ ـ ۳ ـ ۳ را ببینید)، نیز برای مقایسه در جدول نشان داده شده است. عملاً برای این سیستم، ناحیه‌های در معرض ناپایداریِ ولتاژ (که به وسیلهٔ هر دو روش شناسایی شده‌اند)، یکسان هستند. البته از آنجا که برای الگوی بارگذاریِ در نظر گرفته شده فقط یک ناحیهٔ ضعیفِ ولتاژ وجود دارد، این نتیجه دور از انتظار نیست.

جدول ۱۴ ـ ۶ حساسیت ولتاژ و ضرایب مشارکت برای نقطه کار بحرانی

تحلیل مُدال		پخش بار تداومی	
ضریب مشارکت شین	شین	ضریب حساسیت ولتاژ	شین
۰/۲۶۵۴	۵۳۰	۰/۱۲۶	۵۳۰
۰/۲۱۰۴	۵۲۰	۰/۱۱۲	۵۲۰
۰/۱۰۲۵	۵۱۰	۰/۰۷۹	۵۱۰
۰/۰۹۴۱	۵۰۰	۰/۰۷۵	۵۰۰
۰/۰۴۸۱	۳۲۰	۰/۰۵۴	۳۲۰
۰/۰۳۱۷	۳۱۰	۰/۰۴۴	۳۱۰
۰/۰۲۹۴	۳۰۰	۰/۰۴۲	۳۰۰
۰/۰۲۷۱	۳۴۰	۰/۰۴۱	۳۷۰
۰/۰۲۶۱	۳۷۰	۰/۰۴۰	۲۶۰
۰/۰۲۶۳	۲۶۰	۰/۰۴۰	۳۴۰

توجه: ضریب حساسیت ولتاژ برای شین K = $\frac{\text{dv برای شین Kام}}{\text{مجموع } dv_s \text{ برای کلیه شین‌ها}}$

۱۴ ـ ۴ جلوگیری از فروپاشی ولتاژ

این بخش، طراحی سیستم و معیارهای بهره‌برداری را شناسایی می‌کند که با بکارگیری آنها می‌توان از فروپاشی ولتاژ جلوگیری کرد.

۱۴ ـ ۴ ـ ۱ معیارهای طراحی سیستم

الف) بکارگیری وسایل جبرانسازی توان راکتیو

در بخش ۱۴ـ۱ـ۴، اثر انواع مختلف وسایل جبرانسازی توان راکتیو را بر روی پایداری ولتاژ بررسی کردیم. با انتخاب مناسب طرحهای جبرانسازی باید حاشیه‌های کافیِ پایداری تضمین شوند. انتخاب اندازه‌ها، ظرفیتها و موقعیتهای وسایل جبرانسازی باید براساس مطالعهٔ تفصیلی صورت پذیرد، که در آن سخت‌ترین حالت سیستم، که برای آن باید سیستم به طور رضایتبخشی عمل نماید، در نظر گرفته شود.

معیارهای طراحی که براساس حداکثر مجاز افت ولتاژ پس از یک پیشامد پایه‌ریزی شده باشند، معمولاً از نظر پایداری ولتاژ رضایتبخش نیست. حاشیهٔ پایداری باید بر مبنای فاصله‌های MW و MVAr تا ناپایداری، پایه‌ریزی شده باشد. از این نظر، شناختن ناحیه‌های کنترل ولتاژ و مرزهای انتقال ضعیف، مهم است.

ب) کنترل ولتاژ شبکه و خروجی راکتیو ژنراتور

جبرانسازی بار (یا جبرانسازی افت خط) مربوط به AVR ژنراتور، ولتاژ را بر روی طرف فشار قویِ ترانسفورمر بالابرنده تنظیم می‌کند (فصل ۸، بخش ۸ ـ ۵ ـ ۴ را ببینید). در بسیاری از مواقع این موضوع اثر مثبتی بر پایداری ولتاژ با حرکت دادن الکتریکی نقطه ولتاژ ثابت نزدیکتر به بارها، دارد.

می‌توان‌ازکنترل‌حلقهٔ‌خارجی‌ثانویهٔ‌تحریک‌ژنراتور نیز برای تنظیم ولتاژ جانبیِ شبکه استفاده کرد. اما این عمل باید بسیار کُندتر از تنظیم ولتاژ پایانهٔ ژنراتور باشد تا تداخل زیان‌آور دو کنترل حداقل شود. پاسخ زمانی در حدود ۱۰ ثانیه،معمولاً برای کنترل حلقهٔ خارجی کافی است.

چندین شرکت، در حال کار بر روی طرحهای خاص برای کنترل ولتاژهای شبکه و توان راکتیو هستند. برای نمونه، شرکتهای تولید برق فرانسه و ایتالیا (ENEL و EDF) در حال کار بر روی طرحهای «کنترل ولتاژ ثانویه» برای کنترل مرکزیِ ولتاژهای شبکه و خروجیهای راکتیو ژنراتورها می‌باشند [۲۶ و ۲۷]. شرکت برق توکیو نیز طرح کنترل تطبیقی تغذیهٔ توان راکتیو را در برنامه دارد [۲۸].

ج) هماهنگی حفاظتها و یا کنترلها

همان‌طور که در بخش ۱۴ ـ ۲ ـ ۲ مشخص شد، یکی از موجبات فروپاشی ولتاژ، عدم هماهنگی بین حفاظتها و یا کنترلهای وسایل و تجهیزات سیستم قدرت است. براساس مطالعات شبیه‌سازی دینامیکی، باید هماهنگی کافی تضمین شود.

خروج وسیله از مدار برای جلوگیری از شرایط اضافه باری، باید آخرین چاره برای این کار باشد و هرگاه ممکن باشد، برای بر طرف کردن موقعیت اضافه‌باری، باید عملهای کنترلی کافی (خودکار یا دستی) فراهم آورده شود.

د) کنترل تغییر دهنده‌های تپ ترانسفورمر

می‌توان به منظور کاهش مخاطرهٔ فروپاشی ولتاژ، تغییر دهندهٔ تپ را به طور محلی یا مرکزی کنترل کرد. هنگامی که تغییر تپ زیان‌آور است، روش ساده آن است که هرگاه ولتاژ جانبی منبع، افت پیدا می‌کند از تغییر تپ ممانعت به عمل آید و با بازگشت ولتاژ به مقدار مناسب این ممنوعیت برداشته شود. چندین شرکت از این طرح استفاده می‌کنند [۱].

امکان بالقوه‌ای برای اعمال راهبردهای بهبود یافتهٔ کنترل ULTC وجود دارد. چنین راهبردهایی باید براساس اطلاعاتی از بار و مشخصه‌های سیستم توزیع باشند. برای نمونه، کاهش ولتاژهای توزیع در پُستهایی که به طور عمده بارهای خانگی را تغذیه می‌کنند، حداقل به‌طور موقت کاهش باری را به همراه خواهد داشت. در نهایت قسمتی از این عمل با افزایش بار توسط عمل وسایل کنترل شدهٔ خودکار یا دستی، جبران خواهد شد. افزایش ولتاژ بر بارهای صنعتی، چندان بر بار تغذیه شده تأثیر نخواهد گذاشت. ولی توان راکتیو تغذیه شده به وسیلهٔ خازنهای متناظر با چنان بارهایی را افزایش می‌دهد.

کنترلهای میکروپروسسوری ULTC، قابلیت نامحدودی برای اعمال راهبردهای کنترلی ULTC، به منظور بهره گرفتن از مشخصه‌های بار، فراهم آورده‌اند. هرگاه کاهش ولتاژ ثانویه مشکل را تا حدی حل کند، می‌توان با افت ولتاژ اولیه زیر یک آستانه، ولتاژها را تا سطح مشخصی کاهش داد. از طرف دیگر، هرگاه حفظ ولتاژ ثانویه سودمند باشد، باید کنترلهای عادی ULTC را اعمال کرد. حتی بالاتر بردن ولتاژها از حد عادی به مقدار کم نیز امکان دارد [۲۹]. باید اشاره کرد که انتخاب بهترین راهبرد به مشخصه‌های سیستم خاص، بستگی دارد.

ه) بارزدایی کمبود ولتاژ [۱ ، ۳۲]

ممکن است برای آمادگیِ برخورد با موقعیتهای برنامه‌ریزی نشده یا شدید، استفاده از طرحهای بارزدایی کمبود ولتاژ لازم باشد. این موضوع همانند بارزدایی کمبود فرکانس است، که یک عمل صنعتی متداول است که در برخورد با موقعیتهای شدید، که به کمبود تولید و کمبود فرکانسی منجر می‌شوند، به کار می‌رود. بارزدایی وسیله‌ای ارزان قیمت برای جلوگیری از فروپاشیِ همه جانبهٔ سیستم است، خصوصاً اگر پیشامدهایی که به ناپایداری ولتاژ منجر می‌شوند، دارای

احتمال ضعیف بوده ولی در صورت وقوع نتایج جدی به همراه داشته باشند. مشخصه و مکان بارهایی که قطع می‌شوند در بارزدایی ولتاژ مهمتر از بارزدایی فرکانس هستند.

طرحهای بارزدایی باید به گونه‌ای باشند که خطاها، افتهای گذرای ولتاژ و نیز حالتهای ولتاژ کم را که منجر به فروپاشی ولتاژ می‌شوند، از هم تشخیص دهد.

۱۴ ـ ۴ ـ ۲ معیارهای بهره‌برداری از سیستم

الف) حاشیهٔ پایداری

سیستم باید با یک حاشیهٔ پایداری ولتاژ کافی، توسط برنامه‌ریزی مناسبِ منابع توان راکتیو و نمایهٔ ولتاژ، عمل کند. در حال حاضر دستورالعملهایی برای انتخاب درجهٔ حاشیه و پارامترهای سیستم که در حالت کلی مورد قبول باشند و به عنوان شاخصهایی استاندارد، مورد استفاده قرار گیرند، وجود ندارد. به نظر می‌رسد که این دستورالعملها به سیستم وابسته هستند و باید براساس مشخصه‌های هر سیستم به طور جداگانه پایه‌ریزی شوند.

اگر حاشیهٔ موردنظر را نتوان با منابع در دسترس توان راکتیو و امکانات کنترل ولتاژ برآورده ساخت، گاهی لازم است انتقالهای توان را محدود کرد و به منظور پشتیبانی از ولتاژ در ناحیه‌های بحرانی، واحدهای اضافی تولید را راه‌اندازی نمود.

ب) ذخیرهٔ چرخان

به منظور حفظ نمایهٔ مطلوب ولتاژ در تحریک پایین یا متوسط و نیز در حالت کلیدزنی خازنهای شنت، باید ذخیرهٔ توان راکتیو به وسیلهٔ ژنراتورهای در حال کار تضمین شود. ذخیرهٔ مورد نیاز باید در هر ناحیهٔ کنترل ولتاژ، شناسایی و حفظ گردد.

ج) عمل اپراتورها

اپراتورها باید توانایی تشخیص علامتهای مربوط به پایداری ولتاژ را داشته باشند و عملهای مناسب چاره‌ساز را، از قبیل: کنترل انتقال توان و ولتاژ و احتمالاً قطع بار (به عنوان آخرین حربه)، اتخاذ کنند تا راهبردهای بهره‌برداری را، که مانع فروپاشی ولتاژ می‌شود، برقرار نمایند. در این راستا، نظارت بر مقدار λ و تحلیل بی‌درنگ[1] به منظور شناسایی مسائل پایداریِ ولتاژ و معیارهای اصلاحیِ ممکن، بسیار ارزشمند خواهد بود.

1. On - line

منابع

[1] IEEE, Special Publication 90TH0358-2-PWR, *Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience*, 1990.

[2] CIGRE Task Force 38-02-10, *Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena*, 1993.

[3] CIGRE Task Force 38-01-03, "Planning against Voltage Collapse," *Electra*, No. 111, pp. 55-75, March 1987.

[4] C. Barbier and J.P. Barret, "An Analysis of Phenomena of Voltage Collapse on Transmission System," *Revue Générale d' Electricité*, pp. 672-690, October 1980.

[5] H.K. Clark, "Voltage Control and Reactive Supply Problems," IEEE Tutorial Course Text on Reactive Power: Basics, Problems, and Solutions, 87EH0262-6-PWR, pp. 17-27, 1987.

[6] W.R. Lachs, "Voltage Collapse in EHV Power Systems," Paper No. A78057-2, presented at the 1978 IEEE PES Winter Meeting, New York, January 28-February 3, 1978.

[7] Y. Mansour and P. Kundur, "Voltage Collapse," *Control and Dynamic Systems*, Vol. 42: *Analysis and Control System Techniques for Electric Power Systems*, pp. 111-162, Academic Press, 1991.

[8] C.W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill, 1993.

[9] B. Gao, G.K. Morison, and P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-7, No. 4, pp. 1529-1542, November 1992.

[10] G.K. Morison, B. Gao, and P. Kundur, "Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches," Paper 92SM590-0 PWRS, Presented at the IEEE PES Summer Meeting, July 12-16, 1992, Seattle, Washington

[11] K. Walve, "Modelling of Power System Components at Severe Disturbances," CIGRE Paper: 38-18, 1986.

[12] M. Stubbe, A. Bihain, J. Deuse, and J.C. Baader, "STAG - A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behaviour of Electrical Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, No. 1, pp. 129-138, 1989.

[13] N. Flatabø, R. Ognedal, and T. Carlsen, "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-5, No. 4, pp. 1286-1293, November 1990.

[14] C. Lemaitre, J.P. Paul, J.M. Tesseron, Y. Harmand, and Y.S. Zhao, "An Indicator of the Risk of Voltage Profile Instability for Real-Time Control Applications," IEEE Summer Meeting 1989, Paper 89SM713-9 PWRS.

[15] B. Gao, *Voltage Stability Analysis of Large Power Systems*, Ph.D. thesis, University of Toronto, 1992.

[16] W.J. Stewart and A. Jennings, "A Simultaneous Iteration Algorithm for Real Matrices," *ACM Trans. Mathematical Software*, Vol. 7, No. 2, pp. 184-198, June 1981.

[17] L. Wang and A. Semlyen, "Application of Sparse Eigenvalue Techniques to the Small Signal Stability Analysis of Large Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-5, No. 2, pp. 635-642, May 1990.

[18] N. Martins, "Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-1, No. 2, pp. 217-225, February 1986.

[19] *Voltage Stability Analysis Program Application Guide*, EPRI Project RP3040-1, Prepared by Ontario Hydro, October 1992.

[20] F.L. Alvarado and T.H. Jung, "Direct Detection of Voltage Collapse Conditions," *Proceedings: Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security*, EPRI EL-6183, pp. 5.23-5.38, January 1989.

[21] H.D. Chiang, W. Ma, R.J. Thomas, and J.S. Thorp, "A Tool for Analyzing Voltage Collapse in Electric Power Systems," *Proceedings of the Tenth Power System Computation Conference*, Graz, Austria, pp. 1210-1217, August 1990.

[22] T. Van Cutsem, "A Method to Compute Reactive Power Margins with Respect to Voltage Collapse," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-6, No. 2, pp. 145-156, February 1991.

[23] V. Ajjarapu and C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis," *IEEE PICA Conference Proceedings*, pp. 304-311, May 1991.

[24] I. Dobson and L. Lu, "Using an Iterative Method to Compute a Closest Saddle Node Bifurcation in the Load Power Parameter Space of an Electric Power

System," Bulk Power System Voltage Phenomena, Voltage Stability and Security NSF Workshop, Deep Creek Lake, Md., August 1991.

[25] A-P Löf, T. Smed, G. Andersson, and D.J. Hill, "Fast Calculation of a Voltage Stability Index," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-7, No. 1, pp. 54-64, February 1992.

[26] J.P. Paul, C. Corroyer, P. Jeanell, J.M. Tesseron, F. Maury, and A. Torra, "Improvements in the Organization of Secondary Voltage Control in France," CIGRE 38/39-03, 1990.

[27] V. Archidiacono, S. Corsi, A. Natale, C. Raffaelli, and V. Menditto, "New Developments in the Application of ENEL Transmission System Voltage and Reactive Power Automatic Control," CIGRE 38/39-06, 1990.

[28] S. Koishikawa, S. Ohsaka, M. Suzuki, T. Michigami, and M. Akimoto, "Adaptive Control of Reactive Power Supply Enhancing Voltage Stability of a Bulk Power Transmission System and a New Scheme of Monitor on Voltage Security," CIGRE 38/39-01, 1990.

[29] G. Brownell and H. Clark, "Analysis and Solutions for Bulk System Voltage Instability," *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 31-35, July 1989.

[30] R. Seydel, *From Equilibrium to Chaos*, Elsevier, New York, 1988.

[31] W.C. Rheinboldt, *Numerical Analysis of Parameterized Nonlinear Equations*, John Wiley & Sons, New York, 1986.

[32] C.W. Taylor, "Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 480-488, April 1992.

فصل پانزدهم

نوسانهای زیر سنکرون

در تحلیل عملکرد دینامیکی سیستم قدرت، تاکنون فرض شده است که روتورِ توربین ـ ژنراتور از یک جرم واحد تشکیل شده است. چنین نمایشی، نوسان کل روتور توربین ـ ژنراتور را نسبت به سایر ژنراتورها در نظر می‌گیرد. فرکانس این مُد نوسانی معمولاً در گسترهٔ ۰/۲ تا ۲ هرتز است. درواقع، روتور توربین ـ ژنراتور بخار، شامل ساختار بسیار پیچیدهٔ مکانیکی شامل چندین جرم غالب (از قبیل روتورهای قسمتهای توربین، روتور ژنراتور، تزویجها، و روتور تحریک کننده)، که با محورهایی با سختی محدود به هم وصل شده‌اند، می‌باشد. بنابراین، هنگامی که ژنراتور دچار انحراف می‌شود، نوسانهایی پیچشی، بین ناحیه‌های مختلف روتور توربین ـ ژنراتور پدید می‌آید.

در حالت خاصی ممکن است نوسانهای پیچشی در گسترهٔ زیر سنکرون، با سیستم الکتریکی بشدت تداخل کنند. مسائل ویژهٔ این نوع نوسان، شامل موارد زیر است:

الف) تداخل پیچشی با کنترلهای سیستم قدرت؛

ب) تشدید زیر سنکرون با خطوط انتقالی که به صورت سری با خازن جبران شده‌اند؛

ج) تحمل خستگی[1] پیچشی ناشی از کلیدزنی شبکه؛

البته باید اشاره کرد مشخصه‌های پیچشیِ واحدهای آبی به گ[illegible]ست که تداخل با کنترلهای سیستم قدرت یا شبکهٔ انتقال، مسأله‌ای را ایجاد نمی‌کنا[illegible].

این فصل، مشخصه‌ها و مدلسازی سیستم توربین ـ ژنراتور را توصیف [illegible] مختلف به نوسانهای پیچشیِ زیرسنکرون را که درطراحی سیستمهای قدرت اهمیت دار[illegible]

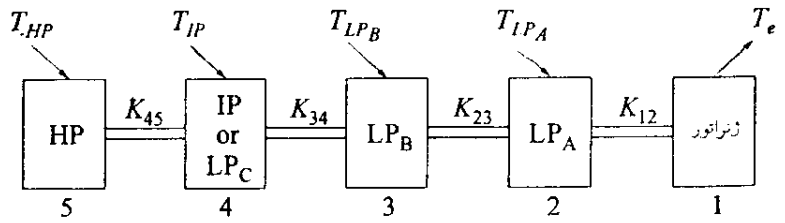
[illegible]

۱۵ ـ ۱ مشخصه‌های پیچشی توربین ـ ژنراتور

۱۵ ـ ۱ ـ ۱ مدل سیستم محور [۱ ـ ۶]

روتور یک واحد تولید حرارتی، خود سیستم مکانیکی پیچیده‌ای است. روتور ممکن است مجموعاً بیش از ۵۰ متر طول و صدها تُن وزن داشته باشد و از قسمتهای تراشکاری شدهٔ محوری با اندازه‌های مختلف و تزویجهایی تشکیل شده است که یا یکپارچه هستند و یا دارای قسمتهای کوچکتری هستند که به روتور محکم شده‌اند. توربین، دیسکها، تیغه‌ها و عناصر کوچکتر دیگری را در بر می‌گیرد. ژنراتور، شامل شکافهای کلافها و حلقه‌های نگهدارنده می‌شود. چنین سیستم روتوری، تعداد زیادی مُد نوسان پیچشی (در بالا و پایین فرکانس نامی) دارد. از این‌رو لازم است که یک *مدل پیوستار*[1] برای سیستم روتور، گسترهٔ کامل نوسانهای پیچشی را درنظر داشته باشد [۶]. اکن، مسأله از تداخل سیستم الکتریکی و مکانیکیِ روتور (به طور عمده در ناحیهٔ فرکانسی زیر سنکرون) ناشی می‌شود. بدین ترتیب نمایش سیستم روتور با یک *مدل سادهٔ فشردهٔ جرم*[2] برای مطالعات تداخل سیستم الکتریکی امکان‌پذیر خواهد بود.

شکل ۱۵ ـ ۱ ساختار یک مدل فشردهٔ جرم نوعی را برای یک واحد تولیدی که به وسیلهٔ توربین باز حرارتی ترکیبی پشت سر هم[3] حرکت داده می‌شود، نشان می‌دهد. پنج جرم پیچشی، نشان‌دهندهٔ روتورهای ژنراتور، دو بخش توربین فشار ضعیف (LP)، بخش توربین فشار متوسط (IP) و بخش توربین فشار قوی (HP) هستند. فرض شده است که واحد تولیدی یک تحریک‌کنندهٔ استاتیکی دارد. برای واحدی با تحریک‌کنندهٔ چرخان که با همان سیستم محور حرکت داده می‌شود، یک جرم اضافه نمایش‌دهنده روتور تحریک کننده، وجود خواهد داشت (مثال نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۶ را ببینید).



شکل ۱۵ ـ ۱ ساختار یک مدل نوعی فشردهٔ جرم سیستم محور

1. Continuum Model
2. Lumped - Mass Model
3. Tandem Compound Reheat

در نوشتن معادلات ریاضی سیستم محور، از علامتگذاری زیر استفاده می‌کنیم:

T_{HP} ، T_{IP} ، T_{LP_A} ، T_{LP_B} = گشتاورهای مکانیکی که از بخشهای متناظر توربین برحسب مبنای واحد به دست می‌آیند.

T_e = گشتاور فاصلهٔ هوایی ژنراتور برحسب pu

$\omega_\circ$ = سرعت نامی برحسب رادیان الکتریکی بر ثانیه = $2\pi f_\circ$ = ۶۰ هرتز برای ۳۷۷

$\omega_{\circ m}$ = سرعت نامی برحسب رادیان مکانیکی بر ثانیه = $(2/P_f)\omega_\circ$

P_f = تعداد قطبهای تحریک

ω_i = سرعت جرم i، برحسب رادیان الکتریکی بر ثانیه

δ_i = موقعیت زاویه‌ای جرم i، برحسب رادیان الکتریکی نسبت به یک چارچوب چرخان با سرعت سنکرون = $\omega_i t - \omega_\circ t + \delta_{i\circ}$

$\Delta\omega_i$ = انحراف سرعت جرم i، برحسب pu = $(\omega_i - \omega_\circ)/\omega_\circ$

D = ضریب یا عامل میرایی برحسب گشتاور مبنای واحد بر انحراف سرعت

H = ثابت لختی برحسب MW.s / MVA

K = سختی محور برحسب گشتاور مبنای واحد بر رادیان الکتریکی

t = زمان برحسب ثانیه

مشخصه‌های دینامیکی سیستم محور با سه مجموعه از پارامترها تعیین می‌شود: ثابت لختی H مربوط به جرمهای منفرد، سختی پیچشیِ K مربوط به بخشهای محور که جرمهای مجاور را به هم وصل می‌کند و ضریب میراییِ D متناظر با هر جرم. در زیر توصیفی از هریک از این پارامترها آورده شده است.

ثابت لختی H

لختی تعیین شده برای هر جرمِ روتور، سهم لختی محور آن را شامل می‌شود. فرض می‌شود که تیغه‌های توربین به صورت صلب به روتور متصل می‌باشند. در این صورت اگر گشتاور لختی جرم روتور، $J\ kg.m^2$ باشد، ثابت لختی در مبنای واحد H (فصل ۳، بخش ۳ ـ ۹ را ببینید) به صورت زیر داده می‌شود:

$$H = J\frac{1}{2}\frac{\omega_{\circ m}^2}{VA_{base}} = J\frac{1}{2}\frac{[2\pi(r/min)/60]^2}{VA_{base}}$$

سختی پیچشی K

برای محوری با سطح مقطع یکنواخت تحت کشش الاستیک، سختیِ پیچشی یا ثابت فنر به صورت زیر داده می‌شود [۱]:

$$K = \frac{GF}{l} \qquad (۱ - ۱۵)$$

که در آن:

G، قدر مطلق سختی مادهٔ محور؛

F، ضریب شکلدهی که خاصیت هندسی را تعریف می‌کند؛

و l، طول محور است.

برای محوری صلب با سطح مقطع دایره‌ای به قطر d، داریم:

$$F = \frac{\pi d^4}{۳۲} \qquad (۲ - ۱۵)$$

سختی پیچشی، رابطهٔ بین گشتاور منتقل شده و چرخش زاویه‌ای بین دو سر محور را تعریف می‌کند:

$$T = K\theta \qquad (۳ - ۱۵)$$

که در آن:

T، گشتاور (N.m)؛

θ، چرخش (رادیان)؛

و K، سختی (N.m/rad) است.

در روتور توربین ژنراتور، هر دهانهٔ[1] محور شامل چندین بخش با قطرهای مختلف است. در این حالت، ابتدا سختی پیچشی هر بخش تعیین و سپس سختیِ معادل واحد، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{۱}{K_{\text{مجموع}}} = \sum \frac{۱}{K_{\text{بخش انفرادی}}}$$

برای نمایش سیستمهای توربین ژنراتور در مطالعات سیستم قدرت، زوایا برحسب رادیانهای الکتریکی (یا درجه) بیان می‌شوند. اگر تعداد قطبهای تحریک ژنراتور برابر با P_f باشد، داریم:

$$\frac{P_f}{۲}(\theta \text{ برحسب رادیان مکانیکی}) = \theta \text{ برحسب رادیان الکتریکی}$$

1. Span

در مطالعات سیستم، گشتاور معمولاً در مبنای واحد با گشتاورِ پایهٔ داده شده در زیر بیان می‌شود:

$$T_{base} = \frac{VA_{base}}{\omega_{om}} = VA_{base}\frac{P_f}{۲\omega_o}$$

در این صورت سختی پیچشی به صورت زیر است:

$$\text{رادیان الکتریکی / گشتاور مبنای واحد K} = \frac{\text{رادیان مکانیکی / K N.m}}{(P_f/۲)\,T_{base}}$$

$$= \frac{\text{رادیان مکانیکی / K N.m}}{VA_{base}}\left[\frac{۴\omega_o}{P_f^۲}\right]$$

ضریب میرایی یا عامل D [۲ ـ ۶]

چند منبع مختلف در میرایی نوسانهای پیچشی نقش دارند:

الف) بخار بر تیغه‌های توربین نیرو وارد می‌کند. نوسان تیغه‌های توربین باعث میرایی جریان حالت ماندگار بخار می‌شود، که می‌توان به طور تقریبی آن را متناسب با انحراف سرعت بخش متناظر توربین نمایش داد.

ب) پسماند مادهٔ محور؛ هنگامی که بخشهای به هم پیوستهٔ محور می‌چرخند، به واسطهٔ پسماند مکانیکی مادهٔ محور، زمانی که محور تغییرات سیکلی تنش ـ کشش را تجربه می‌کند، میرایی به وجود می‌آید.

ج) منابع الکتریکی؛ ژنراتور، تحریک کننده و شبکه‌های انتقال نیز به میرایی نوسانها کمک می‌کنند.

سطوح میرایی مربوط به نوسانهای پیچشی بسیار کوچک و تابعی از خروجی توربین ـ ژنراتور است. ثابتهای زمانی مربوط به محو شدن نوسانهای پیچشی بین ۴ تا ۳۰ ثانیه می‌باشد.

مکانیزمهای مختلفی که در میراییِ پیچشی نقش دارند پیچیده و پیش‌بینی نقش آنها مشکل است. درجهٔ بالایی از قابلیت تغییر در میرایی مُد پیچشی، حتی بین واحدهای مشابه نیز وجود دارد. بهترین روش، تعیین سطوحِ میراییِ واقعی از طریق آزمایشهای پُست می‌باشد [۳].

در مدل به‌کار گرفته شده برای سیستم محور، فرض شده است که کلیه منابع میرایی را می‌توان برحسب گشتاورهای میرایی متناسب با انحرافات سرعت جرمهای منفرد، نمایش داد. به عبارت دیگر، گشتاورهای میرایی بین روتورها قابل صرفنظر فرض شده‌اند.

معادلات سیستم محور

به دست آوردن معادلات جرمهای منفرد را با درنظر گرفتن روتورهای ژنراتور و توربین LP_A (شکل ۱۵ ـ ۲) نشان می‌دهیم.

مؤلفه‌های مختلف گشتاور متناظر با روتور ژنراتور، عبارتند از:

$$\text{گشتاور ورودی} = T_{12} = K_{12}(\delta_2 - \delta_1)$$

$$\text{گشتاور خروجی} = T_e$$

$$\text{گشتاور میرایی} = D_1(\Delta\omega_1)$$

$$\text{گشتاور شتاب‌دهنده} = T_a = T_{12} - T_e - D_1\Delta\omega_1$$

معادلات حرکت روتور ژنراتور عبارتند از:

$$2H_1 \frac{d(\Delta\omega_1)}{dt} = T_a = K_{12}(\delta_2 - \delta_1) - T_e - D_1(\Delta\omega_1)$$

$$\frac{d(\delta_1)}{dt} = (\Delta\omega_1)\omega_0$$

به طور مشابه، در زیر معادلات بخش توربین LP_A آورده شده است:

$$\text{گشتاور ورودی} = T_{LP_A} + T_{23} = T_{LP_A} + K_{23}(\delta_3 - \delta_2)$$

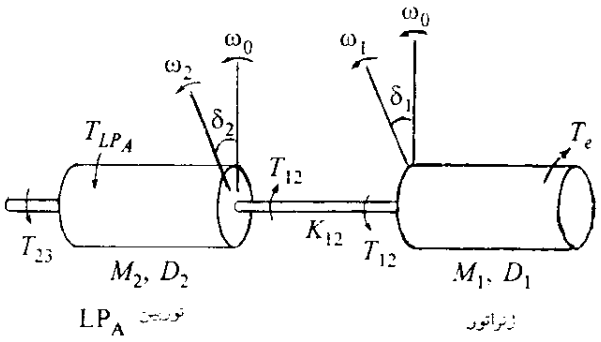
$$\text{گشتاور خروجی} = T_{12} = K_{12}(\delta_2 - \delta_1)$$

$$\text{گشتاور میرایی} = D_2(\Delta\omega_2)$$

معادلات حرکت:

$$2H_2 \frac{d(\Delta\omega_2)}{dt} = T_{LP_A} + K_{23}(\delta_3 - \delta_2) - K_{12}(\delta_2 - \delta_1) - D_2(\Delta\omega_2)$$

$$\frac{d\delta_2}{dt} = (\Delta\omega_2)\omega_0$$



شکل ۱۵ ـ ۲

مثال ۱۵ ـ ۱

داده‌های قابل اعمال به یک مدل پیچشی پنج جرمه (شکل ۱۵ ـ ۱ را ببینید) مربوط به یک واحد هسته‌ای (چهارقطب) ۹۶۰ MVA، ۲۴ KV، ۰/۹ pf، ۱۸۰۰ r/min با یک تحریک کنندهٔ استاتیکی به صورت زیر است:

شمارهٔ جرم	روتور	کسر توان*	WR^2 $lb.ft^2$	بخش محور	سختی lb.ft/rad
۱	ژنراتور	—	۱,۱۱۴,۳۸۲	$GEN - LP_A$	۲۷۹,۸۲۳,۳۷۳
۲	LP_A	۰/۲۴	۱,۸۳۱,۳۸۹	$LP_A - LP_B$	۲۳۵,۲۰۴,۶۴۷
۳	LP_B	۰/۲۴	۱,۸۳۰,۹۷۲	$LP_B - LP_C$	۲۰۷,۷۸۶,۸۶۴
۴	LP_C	۰/۲۴	۱,۸۳۰,۴۱۷	$LP_C - HP$	۱۳۳,۵۳۰,۲۱۹
۵	HP	۰/۲۸	۲۲۵,۲۴۰		

* بخشی از کل توان توربین تولید شده با بخشهای متناظر توربین در حالت ماندگار

الف) ثابت لختی H را برحسب MW.s / MWA و برای هر کدام از پنج جرم و سختی K، برحسب گشتاور مبنای واحد بر رادیان الکتریکی برای هر چهار بخش محور تعیین کنید.

ب) مقدار حالت ماندگار گشتاورِ انتقال داده شده توسط هر بخش محور و جابجاییِ زاویه‌ای بین ژنراتور و بخش توربین HP را، هنگامی که ژنراتور در خروجی نامی کار می‌کند، محاسبه کنید.

حل

الف) گشتاور لختی روتور بخش HP (جرم ۵) عبارت است از:

$$J_5 = (WR^2\ lbft^2)\ \frac{1/356}{32/2}$$

$$= 225.240 \times \frac{1/356}{32/2}$$

$$= 9485/3\ Kg.m^2$$

ثابت لختی متناظر برابر است با:

$$H_5 = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi\ r/min}{60}\right)^2 \frac{1}{\text{نامی}\ VA}$$

$$= \frac{1}{2} \times 9485/3 \times \left(\frac{2\pi \times 1800}{60}\right)^2 \frac{1}{960 \times 10^6}$$

$$= 0/1755\ MW.s / MVA$$

معادلات سیستم کامل روتور نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۱ را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

ژنراتور:

$$2H_1 \frac{d(\Delta\omega_1)}{dt} = K_{12}(\delta_2 - \delta_1) - T_e - D_1(\Delta\omega_1)$$

$$\frac{d(\delta_1)}{dt} = (\Delta\omega_1)\omega_0$$

LP_A:

$$2H_2 \frac{d(\Delta\omega_2)}{dt} = T_{LP_A} + K_{23}(\delta_3 - \delta_2) - K_{12}(\delta_2 - \delta_1) - D_2(\Delta\omega_2)$$

$$\frac{d(\delta_2)}{dt} = (\Delta\omega_2)\omega_0$$

LP_B:

$$2H_3 \frac{d(\Delta\omega_3)}{dt} = T_{LP_B} + K_{34}(\delta_4 - \delta_3) - K_{23}(\delta_3 - \delta_2) - D_3(\Delta\omega_3)$$

$$\frac{d(\delta_3)}{dt} = (\Delta\omega_3)\omega_0 \qquad (۴ - ۱۵)$$

IP:

$$2H_4 \frac{d(\Delta\omega_4)}{dt} = T_{IP} + K_{45}(\delta_5 - \delta_4) - K_{34}(\delta_4 - \delta_3) - D_4(\Delta\omega_4)$$

$$\frac{d(\delta_4)}{dt} = (\Delta\omega_4)\omega_0$$

HP:

$$2H_5 \frac{d(\Delta\omega_5)}{dt} = T_{HP} - K_{45}(\delta_5 - \delta_4) - D_5(\Delta\omega_5)$$

$$\frac{d(\delta_5)}{dt} = (\Delta\omega_5)\omega_0$$

در موقعیت گذرا، گشتاور فاصلهٔ هوایی ژنراتور با دینامیک ژنراتور و سیستم قدرتی که به آن متصل است، تعیین می‌شود. گشتاورهای ایجاد شده با بخشهای منفرد توربین (به عبارت دیگر، T_{HP}، T_{IP}، T_{LP_A} و T_{LP_B})، به دینامیک توربین بخار و سیستم کنترل آن وابسته است (فصل ۹ را ببینید).

گشتاور انتقال داده شده با بخش محور بین ژنراتور و LP_A برابر است با:

$$T_{۱۲} = T_e = ۰/۹ \text{ pu}$$

بنابراین، روتور LP_A از روتور ژنراتور به اندازهٔ زاویهٔ زیر جلوتر است:

$$\delta_{۲۱} = \delta_۲ - \delta_۱ = T_{۱۲} / K_{۱۲}$$
$$= ۰/۹ / ۳۷/۲۵ = ۰/۰۲۴۱۶ \quad \text{(رادیان الکتریکی)}$$

گشتاور انتقال داده شده به وسیلهٔ محور بین بخشهای توربین LP_A و LP_B به صورت زیر است:

$$T_{۲۳} = T_{۱۲} - T_{LP_A} = ۰/۹ - ۰/۲۱۶ = ۰/۶۸۴ \text{ pu}$$

از این‌رو:

$$\delta_{۳۲} = \delta_۳ - \delta_۲ = T_{۲۳} / K_{۲۳}$$
$$= ۰/۶۸۴ / ۳۱/۳۱ = ۰/۰۲۱۸۵ \quad \text{(رادیان الکتریکی)}$$

به‌طور مشابهی:

$$\delta_{۴۳} = \delta_۴ - \delta_۳ = T_{۳۴} / K_{۳۴}$$
$$= (۰/۶۸۴ - ۰/۲۱۶) / ۲۷/۶۶ = ۰/۰۱۶۹۲ \quad \text{(رادیان الکتریکی)}$$

و

$$\delta_{۵۴} = \delta_۵ - \delta_۴ = T_{۴۵} / K_{۴۵}$$
$$= ۰/۲۵۲ / ۱۷/۷۸ = ۰/۰۱۴۱۷ \quad \text{(رادیان الکتریکی)}$$

بنابراین، روتور بخش HP به مقدار زیر از روتور ژنراتور جلوتر است:

$$\delta_۵ - \delta_۱ = \delta_{۵۴} + \delta_{۴۳} + \delta_{۳۲} + \delta_{۲۱}$$
$$= ۰/۰۱۴۱۷ + ۰/۰۱۶۹۲ + ۰/۰۲۱۸۵ + ۰/۰۲۴۱۶$$
$$= ۰/۰۷۷۱ \quad \text{(رادیان الکتریکی)}$$
$$= ۴/۴۲ \quad \text{(درجهٔ الکتریکی)}$$

۱۵ ـ ۱ ـ ۲ فرکانسهای طبیعی پیچشی و صورتهای مُد

فرکانسهای طبیعی و صورتهای مُد را می‌توان با بکارگیری تحلیل مُدال توصیف شده در فصل

به‌طور مشابهی، ثابتهای لختی سایر جرمها عبارتند از:

LP_C بخش : $H_۴ = ۱/۴۲۷۰$

LP_B بخش : $H_۳ = ۱/۴۲۷۵$

LP_A بخش : $H_۲ = ۱/۴۲۷۸$

ژنراتور : $H_۱ = ۰/۸۶۸۸$

سختی پیچشی محور بین بخشهای توربین HP و LP_c عبارت است از:

$$K_{۲۵} = ۱/۳۵۶\ K \quad lb.ft / rad$$
$$= ۱/۳۵۶ \times ۱۳۳,۵۳۰,۲۱۹$$
$$= ۱۸۱,۰۶۶,۹۸۰ \quad Nm / \text{رادیان مکانیکی}$$

با بیان این مقدار برحسب گشتاور مبنای واحد بر رادیان الکتریکی داریم:

$$K_{۲۵} = \frac{۱۸۱,۰۶۶,۹۸۰}{VA_{base}} \left[\frac{۴\omega_۰}{P_f^۲} \right]$$

$$= \frac{۱۸۱,۰۶۶,۹۸۰}{۹۶۰ \times ۱۰^۶} \times \frac{۴ \times ۳۷۷}{۴^۲}$$

$$= ۱۷/۷۸\ pu \quad \text{گشتاور / رادیان الکتریکی}$$

سختی پیچشی بخشهای دیگر محور توصیف شده برحسب گشتاور pu بر رادیان الکتریکی عبارتند از:

$LP_C - LP_B$: $K_{۳۴} = ۲۷/۶۶$

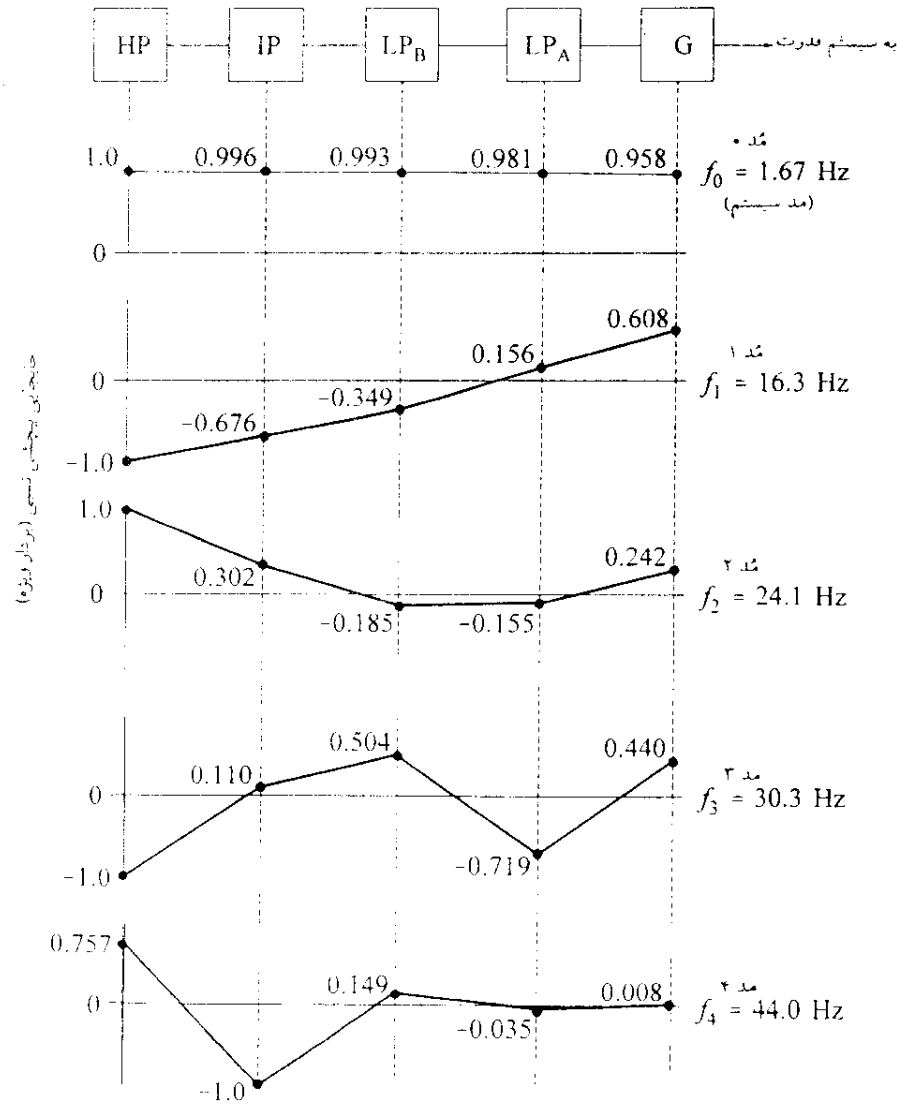
$LP_B - LP_A$: $K_{۲۳} = ۳۱/۳۱$

$LP_A - GEN$: $K_{۱۲} = ۳۷/۲۵$

ب) گشتاور فاصلهٔ هوایی (T_e) در مبنای واحد بر پایهٔ ۹۶۰ MVA برابر با ۰/۹ است.
گشتاورهای ایجاد شده به وسیلهٔ قسمتهای مختلف توربین عبارتند از:

$$T_{LP_A} = T_{LP_B} = T_{LP_C} = ۰/۲۴ \times ۰/۹ = ۰/۲۱۶\ pu$$
$$T_{HP} = ۰/۲۸ \times ۰/۹ = ۰/۲۵۲\ pu$$

H (MW·s/MVA)	0.124	0.232	1.155	1.192	0.855
K (pu گشتاور /rad)	21.8	48.4	75.6	62.3	1.98



شکل ۱۵ ـ ۳ فرکانسهای طبیعی روتور و صورت مدهای یک توربین ژنراتور بخار ۵۵۵ MVA، ۳,۶۰۰ r/min.

دوازدهم تعیین کرد. برای این تحلیل معادلهٔ ۱۵ ـ ۴ را باید به صورت فضای حالت نوشت:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\,\mathbf{x} \qquad (۵ - ۱۵)$$

برای یک انحراف کوچک، می‌توان گشتاور فاصلهٔ هوایی ژنراتور را به صورت زیر بیان کرد:

$$T_e = K_S\,\Delta\delta_۱ \qquad (۶ - ۱۵)$$

که در آن K_S ضریب گشتاور سنکرون کننده است (فصل ۱۲، بخش ۱۲ ـ ۳ را ببینید).

معادلات خطی شدهٔ سیستم روتور را می‌توان با بررسی معادلهٔ ۱۵ ـ ۴ نوشت. برای مثال، معادلات روتور ژنراتور عبارتند از:

$$\frac{d(\Delta\omega_۱)}{dt} = -\frac{D_۱}{۲H_۱}(\Delta\omega_۱) - \frac{K_{۱۲} + K_S}{۲H_۱}(\Delta\delta_۱) + \frac{K_{۱۲}}{۲H_۱}(\Delta\delta_۲)$$

$$\frac{d(\Delta\delta_۱)}{dt} = \omega_۰(\Delta\omega_۱)$$

و معادلات بخش توربین LP_A برابر است با:

$$\frac{d(\Delta\omega_۲)}{dt} = \frac{K_{۱۲}}{۲H_۲}(\Delta\delta_۱) - \frac{D_۲}{۲H_۲}(\Delta\omega_۲) - \frac{K_{۱۲} + K_{۲۳}}{۲\,H_۲}(\Delta\delta_۲) + \frac{K_{۲۳}}{۲H_۲}(\Delta\delta_۳)$$

$$\frac{d(\Delta\delta_۲)}{dt} = \omega_۰(\Delta\omega_۲)$$

در اینجا، فرض می‌کنیم که گشتاور مکانیکی T_{LP_A} ناشی از قسمت توربین، ثابت است.

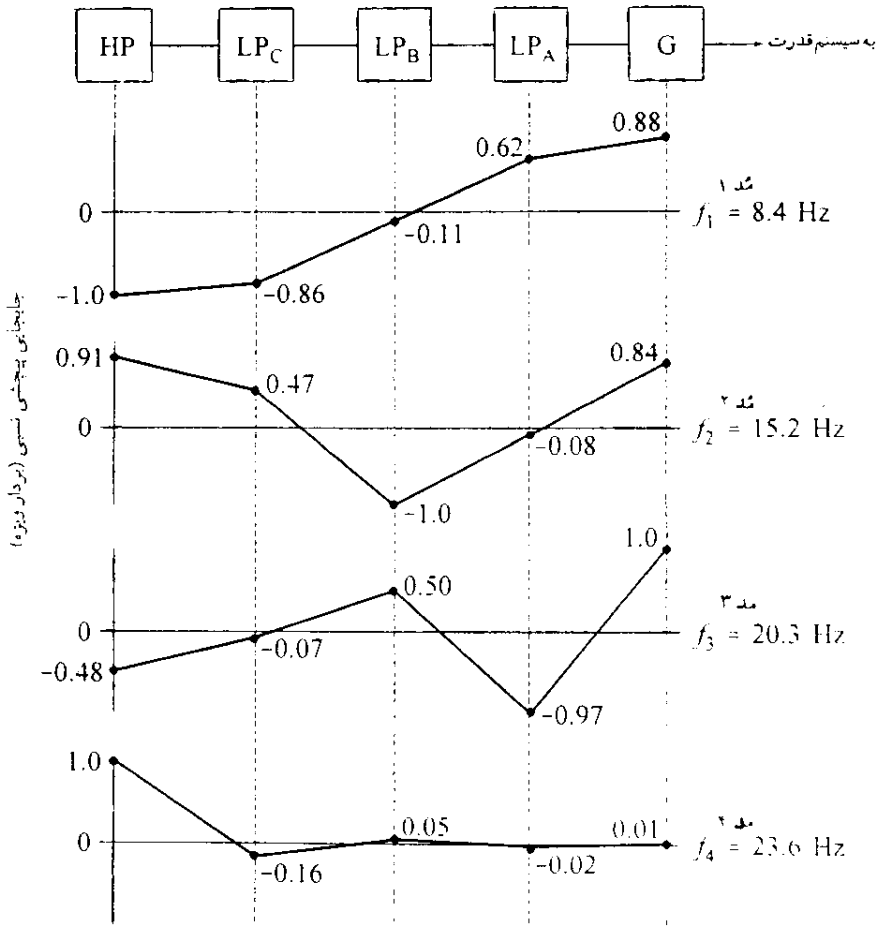
بنابراین متغیرهای حالت، انحرافات سرعت ($\Delta\omega_i$) و زاویهٔ روتور ($\Delta\delta_i$ با $i = ۱, \ldots, ۵$) هستند. عناصر ماتریس حالت **A** سیستم روتور به ضرایب سختی پیچشی، ثابتهای لختی هر یک از جرمها و ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ ژنراتور (K_S) بستگی دارند.

مقادیر ویژهٔ **A** فرکانسهای طبیعی سیستم محور و بردارهای ویژهٔ متناظر، «صورت مُد» (به عبارت دیگر، فعالیت نسبی متغیر حالت در مُد داده شده) را می‌دهند.

مثالهایی از مشخصه‌های پیچشی

شکل ۱۵ ـ ۳ فرکانسهای طبیعی و صورت مُدهای روتور یک واحد تولید سوخت فسیلی ۵۵۵ MVA، ۳,۶۰۰ r/min با تحریک کنندهٔ استاتیکی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل، ثابتهای لختی جرمها و سختی بخشهای محور متصل کنندهٔ آنها نشان داده شده است. ضریب

H (MW·s/MVA)	0.176	1.427	1.428	1.428	0.869
K (pu گشتاور rad)	17.78	27.66	31.31	37.25	



شکل ۱۵ ـ ۴ فرکانسهای طبیعی پیچشی و صورت مُدهای توربین ژنراتور ۹۶۰ MVA، ۱،۸۰۰ r/min.

گشتاور سنکرون کننده (سختی الکتریکی) K_S، برابر با ۱/۹۸ گشتاور مبنای واحد بر رادیان می‌باشد. ضرایب میرایی، قابل صرفنظر فرض می‌شوند که این موضوع تأثیری بر محاسبهٔ فرکانسهای طبیعی یا صورت مُد ندارند.

از آنجا که روتور را با پنج جرم درنظر می‌گیریم، پنج مُد نوسانی وجود دارد. فرکانسهای طبیعی، که با مؤلفه‌های موهومی مقادیر ویژهٔ ماتریس **A** داده می‌شوند عبارتند از: HZ ۱/۶۷، HZ ۱۶/۳۵، HZ ۲۴/۱، HZ ۳۰/۳ و HZ ۴۴/۰.

برای هر مُد نوسان، جابجاییهای پیچشیِ نسبی جرمهای منفرد با بردار ویژهٔ راستِ مقدار ویژهٔ متناظر داده می‌شود و می‌توان از عناصر بردار ویژهٔ متناظر با انحرافات سرعت یا انحرافات زاویه، استفاده کرد. در نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۳، هر بردار ویژه به صورتی نرمالیزه شده است تا بزرگترین عنصر آن مساوی ۱/۰ باشد.

مُد HZ ۱/۶۷، نوسان کل روتور را در مقابل سیستم قدرت نشان می‌دهد. این مُدی است که معمولاً در مطالعات پایداری سیستم درنظر گرفته می‌شود. این مُد به ضریب گشتاور سنکرون کنندهٔ K_S و مجموع ثابتهای لختی کلیهٔ جرمهای روتور بستگی دارد. همان‌طور که از صورت مُد مشاهده می‌شود، هر پنج جرم تقریباً به طور مساوی در این مُد شرکت دارند.

چهار مُد دیگر مُدهای پیچشیِ نوسان را نشان می‌دهند. اولین مُد پیچشی، فرکانس طبیعیِ HZ ۱۶/۳ دارد و دارای تغییر پلاریته‌ای در صورت مُد است. پلاریته‌های عناصر بردار ویژهٔ متناظر با روتورهای ژنراتور و بخش LP_A مخالف با پلاریته‌های بخشهای LP_B، IP و HP است و نشان می‌دهد هنگامی که این مُد تحریک می‌شود، ژنراتور و روتورهای LP_A برخلاف سه روتور دیگر نوسان می‌کنند.

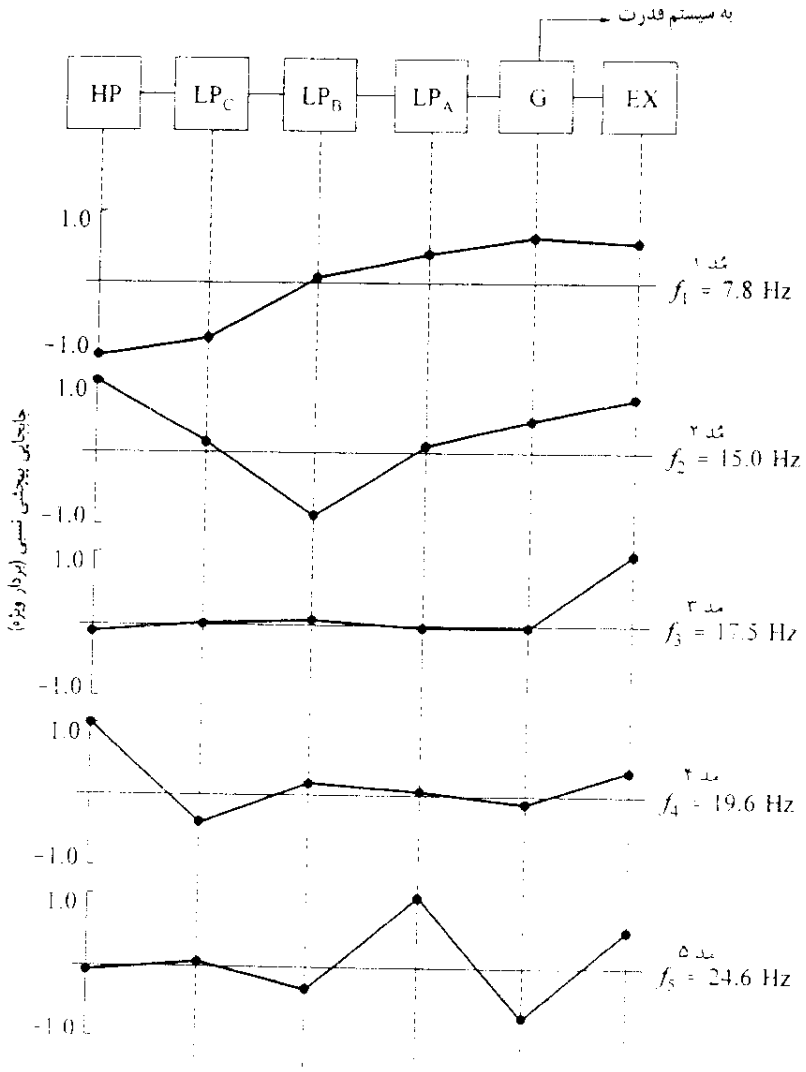
دومین مُد پیچشی فرکانس طبیعی HZ ۲۴/۱ و صورت مُد آن دو تغییر پلاریته دارد. سومین مُد پیچشی، با فرکانس طبیعی HZ ۳۰/۳، سه تغییر پلاریته در صورت مُد خود دارد. سرانجام، چهارمین مُد پیچشی با فرکانس طبیعی HZ ۴۴/۰، صورت مُدی با چهار تغییر پلاریته دارد.

در شکل ۱۵ ـ ۳، روتورهای ژنراتور و بخش LP_A، جابجایی چرخشیِ چهارمین مُد پیچشی دارای دامنه‌های نسبی بسیار پایینی هستند. این بدان معنی است که بسادگی نمی‌توان با اعمال گشتاورها به روتورهای ژنراتور و توربین LP_A این مُد را تحریک کرد.

در حالت کلی، روتوری با n جرم، n - ۱ مُد پیچشی دارد. مُد پیچشی i، بالاترین فرکانس پیچشی i را داشته، صورت مُد آن i تغییر پلاریته دارد.

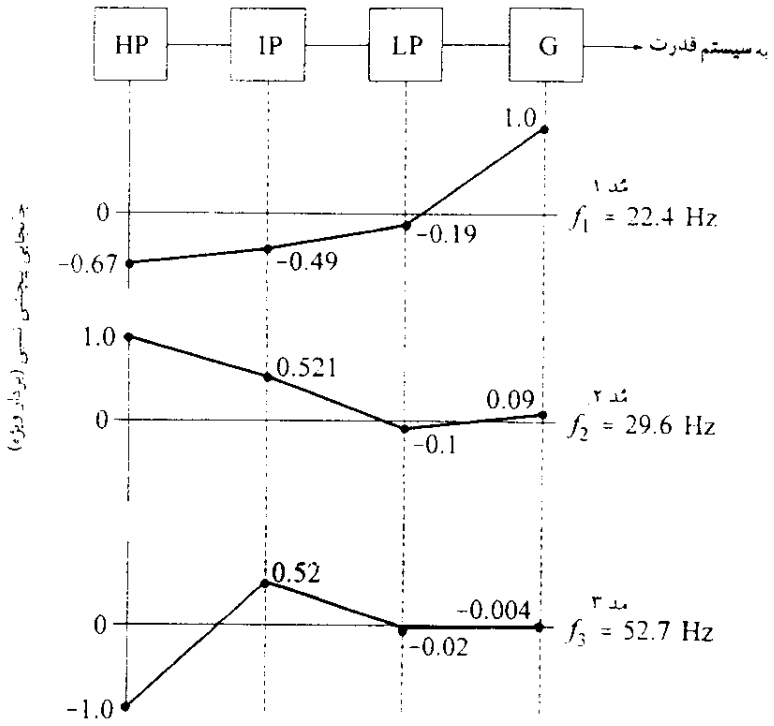
شکلهای ۱۵ ـ ۴ تا ۱۵ ـ ۶ مثالهایی اضافی از مشخصه‌های پیچشی را نشان می‌دهند. در این شکلها، فقط مُدهای پیچشی نشان داده مُد سیستم حذف شده است.

H (MW·s/MVA)	0.254	0.983	1.001	1.009	1.035	0.013
K (pu گشتاور/rad)		13.9	18.2	25.2	54.9	5.7



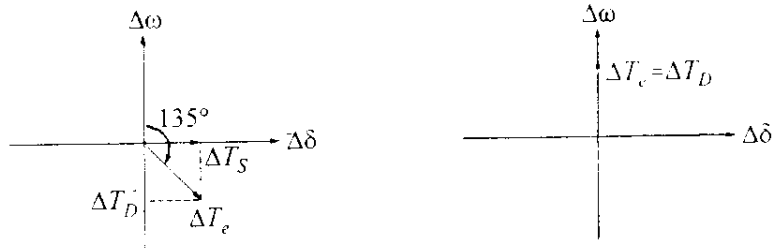
شکل ۱۵ ـ ۶ فرکانسهای طبیعی پیچشی و صورتهای مُدهای توربین ژنراتور ۶۳۵ MVA، ۱,۸۰۰ r/min با تحریک‌کنندهٔ چرخشی.

H (MW·s/MVA)	0.099	0.337	3.68	0.946
K (pu گشتاور/rad)	37.95	81.91	82.74	



شکل ۱۵ ـ ۵ فرکانسهای طبیعی پیچشی و صورت مُدهای یک توربین ژنراتور ۱۹۱ MVA، ۳،۶۰۰ r/min.

لامبتون می‌باشد، مشاهده کرد. سرعت اندازه گرفته شدهٔ محور در انتهای ژنراتور یک مؤلفه‌ای بزرگ با مُد پیچشی HZ ۱۶ دارد. تابع تبدیل پایدار ساز به گونه‌ای طراحی شده است تا اختلاف فاز صفر را بین سیگنال سرعت ورودی و گشتاور فاصلهٔ هوایی در فرکانس مُد سیستم (HZ ۱/۶)، بوجود آورد، بدین ترتیب همان طور که در شکل ۱۵ ـ ۷ «الف» نشان داده شده است، مؤلفهٔ گشتاور میرایی خالص، به دست خواهد آمد (فصل ۱۲ را ببینید). لیکن، مشخصه‌های ژنراتور به گونه‌ای است که این مؤلفه، به پس‌فازی در حدود °۱۵ در HZ ۱۶ منجر می‌شود [۸]. درنتیجه همان‌طور که در شکل ۱۵ ـ ۷ «ب» نشان داده شده است، یک مؤلفهٔ گشتاور میرایی منفی تولید می‌شود و از این‌رو ناپایداری مُد پیچشیِ HZ ۱۶ خواهیم داشت.



(الف) گشتاور میرایی خالص در ۱/۶۷ هرتز (ب) گشتاور میرایی منفی و گشتاور سنکرون‌کنندهٔ مثبت در ۱۶ هرتز

شکل ۱۵ ـ ۷ مؤلفه‌های گشتاور ناشی از PSS

این مسأله با اندازه‌گیری سرعتِ بین دو بخش توربین LP، نزدیک به «گره»[1] مُد پیچشیِ HZ ۱۶ حل شد (شکل ۱۵ ـ ۳ را ببینید). در این موقعیتِ اندازه‌گیری سرعت، سایر مُدهای پیچشی نیز دامنهٔ بسیار پایینی دارند. به علاوه، از یک فیلتر الکترونیکی، به شکل شیاری[2] در HZ ۱۶ و تضعیف زیاد سایر فرکانسهای پیچشی، در مسیر پایدارسازی استفاده شد.

روش تحلیل مدال توضیح داده شده در فصل ۱۲، برای بررسی مسائل پایداری پیچشی بسیار مناسب است. این روش در مثال ۱۵ ـ ۲ نشان داده شده است.

همچنین ممکن است ناپایداری مُد پیچشی از طریق کنترل تحریک، به وسیلهٔ یک محدودکنندهٔ ولتاژِ پایانه رخ دهد که از طریق یک بهرهٔ بسیار زیاد، پایانه را برای کنترل تحریک به کار می‌گیرد [۸]. این موضوع ممکن است باعث ناپایداری پیچشی گردد، مگر آنکه نوعی فیلتر کردن برای تضعیف مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال ولتاژ فراهم شود.

1. Node 2. Notch

مشخصهٔ پیچشیِ شکل ۱۵ ـ ۴، مربوط به یک واحد هسته‌ای (چهار قطب) MVA ۹۶۰، r/min ۱۸۰۰ می‌باشد (که در مثال ۱۵ ـ ۱ درنظر گرفته شده بود). این واحد یک بخش توربین HP و سه بخش توربین LP دارد. فرکانسهای پیچشی آن HZ ۸/۴، HZ ۱۵/۲، HZ ۲۰/۳ و HZ ۲۳/۶ می‌باشند.

شکل ۱۵ ـ ۵ مشخصه‌های پیچشی یک واحد سوخت زغال سنگ (دوقطب) MVA ۱۹۱، r/min ۳۶۰۰ را با تحریک کنندهٔ استاتیکی نشان می‌دهد. این واحد سه بخش توربین: HP، IP و یک LP دارد. از این‌رو، روتور با چهار جرم فشرده نمایش داده شده است. فرکانسهای پیچشیِ اصلی عبارتند از، HZ ۲۲/۴، HZ ۲۹/۶ و HZ ۵۲/۷.

شکل ۱۵ ـ ۶ مشخصه‌های پیچشی یک واحد (چهار قطب) MVA ۶۳۵، r/min ۱۸۰۰ تحریک کنندهٔ چرخان نشان می‌دهد. در این شکل، روتور با شش جرم فشرده نشان داده شده است.

۱۵ ـ ۲ تداخل پیچشی با کنترلهای سیستم قدرت

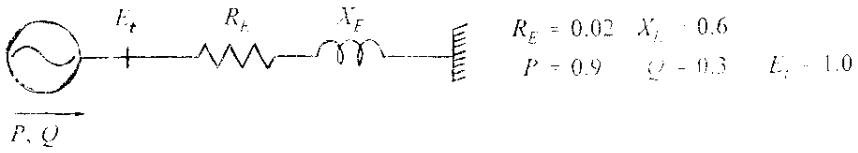
همان‌طور که در بخش قبل بحث شد، نوسانهای پیچشی توربین ژنراتورها ذاتاً به مقدار کمی میرا هستند. سطح میرایی تاحدودی با وضعیت بخار و خروجیِ واحد تغییر می‌کند، اما به طور طبیعی تحت تأثیر واحد تولیدی یا کنترلهای شبکه قرار نمی‌گیرد. لیکن، مواردی نیز وجود داشته است که به واسطهٔ تداخل با تحریک واحد تولید و کنترل توربینها (محرکه‌ها) و نیز با کنترلهای کنورتورهای HVDC نزدیک، لحظه‌هایی از ناپایداری مُد پیچشی پیدا شده است. در این بخش، عوامل پدید آوردندهٔ این مسائل و روشهای تحلیل و معتدل کردن آنها را بررسی می‌کنیم.

۱۵ ـ ۲ ـ ۱ تداخل با کنترلهای تحریک ژنراتور

ناپایداری مُد پیچشی حاصل از کنترل تحریک، نخستین بار در سال ۱۹۶۹ میلادی حین بکارگیری یک پایدارساز سیستم قدرت (PSS) بر روی یک واحد سوخت فسیلی MVA ۵۵۵، r/min ۳۶۰۰ در نیروگاه لامبتون[1] در اونتاریو [۸،۷]، مشاهده شد. PSS که از یک سیگنال پایدارساز براساس سرعت اندازه گرفته شده در انتهای ژنراتورِ محور توربین ـ ژنراتور استفاده می‌کرد، پایین‌ترین مُد پیچشی را تحریک می‌کرد. دلیل این تحریک را می‌توان بسادگی با مشخصه‌های پیچشی نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۳، که مشابه مشخصه‌های واحدهای

1. Lambton

گشتاور مکانیکی تولید شده از هر بخش توربین، ثابت فرض شده است. سیستم به صورت نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۲ م نمایش داده شده است. پارامترهای آن در مبنای واحد بر پایهٔ ۸۸۹ MVA و ۱۸/۵ KV بیان شده‌اند.



شکل ۱۵ ـ ۲ م نمایش سیستم

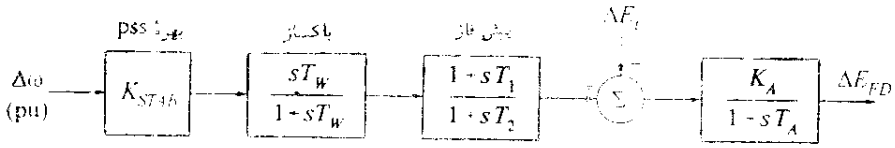
پارامترهای ژنراتور در مبنای واحد بر پایهٔ ۸۸۹ MVA و ۱۸/۵ KV عبارتند از:

X_d = ۱/۷۲ X'_d = ۰/۳۶ X''_d = ۰/۲۴ T'_{do} = ۵/۷ (ثانیه) T''_{do} = ۰/۰۲ (ثانیه)

X_q = ۱/۶۹ X'_q = ۰/۴۰ X''_q = ۰/۲۳ T'_{qo} = ۱/۵ (ثانیه) T''_{qo} = ۰/۰۴ (ثانیه)

ژنراتور به یک تحریک کنندهٔ تریستوری، مجهز شده است. هدف ما بررسی عملکرد سیستم در حالتهای مختلف PSS است:

الف) یک پایدار ساز دلتا ـ امگا با سرعت محور ($\Delta\omega$) به عنوان سیگنال ورودی و با سرعت اندازه گرفته شده در انتهای ژنراتور، در کوپلینگ B؛ در کوپلینگ C؛ در هر دو کوپلینگ B و C. مدل سیستم تحریک در شکل ۱۵ ـ ۳ م نشان داده شده است.



$K_A = 200$ $T_A = 0.005$ s $T_1 = 0.3$ s $T_2 = 0.06$ s $T_W = 1.5$ s

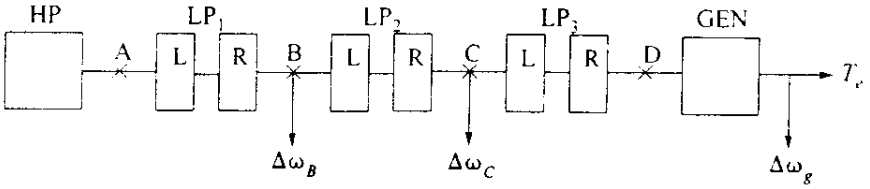
شکل ۱۵ ـ ۳ م تحریک کنندهٔ تریستوری با پایدارساز دلتا ـ امگا

ب) پایدارساری مانند حالت قبل، لیکن با یک فیلتر پیچشی دارای شیاری در ۹ HZ و تضعیف زیاد در فرکانسهای طبیعی پیچشی بالاتر. تابع تبدیل فیلتر عبارت است از:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1 + s^2\, ۰/۰۰۰۳۱۲۵۸}{(1 + s\, ۰/۰۲۲ + s^2\, ۰/۰۰۰۷۵۶)(1 + s\, ۰/۰۱۲ + s^2\, ۰/۰۰۹)}$$

مثال ۱۵ ـ ۲

این مثال اثر PSS را بر پایداری پیچشی یک واحد تولیدی ۸۸۹ MVA، ۱۸/۵ KV، ۱۸۰۰ r/min با یک توربین ترکیبی پشت سر هم، در نظر می‌گیرد. نمایش سیستم محور در شکل ۱۵ ـ ۱ م نشان داده شده است. این شکل، مشابه شکل ۱۵ ـ ۴ است، با این تفاوت که هر بخش توربین LPای دو جریانه[1]، با دو جرم نشان داده شده است.



شکل ۱۵ ـ ۱ م نمایش سیستم محور

داده‌های سیستم محور به صورت زیر است:

جرم	لختی (WR² برحسب lb.ft²)	ضریب میرایی (گشتاور مبنای واحد بر سرعتِ مبنای واحد)
ژنراتور	۱,۰۸۱,۹۲۰	۰
LP_{3L} یا LP_{3R}	۱,۰۵۴,۵۱۲	۰/۱۲۵
LP_{2L} یا LP_{2R}	۱,۰۶۷,۸۵۵	۰/۱۲۵
LP_{1L} یا LP_{1R}	۱,۰۴۸,۳۸۰	۰/۱۲۵
HP	۲۵۸,۰۰۰	۰/۱۲۵

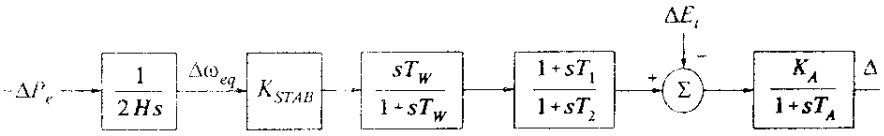
قسمت محور	سختی (lb.ft/rad)	قسمت محور	سختی (lb.ft/rad)
کوپل D - Gen	۸۴۴,۳۹۱,۳۴۲	کوپل B - LP_{2L}	۶۲۵,۹۴۸,۷۰۳
کوپل D - LP_{3R}	۸۵۹,۳۱۶,۹۲۹	کوپل B - LP_{1R}	۶۲۶,۶۸۴,۲۱۴
LP_{3R} - LP_{3L}	۲,۵۴۵,۳۰۶,۴۵۵	LP_{1R} - LP_{1L}	۲,۵۴۸,۳۲۲,۵۶۷
کوپل C - LP_{3L}	۶۲۷,۵۵۵,۳۲۷	کوپل A - LP_{1L}	۵۶۶,۸۱۹,۵۱۹
کوپل C - LP_{2R}	۶۲۸,۲۹۴,۶۲۰	کوپل A - HP	۲۱۲,۷۱۶,۱۷۲
LP_{2R} - LP_{2L}	۲,۵۴۶,۷۶۴,۹۷۲		

1 Double Flow

جدول ۱۵ ـ ۱ م اثر پایدارسازی دلتا ـ امگا بدون مدار فیلتر پیچشی

K_{STAB}	موقعیّت اندازه‌گیری سرعت	مُدهای پیچشی				مُد سیستم	مد تحریک کننده
		۹ Hz	۱۷ Hz	۲۳ Hz	۲۴ Hz		
۰/۰	–	−۰/۰۵ ± ج۵۶/۲	−۰/۰۷ ± ج۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± ج۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± ج۱۵۱/۲	+۰/۲۳ ± ج۵/۷	–
۹/۵	ژنراتور	+۰/۳۱ ± ج۵۷/۶	−۰/۲۰ ± ج۱۰۶/۰	+۰/۲۴ ± ج۱۴۶/۴	−۰/۰۶ ± ج۱۵۱/۳	−۰/۷۳ ± ج۵/۰	−۱۳/۷ ± ج۱۳/۱
۹/۵	کوپل B	−۰/۲۵ ± ج۵۵/۳	−۰/۱۷ ± ج۱۰۵/۶	−۰/۰۱ ± ج۱۴۶/۲	−۰/۱۹ ± ج۱۵۱/۲	−۰/۷۵ ± ج۵/۰	−۱۶/۷ ± ج۱۳/۹
۱۹/۰	کوپل B	−۰/۴۷ ± ج۵۴/۳	−۰/۲۸ ± ج۱۰۵/۵	+۰/۰۷ ± ج۱۴۶/۳	−۰/۲۰ ± ج۱۵۱/۲	−۱/۲۰ ± ج۴/۲	−۱۴/۵ ± ج۱۹/۷
۹/۵	کوپل C	+۰/۰۶ ± ج۵۶/۶	−۰/۲۶ ± ج۱۰۵/۵	−۰/۲۱ ± ج۱۴۶/۱	−۰/۱۸ ± ج۱۵۱/۲	−۰/۷۴ ± ج۵/۰	−۱۵/۵ ± ج۱۳/۷
۱۹/۰	کوپل C	+۰/۲۰ ± ج۵۷/۰	−۰/۴۶ ± ج۱۰۵/۳	−۰/۳۱ ± ج۱۴۶/۱	−۰/۱۹ ± ج۱۵۱/۲	−۱/۲۰ ± ج۴/۲	−۱۲/۸ ± ج۱۸/۵
۹/۵	هم B و هم C	−۰/۱۰ ± ج۵۶/۰	−۰/۲۲ ± ج۱۰۵/۵	−۰/۱۱ ± ج۱۴۶/۱	−۰/۱۹ ± ج۱۵۱/۲	−۰/۷۴ ± ج۵/۰	−۱۶/۱ ± ج۱۳/۸
۱۹/۰	هم B و هم C	−۰/۱۶ ± ج۵۵/۷	−۰/۳۷ ± ج۱۰۵/۴	−۰/۱۲ ± ج۱۴۶/۱	−۰/۲۰ ± ج۱۵۱/۲	−۱/۲۰ ± ج۴/۲	−۱۳/۶ ± ج۱۹/۱
۲۸/۵	هم B و هم C	−۰/۲۲ ± ج۵۵/۵	−۰/۵۲ ± ج۱۰۵/۲	−۰/۱۳ ± ج۱۴۶/۱	−۰/۲۱ ± ج۱۵۱/۲	−۱/۳۶ ± ج۳/۶	−۱۱/۹ ± ج۲۲/۹

ج) یک پایدار ساز با انحراف توان الکتریکی (دلتا ـ P) به عنوان سیگنال پایدار کننده، همانطور که در شکل ۱۵ ـ ۴ م نشان داده شده است. این سیستم مشابه شکل ۱۵ ـ ۳ م است، با این تفاوت که به جای سرعت واقعیِ محور، از سرعت معادل ($\Delta\omega_{eq}$) به دست آمده از توان الکتریکی استفاده می‌شود.



شکل ۱۵ ـ ۴ م تحریک کنندهٔ تریستوری با پایدارساز دلتا ـ امگا

تحلیل

الف) پایدارساز دلتا ـ امگا: اثر PSS را با استفاده از روش تحلیل مُدال توضیح داده شده در فصل دوازدهم بررسی می‌کنیم. این تحلیل اثر اندازه‌گیری سرعت ($\Delta\omega$) را در موقعیتهای مختلف بر روی محور در نظر می‌گیرد. برای هر حالت، دو یا سه مقدار برای بهرهٔ پایدارساز K_{STAB} در نظر گرفته می‌شود و بدین ترتیب اثر تغییر بهره نشان داده خواهد شد. نتایج، در جدول ۱۵ ـ ۱ م، به فهرست کردن شش جفت مقدار ویژه، آورده شده است. این نتایج، شش مُد را که از نظر کاربرد پایدارسازی مهم هستند، نشان می‌دهند. مؤلفهٔ موهومی هر جفت مختلط از مقادیر ویژه، فرکانس نوسان را برحسب رادیان بر ثانیه به دست می‌دهد. مؤلفهٔ حقیقی آهنگ میرایی دامنهٔ نوسان را می‌دهد (فصل ۱۲ را ببینید).

اولین چهار مُدی که در جدول ۱۵ ـ ۱م آورده شده، مُدهای پیچشی غالب را نشان می‌دهند. پنجمین مُد، که به عنوان مُد سیستم شناسایی شده است، متناظر با نوسان روتور ژنراتور نسبت به سایر قسمتهای سیستم قدرت می‌باشد. دلیل بکارگیری فیدبک سیگنال سرعت به تحریک کننده، بهبود میرایی مُد سیستم است. ششمین مُد، که به عنوان مُد تحریک کننده شناسایی شده، به طور عمده مربوط به ولتاژ تحریک است و تنها در صورت پایدارسازی سرعت وجود دارد. این مُد معمولاً بشدت میراست و فقط در مقادیر بالای K_{STAB}، ناپایدار می‌شود. یکی از ملاحظات در انتخاب پارامترهای مدار فیدبک سیگنال سرعت، به دست آوردن حداکثر میرایی از مُد سیستم بدون قربانی کردن میرایی مُد تحریک کننده به میزان زیاد است.

از نتایج مشاهده می‌کنیم که بدون پایدارسازی سیگنال سرعت ($K_{STAB} = 0$)، مُد سیستم قسمت حقیقی مثبت دارد که نشان‌دهندهٔ ناپایداری سیگنال کوچک است. مقادیر ویژهٔ مربوط به

جدول ۱۵ ـ ۲ م اثر پایدارسازی دلتا ـ امگا با فیلتر پیچشی

K_{STAB}	موقعیّت اندازه‌گیری سرعت	مُدهای پیچشی				مُد سیستم	مد تحریک کننده
		۹ Hz	۱۷ Hz	۲۳ Hz	۲۴ Hz		
۰/۰	–	−۰/۰۵ ± j۵۶/۲	−۰/۰۷ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	+۰/۲۳ ± j۵/۷	–
۹/۵	ژنراتور	−۰/۰۶ ± j۵۶/۶	−۰/۰۷ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۱ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	−۰/۹۱ ± j۵/۱	−۱۰/۴ ± j۱۵/۸
۹/۵	کوپل B	−۰/۰۵ ± j۵۶/۲	−۰/۰۷ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	−۰/۹۴ ± j۵/۰	−۸/۱ ± j۱۴/۱
۱۹/۰	کوپل B	−۰/۰۵ ± j۵۶/۲	−۰/۰۶ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	−۱/۴۲ ± j۴/۱	−۱/۹ ± j۲۰/۵
۹/۵	کوپل C	−۰/۰۶ ± j۵۶/۲	−۰/۰۷ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	−۰/۹۲ ± j۵/۰	−۱۰/۵ ± j۲۰/۰
۱۹/۰	کوپل C	−۰/۰۶ ± j۵۶/۲	−۰/۰۶ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	−۱/۴۱ ± j۴/۲	−۳/۲ ± j۲۰/۰
۹/۵	هم B و هم C	−۰/۰۵ ± j۵۶/۲	−۰/۰۷ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	−۰/۹۳ ± j۵/۰	−۹/۴ ± j۲۱/۳
۱۹/۰	هم B و هم C	−۰/۰۵ ± j۵۶/۲	−۰/۰۶ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	−۱/۴۲ ± j۴/۲	−۲/۵ ± j۲۰/۴
۲۸/۵	هم B و هم C	−۰/۰۵ ± j۵۶/۲	−۰/۰۶ ± j۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j۱۵۱/۲	−۱/۵۴ ± j۳/۵	+۰/۵ ± j۲۰/۶

POWEREN.IR

مُدهای پیچشی، بدون پایدارسازی سرعت، سطح اولیهٔ میرایی پیچشی را به دست می‌دهد و به عنوان مرجعی برای اهداف مقایسه‌ای به کار گرفته می‌شود.

نتایج، همچنین نشان می‌دهد که اثر اندازه‌گیری سرعت در انتهای ژنراتور آن است که باعث ناپایداری یا کاهش میرایی هر چهار مُد می‌شود، در حالی که مُد سیستم را به میزان چشمگیری میرا می‌کند.

اندازه‌گیری سرعت، فقط در کوپلینگ B اثر زیادی بر مُد پیچشی ۲۳ HZ دارد، و اندازه‌گیری تنها در کوپلینگ C اثر زیادی بر مُد پیچشی ۹ HZ دارد. نتایجی که با سیگنال سرعتِ اندازه‌گیری شده در سایر موقعیتهای ممکن در طول محور به دست آمده، نشان می‌دهد که هیچ نقطهٔ معین واحدی وجود ندارد که برای همهٔ مُدهای پیچشی قابل قبول باشد.

لیکن مشاهده شده که ترکیبی از سیگنالهای اندازه‌گیری شده در کوپلینگ‌های B و C اثر مطلوبی بر کلیهٔ چهار مُد پیچشی داشته است. مُد سیستم به موقعیت اندازه‌گیریِ سرعت، حساس نیست و فقط به بهرهٔ پایدارساز بستگی دارد. مُد تحریک کننده در تمام بازهٔ در نظر گرفته شده برای بهرهٔ پایدارساز بشدت میرا شده است، اگرچه بهره‌های بالاتر به کاهش اندکی در میرایی آن منجر می‌شود.

ب) *پایدارساز دلتا ـ امگا با فیلتر پیچشی*؛ نتایج تحلیل با فیلتر اضافه شده در حلقهٔ سیگنال سرعت، در جدول ۱۵ ـ ۲ م خلاصه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، اثر فیلتر غیر حساس کردن مُدهای پیچشی نسبت به پایدارسازی سیگنال سرعت است. میرایی مُد سیستم با فیلتر، از همان مرتبهٔ میرایی بدون فیلتر است. لیکن، فیلتر تأثیر بسزایی بر مُد تحریک کننده دارد. این بدان دلیل است که مشخصهٔ مدار فیلتر به گونه‌ای است که بهره را در گسترهٔ فرکانسی مربوط به مُد تحریک کننده، افزایش می‌دهد. در نتیجه، بهرهٔ سیگنال سرعت باید به مقداری محدود شود که حاشیهٔ پایداری کافی برای مُد تحریک کننده حاصل شود. مقدار محدود کنندهٔ بهره، به امپدانس سیستم خارجی، مشخصه‌های ژنراتور و وضعیت کاری سیستم، بستگی دارد [۹]. با مقدار پایین‌تری از X_E، مُد تحریک کننده، کمتر پایدار است.

ج) *پایدارساز دلتا ـ P*؛ نتایج این بخش، در جدول ۱۵ ـ ۳ م خلاصه شده است و نشان می‌دهد که یک پایدارساز دلتا ـ P بدون پدید آوردن ناپایداری مُدهای پیچشی، مؤثر است. تا آنجا که به مُدهای سیستم و تحریک کننده مربوط می‌شود، بین پایدارساز دلتا ـ P و پایدارساز دلتا ـ امگا بدون فیلتر پیچشی، اختلاف اندکی وجود دارد.

۱۵ ـ ۲ ـ ۲ تداخل با گاورنرهای سرعت

مسألهٔ سیستمهای کنترل سرعت که باعث ناپایداری مُد پیچشی می‌شود، در سال ۱۹۸۳ میلادی حین تحویل یک واحد هسته‌ای ۶۳۵ MVA، ۱۸۰۰ r/min در اونتاریو هایدرو ظاهر شد [۹]. این واحد به یک سیستم کنترل الکتروهیدرولیکی سریع‌العمل مجهز می‌باشد. گاورنر سرعت، سرعت را در انتهای محور توربین HP اندازه‌گیری می‌کند. صورت مُد پیچشی این واحد همانند صورت نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۶ است، که نشان می‌دهد مُدهای پیچشی ۷/۸ Hz، ۱۵ Hz و ۱۹/۶ Hz در سیگنال سرعتِ انتهای محور ظاهر می‌شوند. سیستم کنترل از یک مدار خطی‌ساز الکترونیکی برای جبران مشخصه‌های غیر خطی جریان در برابر موقعیت مکانی شیرهای بخار استفاده می‌کند (فصل ۹، بخش ۹ ـ ۲ را ببینید).

حین آزمونهای تحویل‌گیری، هنگامی که واحد به سطح خروجی ۱۰۰ MW رسید، نوسانهایی غیرعادی در شیرهای کنترلی مشاهده شد. تغییراتی که در مدارهای پیش فاز و خطی ـ ساز شیر صورت گرفت تا حدی نوسانها را برطرف نمود و بارگیری نیز توانست تا ۴۱۵ MW افزایش یابد (حدداً ۸۸٪ خروجی نامی). اما فراتر از این سطح، نوسانهای شدیدی در شیرهای گاورنر مشاهده شد. از این رو تا زمانی که مسأله بررسی و به طور رضایتبخشی حل شد، بار واحد به سطح بی‌خطری کاهش داده شد.

بررسیهای میدانی بیشتر و شبیه‌سازیهای کامپیوتری با استفاده از تحلیل مُدال، دو عامل زیر را که در بروز مشکل نقش داشتند، شناسایی کرد:

الف) عدم دقت مدار خطی‌ساز شیر، خصوصاً در ناحیهٔ ۴۷۵ MW؛ که در نتیجه، شیب افتیِ مؤثر گاورنر، به‌طور ناگهانی با افزایش بارگیری تقریباً با ضریب ۱۲ افزایش پیدا می‌کرد.

ب) پهنای باند زیاد سیستم سرو الکتروهیدرولیکی؛ بزرگی پهنای باند، موجب تداخل زیاد گاورنر در فرکانسهای بالاتر مربوط به مُدهای پیچشی می‌شد.

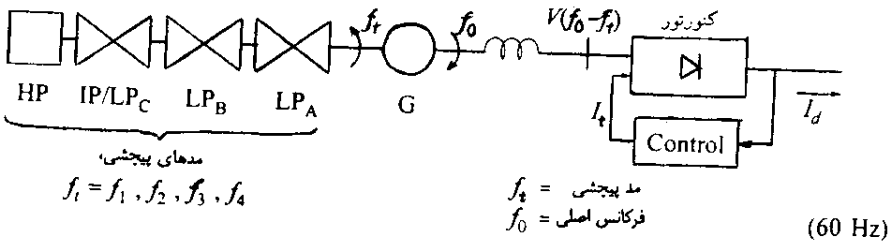
مسأله با خطی‌سازی دقیق مشخصه‌های شیر حل شد و بدین ترتیب شیب افتی بر روی بازهٔ کامل بارگیری، در ۴٪ ثابت نگه داشته شد. علاوه بر این برای احتیاط بیشتر، برای حذف مؤلفه‌های پیچشی از سیگنال سرعت، فیلترهایی به سیستم اضافه شد. در طراحی فیلترها، به عملکرد حین اغتشاشهای شدید سیستم و باربرداری توجه خاصی مبذول شد.

۱۵ ـ ۲ ـ ۳ تداخل با کنورتورهای جریان مستقیم نزدیک

مسألهٔ ناپایداری مُد پیچشیِ زیر سنکرون ناشی از تداخل با کنترلهای سیستمهای HVDC

جدول ۱۵ ـ ۳ م اثر پایدارسازی دلتا ـ P

K_{STAB}	مُدهای پیچشی				مُد سیستم	مد تحریک کننده
	۹ Hz	۱۷ Hz	۲۳ Hz	۲۴ Hz		
۰	−۰/۰۵ ± j ۵۶/۲	−۰/۰۷ ± j ۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j ۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j ۱۵۱/۲	+۰/۲۳ ± j ۵/۷	–
۹/۵	−۰/۰۵ ± j ۵۶/۲	−۰/۰۷ ± j ۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j ۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j ۱۵۱/۲	−۰/۷۵ ± j ۵/۰	−۱۵/۶ ± j ۱۳/۷
۱۹/۰	−۰/۰۵ ± j ۵۶/۲	−۰/۰۷ ± j ۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j ۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j ۱۵۱/۲	−۱/۲۰ ± j ۴/۲	−۱۳/۱ ± j ۱۸/۶
۲۸/۵	−۰/۰۵ ± j ۵۶/۲	−۰/۰۷ ± j ۱۰۵/۷	−۰/۱۰ ± j ۱۴۶/۱	−۰/۱۷ ± j ۱۵۱/۲	−۱/۴۰ ± j ۳/۶	−۱۱/۳ ± j ۲۲/۰



شکل ۱۵ ـ ۸ تداخل پیچشی با کنترل جریان مستقیم

با کنترل هم فاصلهٔ زاویهٔ آتش که در کنورتورهای جدیدِ HVDC به کار گرفته می‌شود، تغییری در فاز ولتاژ ناشی از مُد پیچشی باعث تغییر مشابهی در زاویهٔ آتش می‌شود. این مدولاسیون زاویهٔ آتش، همراه با مدولاسیون دامنهٔ ولتاژ متناوب، به تغییراتی در ولتاژ، جریان و توان مستقیم منجر می‌شود. به منظور اصلاح این تغییرات، کنترل حلقه ـ بستهٔ جریان عکس‌العمل از خود نشان می‌دهد. به نوبهٔ خود، این عکس‌العمل، به صورت تغییری در توان ژنراتور ظاهر خواهد شد. اگر پس فاز خالص بین تغییر در سرعت محور در فرکانس پیچشی و تغییر حاصله در گشتاور الکتریکی ژنراتور از °۹۰ بیشتر باشد، نوسانهای پیچشی ناپایدار خواهند شد. این موقعیت مشابه حالتی است که در شکل ۱۵ ـ ۷ «ب» نشان داده شده است.

عوامل مؤثر بر تداخل پیچشی [۱۲، ۱۳]

امکان ناپایداری پیچشیِ ناشی از تداخل با کنترل سیستم جریان مستقیم نزدیک، به ظرفیت سیستم جریان مستقیم مربوط به واحد تولید و فاصلهٔ الکتریکی بین آن دو بستگی دارد. مرجع ۱۲ استفاده از ضریب *تداخل واحد*[1] را که در زیر تعریف شده است، به عنوان میزانی از تأثیر کنترلهای سیستم جریان مستقیم بر ناپایداری مُد پیچشی پیشنهاد می‌کند:

$$\mathrm{UIF} = \frac{\mathrm{MVA_{dc}}}{\mathrm{MVA_g}}\left(1 - \frac{\mathrm{SC_g}}{\mathrm{SC_t}}\right)^2 \qquad (۱۵ - ۷)$$

که در آن

$\mathrm{MVA_{dc}}$ = ظرفیت MVA سیستم جریان مستقیم؛

MVAg = ظرفیت MVA ژنراتور؛

1. Unit Interaction Factor

نزدیک، نخستین بار در سیستم جریان مستقیم اسکویر ـ بوت[1] در داکوتای شمالی[2] [۱۰ و ۱۱] شناسایی شد. سیستم مزبور از یک خط ارتباطی KV ۲۵۰ ±، MW ۵۰۰ جریان مستقیم تشکیل شده است. پست یکسو کننده در مجاورت پست تولیدِ میلتون یانگ[3] و شامل دو توربین ـ ژنراتور، یکی با ظرفیت MW ۲۳۴ و دیگری با ظرفیت MW ۴۱۰، قرار دارد. کنورتورها، از سیستمهای آتش[4] همفاصله استفاده می‌کنند. مُدهای عادیِ کنترلِ تنظیم کننده، شامل کنترل جریان ثابت در یکسو کننده و کنترل ولتاژ ثابت در اینورتر می‌باشد. به‌علاوه، یک *کنترل کنندهٔ توان اضافی حساس به فرکانس*[5] (FSPC) بین دو سر سیستمهای گیرنده و فرستنده قرار داده شده است. آزمایشهای میدانی نشان داد که کنترل اضافیِ میرایی، اولین مُد پیچشی (۱۱/۵ Hz)، واحد تولید MW ۴۱۰ را ناپایدار کرد، ضمناً آزمایش نشان داد که بدون کنترل اضافیِ میرایی، با از مدار خارج کردن برخی از خطوط جریان متناوبِ نزدیک یکسو کننده، کنترل عادی جریان ثابت ممکن است، باعث ناپایداری مُد پیچشیِ ۱۱/۵ Hz گردد. باز کردن خطوط جریان متناوب، قدرت سیستم جریان متناوب را کاهش داده که خود موجب ناپایداری مُد پیچشی می‌شود. وقتی که سطح توان جریان مستقیم کاهش داده شد نوسانهای پیچشی پایدار شدند.

با مشاهدهٔ این ناپایداریها سعی شد با گذاشتن محدودیتهایی بر روی سطح توان جریان مستقیم و وضعیت سیستم جریان متناوب، کنترل جریان به گونه‌ای اصلاح شود تا عملکردی امن حاصل گردد. سپس، به دنبال یک تحلیل مفصل، سیستمهای کنترل چنان اصلاح شد تا عملکرد امن در تمامی حالتهای سیستم (به جز حالتهای خاص)، حاصل شود.

این مسأله، موضوع مورد بررسی در پروژهٔ تحقیقاتی EPRI، ۱ — RP۱۴۲۵ بوده است. مطالعات انجام شده در این پروژه به فهم وسیعتر پدیدهٔ پاسخهای کلی و توسعهٔ آنها منجر شده است [۱۲].

پدیدهٔ اصلی

نوسانهای مُد پیچشی، باعث مدولاسیون دامنه و فاز شکل موج ولتاژ متناوب تولید شده می‌شود. ولتاژ مدوله شده، دارای مؤلفه‌های فرکانسی برابر با تفاضل فرکانس اصلی با فرکانس پیچشی است (شکل ۱۵ ـ ۸ را ببینید). این ولتاژِ مدوله شده بر شین کموتاسیون سیستم جریان مستقیم تأثیر می‌گذارد.

1. Square Butte 2. North Dakota 3. Milton Young 4. Firing Systems
5. Frequency Sensitive Power Controller

زیر سنکرون[1] (SSDC) برای میرا کردن نوسانهای پیچشی (که ممکن است مسأله‌ساز باشند)، استفاده شده است.

مسألهٔ تداخل پیچشی با کنترلهای سیستم HVDC را می‌توان با استفاده از روش تحلیل مُدال بررسی کرد. مرجع ۱۳ روشهای دیگر را برای بررسی مسأله، توصیف می‌کند. در شبیه‌سازیها باید دو اثر را در نظر گرفت: الف) تغییرات ظاهری در زاویهٔ آتش پل، ناشی از تغییر در فازِ ولتاژِ شین و ب) اثر انحراف سرعت (ω_r/ω_0) بر ولتاژ ژنراتور [۱۰].

۱۵ ـ ۳ تشدید زیر سنکرون

پدیدهٔ تشدید زیر سنکرون[2] (SSR)، به طور عمده، در سیستمهای انتقالِ جبران شده با خازن سری رخ می‌دهد. اولین مسألهٔ SSR در سال ۱۹۷۰ میلادی در نیروگاه موهیو[3] در کالیفرنیای جنوبی تجربه شد، که به خرابیِ محور توربین ـ ژنراتور انجامید. دلیل واقعی این خرابی که همان تشدید زیر سنکرون بود، زمانی معلوم شد که دومین خرابی محور در سال ۱۹۷۱ میلادی رخ داد [۱۴]. از زمان این خرابیها تاکنون، SSR به یک موضوع بسیار مورد توجه صنعت برق تبدیل شده است.

قبل از آنکه به بحث در مورد پدیدهٔ SSR بپردازیم، نخست مشخصه‌های یک سیستم جبران شده با خازن سری و امکان نوسان زیر سنکرونِ ناپایدار را بررسی می‌کنیم.

۱۵ ـ ۳ ـ ۱ مشخصه‌های سیستمهای انتقالِ جبران شده با خازن سری [۱۶ و ۱۵]

در یک سیستم انتقال *جبران نشده*، خطاها و سایر اغتشاشها، به مؤلفه‌های افست جریان مستقیم در سیم‌پیچهای استاتور ژنراتور منجر می‌شوند (فصل ۳، بخش ۳ ـ ۷ ـ ۲ را ببینید). این جریانها، ناشی از توزیع فضایی سیم‌پیچهای آرمیچر (استاتور) هستند که به مؤلفه‌ای از گشتاور فاصلهٔ هوایی با فرکانس لغزشِ ۶۰ Hz منجر می‌شوند. در حالت خطاهای نامتعادل، مؤلفه‌های توالی فاز منفیِ جریانهای استاتور، به مؤلفهٔ ۱۲۰ Hz (فرکانس لغزش) در گشتاور فاصلهٔ هوایی منجر می‌شود. بنابراین، باید از داشتن فرکانسهای پیچشی در نزدیکی ۶۰ Hz یا ۱۲۰ Hz اجتناب نمود.

در سیستمهای انتقال *جبران شده با خازن سری*، ممکن است موقعیت بسیار متفاوت باشد. برای مثال، سیستم شعاعیِ سادهٔ نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۹ را در نظر بگیرید. در این حالت، به جای مؤلفهٔ جریان مستقیم جریان خطا، جریان گذرای افست نیز جریانی متناوب با فرکانسی

1. Sybsynchronous Damping Control
2. Subsynchronous Resonance
3. Mohave Plant

و SC_g، SC_t = ظرفیت اتصال کوتاه در شین کموتاسیون جریان مستقیم (به جز فیلترهای جریان متناوب)، به ترتیب با و بدون ژنراتور است.

اگر UIF کمتر از ۰/۱ باشد، تداخل کمی بین نوسان پیچشی و کنترل‌های جریان مستقیم وجود دارد.

خطوط موازی جریان متناوب به حداقل کردن امکان بروز ناپایداری پیچشی، کمک می‌کنند. شایان ذکر اینکه خطوط جریان مستقیمِ شعاعیِ خارج شده از پست نیروگاههای حرارتی منفرد، بیش از همه در معرض تداخل پیچشیِ نامطلوب قرار دارند.

زاویهٔ آتش نامی یکسوساز بر درجهٔ تداخل، اثر دارد. با افزایش زاویهٔ آتش نامی تمایل به ایجاد ناپایداری پیچشی افزایش می‌یابد. بنابراین، ممکن است مُدهای عملیاتی، که به ولتاژهای پایینِ سیستم جریان مستقیم احتیاج دارند، امکان ناپایداری پیچشی را افزایش دهند.

اثر کنترلهای سیستم جریان مستقیم [۱۰، ۱۱]

در پروژه اسکویر ـ بوت، ناپایداری پیچشی از طریق دو مسیر مختلف کنترلی ایجاد شد: کنترل میرایی اضافی و کنترل جریان یکسوساز.

ناپایداری ناشی از کنترل میرایی اضافی، در نتیجهٔ بهرهٔ زیاد و پس فاز بزرگ در بازهٔ فرکانسیِ انتهای پایینی فرکانسهای طبیعیِ پیچشی، حاصل شده بود. تنها یکی از دو واحد نزدیک یکسو کننده، فرکانس پیچشیِ (۱۱/۵ Hz) به اندازهٔ کافی کمی داشتند تا با کنترل میرایی، تداخل کنند. این مسأله را می‌توان بسادگی و با استفاده از یک فیلتر شیاردار در ۱۱/۵ Hz در کنترل اضافی حل کرد. اولین فرکانس پیچشیِ واحد دیگر، آنقدر بالا بود که نمی‌توانست باعث ناپایداری شود.

تأثیر کنترل جریان یا توان به پهنای باند تنظیم کننده بستگی دارد. این کنترلها نوعاً دارای پهنای باندی در نزدیکی ۱۰ تا ۲۰ Hz هستند. تنها آن مودهای پیچشی که فرکانسشان کمتر از بازهٔ بالایی پهنای باند است، پتانسیل ناپایدار شدن دارند.

در مورد اسکویر ـ بولت، مسألهٔ ناشی از کنترل جریان با اصلاح مشخصهٔ پاسخ فرکانسی تنظیم کننده، حل شد. اما ممکن است برخی از سیستمهای HVDC، برای دستیابی به عملکرد پایدار، به اصلاحاتی فراتر از اصلاحات سادهٔ تنظیم کنندهٔ جریان، نیازمند باشند. در چنان مواردی، ممکن است که یک مسیر میراییِ اضافی نیز لازم باشد. در مرجع ۱۲، از *کنترل میرایی*

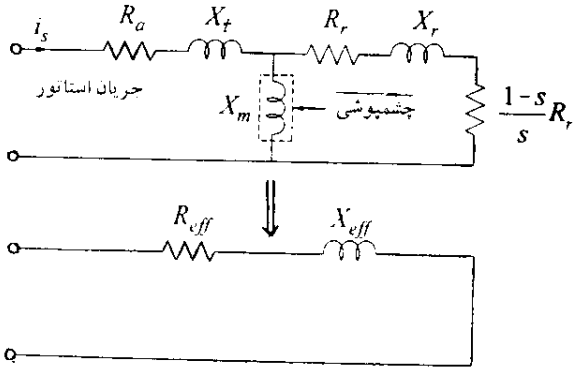
در عمل، مشخصهٔ وابسته به فرکانسِ امپدانس مؤثرِ شبکه پیچیده است و به نمایش تفصیلیِ سیستم نیاز دارد و می‌توان از یک برنامهٔ مرور[1] فرکانسی، مانند برنامه‌ای که در مرجع ۱۸ توضیح داده شده است، برای تعیین این امپدانس استفاده کرد.

از آنجا که مجموع فرکانس طبیعیِ زیر سنکرونِ شبکه (f_n) و فرکانس جریانها (و گشتاورها)ی متناظرِ القا شده در روتور، برابر با فرکانس سنکرون است، آنها را مکمل[2] می‌نامند. شبکه‌های انتقالِ جبران شده با خازن سری، با دو مکانیزم مختلف می‌توانند باعث نوسانهای زیر سنکرونِ مداوم یا میرا شدهٔ منفی شوند: الف) خود تحریکی ناشی از اثر ژنراتور القایی و ب) تداخل با نوسانهای پیچشی.

فرکانس طبیعی سیستمهای انتقال جبران شدهٔ *موازی*[3]، معمولاً در بازهٔ فوق سنکرون[4] هستند؛ بنابراین، نوسانهای زیر سنکرون، مشکلی ایجاد نخواهد کرد. البته موارد استثنایی، مانند جبرانسازیِ موازی درجه بالا و انتقال خیلی طولانی نیز وجود دارد.

۱۵ ـ ۳ ـ ۲ خود تحریکی ناشی از اثر ژنراتور القایی

شکل ۱۵ ـ ۱۰، نشان‌دهندهٔ مدار معادل ساده شدهٔ ماشین سنکرون است که برای تفهیم اثر زیر سنکرون مفید می‌باشد. در این مدل، اثر برجستگی قطب در نظر گرفته نشده است و ماشین با مداری مشابه مدار استفاده شده برای موتورهای القایی نشان داده شده است. اثر مدارهای روتور به صورت فشرده فرض شده و به وسیلهٔ مداری با مقاومت R_r و راکتانس نشتیِ X_r، نشان داده

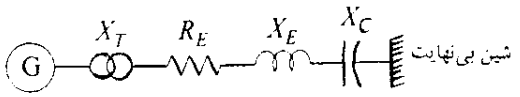


$$s = \frac{f_n - f_0}{f_n} \quad \text{لغزش}$$

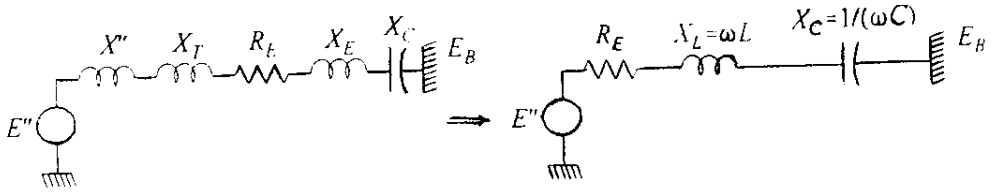
$$R_{eff} = R_a + \frac{R_r}{s}$$

شکل ۱۵ ـ ۱۰ مدار معادل ساده شدهٔ ماشین سنکرون قابل اعمال به کمیتهای فرکانسی زیر سنکرون

1. Scanning 2. Complementary
3. Shunt Compensated 4. Super Synchronous



(الف) نمایش نمادین



(ب) مدار معادل

شکل ۱۵ ـ ۹ سیستم شعاعیِ جبران شدهٔ سری

برابر با فرکانس طبیعی (ω_n) مربوط به اندوکتانس و ظرفیت خازنی مدار می‌باشد:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{\omega_\circ}{\sqrt{(\omega_\circ L)(\omega_\circ C)}} = \omega_\circ \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \text{رادیان بر ثانیه} \qquad (۱۵ ـ ۸)$$

یا:

$$f_n = f_\circ \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \text{هرتز} \qquad (۱۵ ـ ۹)$$

که در آن $f_\circ$ فرکانس زیر سنکرون برحسب هرتز و $\omega_\circ = 2\pi f_\circ$ رادیان بر ثانیه است.

مؤلفه‌های با فرکانسِ f_n مربوط به جریان استاتور ژنراتور، جریانها (و بنابراین گشتاورها)یی را در روتور، با فرکانس لغزش، ($60 - f_n$) هرتز، القا می‌کنند. جدول ۱۵ ـ ۱ فرکانسهای طبیعی و لغزش را به صورت تابعی از درجهٔ جبرانسازی نشان می‌دهد.

جدول ۱۵ ـ ۱

درصد جبرانسازی $(X_C/X_L)\times 100$ (٪)	فرکانس طبیعی f_n (هرتز)	فرکانس لغزشی $60 - f_n$ (هرتز)
۱۰	۱۸	۴۲
۲۵	۳۰	۳۰
۳۰	۳۲/۶	۲۷/۴
۴۰	۳۸	۲۲
۵۰	۴۲/۴	۱۷/۶

۱۵ - ۳ - ۴ روشهای تحلیلی

اثر تداخل پیچشی، شامل تبادل انرژی بین سیستم محور ژنراتور و اندوکتانسها و یا ظرفیتهای خازنی شبکه است. بنابراین، تحلیل مسائل SSR، مستلزم نمایش رفتار الکترومکانیکی واحدهای تولیدی و رفتار الکترومغناطیسیِ شبکهٔ انتقال می‌باشد. در این حالت دیگر نمی‌توان همانند مطالعات پایداری سیستم، مدارهای استاتورِ ژنراتور و شبکه را با معادلات جبری حالت ماندگار نمایش داد. در نتیجه، مدل سیستم استفاده شده برای مطالعات SSR نسبت به مدل سیستم استفاده شده برای مطالعات پایداری، دارای مرتبهٔ بالاتر و سختی بیشتری است.

چندین روش برای مطالعهٔ SSR به کار گرفته شده است که در ذیل توصیف خلاصه‌ای از این روشها بیان می‌شود.

الف) تحلیل مقدار ویژه (مُدال)؛ در این روش، روند کلی مشابه روندی است که در فصل دوازدهم توضیح داده شده است. این روش، قدرتمند است و اطلاعاتی راجع به مشخصه‌های سیستم به دست می‌دهد. با توجه به در دسترس بودن روشهای خاص تحلیل سیستمهای بسیار بزرگ (بخش ۱۲ - ۷ - ۲ را ببینید)، اندازهٔ سیستم و بار محاسباتی، محدودیتی برای این روش محسوب نمی‌شود.

ب) مرور فرکانسی [۱۸ و ۱۹]؛ این روش، امپدانس معادل را از دیدگاه شین‌های داخلیِ ژنراتورهایی که به داخل شبکه نگاه می‌کنند، برای مقادیر مختلفِ فرکانس محاسبه می‌کند و اطلاعاتی را دربارهٔ فرکانسهای طبیعی سیستم و تمایل به سمت خود تحریکی و SSR به دست می‌دهد. این روش خصوصاً برای تحلیل اولیهٔ مسائل SSR مناسب است.

ج) تحلیل پاسخ فرکانسی سیستم کامل [۲۰]؛ پایداری نوسانهای زیر سنکرون با استفاده از معیار نایکویستِ چند بُعدی تحلیل می‌شود. از این روش می‌توان برای تحلیل مدلهای تفصیلی سیستمهای بزرگ نیز استفاده کرد.

د) تحلیل حوزهٔ فرکانسی تقریبی [۲۱، ۲۲]؛ این روش، پایداری مُدهای پیچشی منفرد را تحلیل می‌کند و به آشکارسازی تقریبی SSR محدود می‌شود.

هـ) تحلیل حوزهٔ زمان؛ می‌توان از برنامهٔ گذراهای الکترومغناطیسی (EMTP) برای محاسبهٔ پاسخ گذرا در حوزهٔ زمان استفاده کرد [۲۳]. در این روش از نمایش کامل سه فازِ سیستم استفاده می‌شود. این برنامه، نمایش بسیار تفصیلی وسایل (شامل اثرهای غیر خطی) را فراهم می‌کند و بخصوص برای تحلیل گشتاورهای گذرای محور (ناشی از SSR) مناسب است. لیکن، فقط به تحلیل سیستمهای کوچک محدود می‌شود.

می‌توان از معادلهای وابسته به فرکانس شبکه برای تحلیل سیستمهای پیچیدهٔ بسیار بزرگ

شده است. کمیتهای فرکانس اصلی حذف شده‌اند و تنها اثر فرکانسیِ زیر سنکرون در نظر گرفته شده است.

از آنجا که $f_n < f_\circ$ است، لغزش s منفی است و روتور بسیار شبیه به یک ماشین القایی در حال کار در بالای سرعت سنکرون رفتار می‌کند. بسته به f_n، ممکن است مقاومت مؤثرِ R_{eff} منفی باشد و در درجه‌های بالای جبرانسازی، ممکن است این مقاومتِ منفیِ ظاهری، از مقاومت شبکه بیشتر شده، به یک مدار RLC با مقاومت منفیِ منجر شود. چنین موقعیتی موجب خود تحریکی شده، به نوبهٔ خود به نوسانهای الکتریکیِ غیر قابل قبولی منتهی خواهد شد. افزایش مقاومت شبکه و یا کاهش مقاومت مدارهای روتور ژنراتور (برای مثال، با فراهم کردن یک سیم‌پیچ مناسب میراکنندهٔ سطح قطب) تمایل به سمت ناپایداری زیر سنکرونِ الکتریکی راکاهش می‌دهد.

این شکل از خود تحریکی، پدیده‌ای کاملاً الکتریکی است و به مشخصه‌های پیچشی محور، وابسته نیست.

۱۵ ـ ۳ ـ ۳ تداخل پیچشی منجر به SSR

اگر مکمل فرکانس طبیعی (به عبارت دیگر، فرکانس سنکرون منهای فرکانس طبیعی) شبکه، نزدیک به یکی از فرکانسهای پیچشیِ سیستم محور توربین ـ ژنراتور باشد، ممکن است نوسانهای پیچشی تحریک شوند. این موقعیت را تشدید زیر سنکرون[1] می‌نامند [۱۶]. تحت چنین شرایطی، ولتاژ کوچک القاییِ ناشی از نوسانهای روتور ممکن است به جریانهای زیر سنکرون بزرگی ختم شود؛ این جریان مؤلفه‌ای نوسانی در گشتاور روتور تولید می‌کند که فاز آن به گونه‌ای است که نوسان روتور را زیادتر می‌کند. هنگامی که این گشتاور از گشتاور ناشی از میراییِ مکانیکی بزرگتر باشد، سیستم الکترومکانیکی مرتبط، شاهد نوسانهای افزایشی خواهد بود. از این رو تشدید زیر سنکرون، موقعیتی است که در آن مکمل زیر سنکرونِ فرکانس طبیعیِ مدار آرمیچر جبران شده با یک خازن سری مربوط به سیستم توربین ـ ژنراتور، نزدیک به فرکانسهای طبیعیِ پیچشیِ خودش می‌باشد، که به تزویج قوی بین سیستمهای الکتریکی و مکانیکی منجر می‌شود [۱۷].

ممکن است پیامدهای تشدید زیر سنکرون خطرناک باشد. اگر نوسانهای پیچشی به وجود آید، محور توربین ـ ژنراتور با پیامدهای سهمگینی خواهد شکست. حتی اگر نوسانها ناپایدار نباشند، باز ممکن است اغتشاشهای سیستم به گشتاورهای محوری با دامنه‌ای بزرگ منجر شوند و موجب از بین رفتن عمر خستگی محور شود.

---

1. Subsynchronous Resonance

نوسان شبکه است که برای مقادیر زیر از بار در شین HV مورد بررسی قرار می‌گیرد:

الف) $P_L = ۱۶۶/۵\ MW,\quad Q_L = ۰$

ب) $P_L = ۰\quad Q_L = ۰$

تحلیل

الف) با $P_L = ۱۶۶/۵\ MV$، $Q_L = ۰$؛

روش تحلیل مقدار ویژهٔ توصیف شده در فصل دوازدهم را برای تحلیل تداخل مُدال به کار می‌گیریم. لیکن، مدل سیستم، رفتار شبکهٔ انتقال و مدارهای استاتور ژنراتور را نیز شامل می‌شود. معادلات کامل سیستم در چارچوب مرجع d - q بیان شده است.

جدول ۱۵ ـ ۴ م مقادیر ویژه، فرکانس و نسبت میرایی (ζ) متناظر با پایین‌ترین مُد پیچشی و مُد شبکه را به صورت تابعی از درجهٔ جبرانسازی سری (بیان شده برحسب درصدی از راکتانس خط X_L)، نشان می‌دهد. به علاوه، ضرایب مشارکت مربوط به انحراف سرعت ژنراتور ($\Delta\omega_1$) و ولتاژ دوسر خازنِ سری (Δv_c) نیز آورده شده است. این کمیتها به یافتن میزان تداخل بین دو مُد کمک می‌کنند. چون شبکه در چارچوب مرجعی مدل شده که با سرعت روتور ژنراتور می‌چرخد، فرکانس مُد شبکهٔ محاسبه شده درواقع مکمل فرکانس طبیعی شبکه است (به عبارت دیگر، فرکانس سنکرون منهای فرکانس طبیعی).

بدون جبرانسازی، مُد پیچشی دارای فرکانس ۱۶/۲۴ HZ بوده، میرایی مثبتِ کوچکی ناشی از منابع الکتریکی دارد. با ۲۵٪ جبرانسازی، فرکانس مُد پیچشی و میرایی به مقدار بسیار اندکی افزایش می‌یابند؛ مُد شبکه، فرکانسی برابر با ۳۵/۲ HZ و نسبت میرایی ۰/۰۱۳ دارد. همانطور که از ضرایب مشارکت مشاهده می‌شود، تداخل بسیار کمی بین دو مُد وجود دارد.

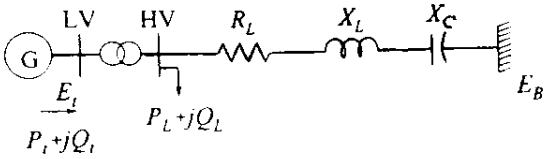
با افزایش درجهٔ جبرانسازی، فرکانس مُد پیچشی مقدار کمی تغییر می‌کند و میرایی آن نیز نخست کمی افزایش می‌کند و سپس کم می‌شود؛ فرکانس مُد شبکه کاهش و میرایی آن افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر درجهٔ جبرانسازی تداخل بین دو مُد را قویتر می‌کند. این تأثیر تزویج، دو مُد را از نظر فرکانسی به هم نزدیکتر می‌کند ولی در میرایی از هم جدا می‌سازد. مُد پیچشی ناپایدار می‌شود، حال آنکه مُد شبکه پایدارتر می‌شود. با ۷۵ تا ۸۰٪ جبرانسازی، فرکانسهای دو مُد، تقریباً برابر هستند و تزویج بین دو مُد بزرگترین مقدار را دارا است.

در جدول ۱۵ ـ ۵ م، اثر تداخل بین مُد شبکه و مُد پیچشی بر مشخصه‌های مُد شبکه مشهودتر است. این جدول فقط فرکانس و نسبت میرایی مُد شبکه را با و بدون نمایش چند جرمی

استفاده کرد [۲۴]. چنین معادلهایی، مشخصه‌های تشدیدِ طبیعی شبکه‌ای را که نمایش می‌دهند، حفظ می‌کنند.

مثال ۱۵ ـ ۳

در این مثال، دو نوع ناپایداری نوسانهای زیرگذرا مربوط به سیستمهای جبران شدهٔ سری به وسیلهٔ خازن، را نمایش می‌دهیم. سیستم مورد آزمون در شکل ۱۵ ـ ۵ م نشان داده شده است. این سیستم شامل یک توربین ـ ژنراتور ۵۵۵ MVA، ۲۴ KV، ۳۶۰۰ r/min می‌باشد، که توان را از طریق یک سیستم انتقال جبران شدهٔ سری به وسیلهٔ خازن به شین بینهایت انتقال می‌دهد. پارامترهای سیستم محور و مشخصه‌های پیچشی واحد تولیدی در شکل ۱۵ ـ ۳ نشان داده شده است. ضرایب میرایی (D) جرمهای منفرد قابل صرفنظر فرض شده‌اند.



شکل ۱۵ ـ ۵ م سیستم جبران شدهٔ سری

پارامترهای شبکه و ژنراتور در مبنای واحد بر پایهٔ ۵۵۵ MVA، ۲۴ KV عبارتند از:

$X_d = ۱/۸۱$ $X_q = ۱/۷۶$ $X_l = ۰/۱۶$ $X'_d = ۰/۳$ $X'_q = ۰/۶۱$

$X''_d = ۰/۲۱۷$ $X''_q = ۰/۲۵۴$ $R_a = ۰/۰۰۲$ $T'_{d۰} = ۷/۸$ (ثانیه) $T'_{q۰} = ۰/۹$ (ثانیه)

$T''_{d۰} = ۰/۰۲۲$ (ثانیه) $T''_{q۰} = ۰/۰۷۴$ (ثانیه) $A_{sat} = ۰/۰۰۸$ $B_{sat} = ۹/۶$ $\psi_{TI} = ۰/۸$

$Z_T = ۰/۰۰۸ + j\,۰/۱۳$ $R_L = ۰/۰۰۸$ $X_L = ۰/۷۵$

شرایط پخش بار عبارتند از:

$P_t = ۵۱۹/۵$ MW $E_t = ۱/۰۸$ $E_B = ۱/۰$

درجهٔ جبرانسازی (به عبارت دیگر، X_c / X_L) تغییر داده می‌شود و به همین ترتیب خروجی توان راکتیو نیز تغییر می‌کند.

توجه ما در اینجا بر تداخل بین پایین‌ترین مُد پیچشی (۱۶ HZ) و فرکانس طبیعی زیر سنکرون

روتورِ توربین ـ ژنراتور، (یعنی؛ با و بدون حضور مُد پیچشی)، نشان می‌دهد. بدیهی است که در این حالت، تداخل بین دو مُد میرایی، مُد شبکه را افزایش می‌دهد.

جدول ۱۵ ـ ۵ م جدول مقایسهٔ مُد شبکه با و بدون نمایش چند جرمیِ روتور توربین ـ ژنراتور با $Q_L = ۰$ ،$P_L = ۱۶۶/۵$ MW

درصدجبرانسازی خط ۲ ـ ۳	مُد شبکه با نمایش چند جرمیِ روتور توربین ـ ژنراتور		مُد شبکه با نمایش جرم فشردهٔ منفرد مربوط به روتور توربین ـ ژنراتور	
	فرکانس (HZ)	ξ	فرکانس (HZ)	ξ
۲۵/۰	۳۵/۲۰	۰/۰۱۳۰	۳۵/۳۲	۰/۰۱۳۳
۵۰/۰	۲۴/۷۵	۰/۰۲۸۸	۲۵/۱۳	۰/۰۱۸۵
۶۰/۰	۲۱/۸۰	۰/۰۲۳۱	۲۱/۸۲	۰/۰۲۰۵
۶۵/۰	۲۰/۰۹	۰/۰۲۳۰	۲۰/۲۷	۰/۰۲۱۵
۶۶/۰	۱۹/۷۴	۰/۰۲۳۰	۱۹/۹۶	۰/۰۲۱۷
۶۸/۰	۱۹/۰۴	۰/۰۲۴۱	۱۹/۳۷	۰/۰۲۲۱
۷۰/۰	۱۸/۲۷	۰/۰۲۷۳	۱۸/۷۸	۰/۰۲۲۴
۷۱/۳	۱۷/۷۰	۰/۰۳۷۶	۱۸/۳۹	۰/۰۲۲۷
۷۲/۰	۱۷/۴۹	۰/۰۴۶۰	۱۸/۲۰	۰/۰۲۲۸
۷۴/۰	۱۷/۰۶	۰/۰۶۵۸	۱۷/۶۳	۰/۰۲۳۱
۷۵/۰	۱۶/۸۸	۰/۰۷۲۱	۱۷/۳۵	۰/۰۲۳۳
۷۷/۰	۱۶/۵۱	۰/۰۸۱۴	۱۶/۷۴	۰/۰۲۳۷
۷۸/۰	۱۶/۲۳	۰/۰۸۵۰	۱۶/۲۷	۰/۰۲۳۹
۸۰/۰	۱۶/۰۵	۰/۰۸۵۸	۱۵/۹۶	۰/۰۲۴۱

توجه: مُد شبکهٔ نشان داده شده در بالا در چهارچوب مرجع d-q است؛ فرکانس واقعی شبکه مساوی با فرکانس سنکرون (۶۰ هرتز) منهای فرکانس بالاست.

ب) با $P_L = Q_L = ۰$؛

نتایج، در جدول ۱۵ ـ ۶ م خلاصه شده است. با حذف بار، مقاومت مؤثرِ شبکه به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد. درنتیجه، مُد شبکه به واسطهٔ اثر موتور القایی، ناپایدار می‌شود. با نزدیک شدن فرکانس شبکه به فرکانس مُد پیچشی، تزویج بین دو مُد افزایش می‌یابد. در این حالت اثر تداخل، افزایشِ میراییِ مُد پیچشی و کاهش میراییِ مُد شبکه می‌باشد. جدول ۱۵ ـ ۷ م نسبت میرایی و فرکانس مُد شبکه را با و بدون نمایش روتور چندجرمی، مقایسه می‌کند. واضح است که حضور مُد پیچشی، مُد شبکه را ناپایدارتر می‌کند. هرچه تداخل بین دو مُد قویتر باشد، مُد شبکه ناپایدارتر خواهد بود.

جدول ۱۵ ـ ۴ م مُدهای پیچشی و شبکه به صورت تابعی از درجهٔ جبرانسازی سری با $Q_L = 0$ ، $P_L = 166/5$ MW

درصد جبرانسازی خط ۲ ـ ۳	مُد پیچشی						مُد شبکه (در چهارچوب مرجع d-q)					
	مقدار ویژه	فرکانس (HZ)	ζ	ضرایب مشارکت			مقدار ویژه	فرکانس (HZ)	ζ	ضرایب مشارک		
				$\Delta\omega_1$	$\Delta\nu_c$					$\Delta\omega_1$	$\Delta\nu_c$	
۰/۰	−۰/۰۴ ± j۱۰۲/۳	۱۶/۲۹	۰/۰۰۰۴	۰/۰° ∠ ۰/۹۰	—		—	—	—	—	—	
۲۵/۰	−۰/۰۶ ± j۱۰۲/۶	۱۶/۳۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰° ∠ ۰/۹۰	۰/۰۰۲ ∠ ۱۵۳°		−۲/۹ ± j۲۲۱/۲	۳۵/۲۰	۰/۰۱۳۰	۰/۰۳ ∠ −۱۷۷/۰°	۱/۰۰ ∠ ۱/۰°	
۵۰/۰	−۰/۱۰ ± j۱۰۳/۱	۱۶/۴۱	۰/۰۰۱۰	۰/۱° ∠ ۰/۹۰	۰/۰۱ ∠ ۱۷۱/۳°		−۴/۵ ± j۱۵۵/۵	۲۴/۷۵	۰/۰۲۸۸	۰/۲۴ ∠ ۸۹/۳°	۰/۹۹ ∠ −۲۱/۵°	
۶۰/۰	−۰/۱۳ ± j۱۰۳/۷	۱۶/۵۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰° ∠ ۰/۹۰	۰/۰۴ ∠ ۱۷۲/۷°		−۳/۲ ± j۱۳۷/۰	۲۱/۸۰	۰/۰۲۳۱	۰/۰۱ ∠ ۹۹/۰°	۱/۰۰ ∠ ۴/۰°	
۶۵/۰	−۰/۱۱ ± j۱۰۴/۴	۱۶/۶۱	۰/۰۰۱۰	−۰/۴° ∠ ۰/۹۱	۰/۰۹ ∠ ۱۷۱/۳°		−۲/۹ ± j۱۲۶/۲	۲۰/۰۹	۰/۰۲۳۰	۰/۰۵ ∠ ۱۶۴/۰°	۱/۰۰ ∠ ۱/۷°	
۶۶/۰	−۰/۱۰ ± j۱۰۴/۶	۱۶/۶۴	۰/۰۰۱۰	−۰/۴° ∠ ۰/۹۱	۰/۱۰ ∠ ۱۷۰/۰°		−۲/۹ ± j۱۲۴/۱	۱۹/۷۴	۰/۰۲۳۰	۰/۰۷ ∠ ۱۴/۰°	۱/۰۰ ∠ ۱/۴°	
۶۸/۰	−۰/۰۲ ± j۱۰۵/۲	۱۶/۷۴	۰/۰۰۰۲	−۰/۴° ∠ ۰/۹۱	۰/۱۷ ∠ ۱۶۶/۴°		−۲/۹ ± j۱۱۹/۶	۱۹/۰۴	۰/۰۲۴۱	۰/۱۲ ∠ ۱۶۴/۰°	۱/۰۰ ∠ ۰/۴°	
۷۰/۰	۰/۲۹ ± j۱۰۶/۳	۱۶/۹۰	−۰/۰۰۲۷	−۷/۸° ∠ ۰/۹۱	۰/۳۱ ∠ ۱۵۲/۵°		−۳/۱ ± j۱۱۴/۸	۱۸/۲۷	۰/۰۲۷۳	۰/۲۶ ∠ ۱۵۰/۰°	۱/۰۰ ∠ −۶/۳°	
۷۱/۳	۱/۳۸ ± j۱۰۷/۳	۱۷/۰۸	−۰/۰۱۲۸	−۳۰/۰° ∠ ۰/۹۱	۰/۵۵ ∠ ۱۰۹/۰°		−۴/۲ ± j۱۱۱/۲	۱۷/۷۰	۰/۰۳۷۶	۰/۴۷ ∠ ۱۰۷/۰°	۰/۹۸ ∠ −۲۸/۰°	
۷۲/۰	۲/۲۸ ± j۱۰۷/۵	۱۷/۱۰	−۰/۰۲۱۲	−۳۷/۷° ∠ ۰/۹۱	۰/۶۴ ∠ ۸۴/۵°		−۵/۰ ± j۱۰۹/۹	۱۷/۲۹	۰/۰۴۶۰	۰/۵۵ ∠ ۸۳/۰°	۰/۹۸ ∠ −۳۶/۰°	
۷۴/۰	۴/۳۳ ± j۱۰۶/۶	۱۶/۹۶	−۰/۰۴۰۶	−۳۱/۴° ∠ ۰/۹۲	۰/۷۵ ∠ ۴۸/۰°		−۷/۰ ± j۱۰۷/۲	۱۷/۰۶	۰/۰۶۵۸	۰/۶۲ ∠ ۴۷/۰°	۰/۹۶ ∠ −۲۹/۴°	
۷۵/۰	۴/۹۷ ± j۱۰۵/۹	۱۶/۸۵	−۰/۰۴۶۸	−۲۵/۵° ∠ ۰/۹۳	۰/۷۷ ∠ ۳۷/۳°		−۷/۶ ± j۱۰۶/۱	۱۶/۸۸	۰/۰۷۲۱	۰/۶۵ ∠ ۳۶/۰°	۰/۹۵ ∠ −۲۳/۲°	
۷۷/۰	۵/۸۲ ± j۱۰۴/۴	۱۶/۶۰	−۰/۰۵۵۷	−۱۳/۰° ∠ ۰/۹۳	۰/۷۷ ∠ ۱۸/۰°		−۸/۵ ± j۱۰۳/۸	۱۶/۵۱	۰/۰۸۱۴	۰/۶۶ ∠ ۱۸/۰°	۰/۹۵ ∠ −۹/۰°	
۷۸/۸	۶/۱۰ ± j۱۰۳/۱	۱۶/۴۱	−۰/۰۵۹۰	−۳/۸° ∠ ۰/۹۳	۰/۷۶ ∠ ۵/۱°		−۸/۷ ± j۱۰۲/۰	۱۶/۲۳	۰/۰۸۵۰	۰/۶۲ ∠ ۶/۰°	۰/۹۵ ∠ ۰/۸°	
۸۰/۰	۶/۱۰ ± j۱۰۲/۳	۱۶/۲۸	−۰/۰۵۹۰	۱/۹° ∠ ۰/۹۳	۰/۷۵ ∠ −۳/۲°		−۸/۷ ± j۱۰۰/۹	۱۶/۰۵	۰/۰۸۵۸	۰/۶۳ ∠ −۱/۸°	۰/۹۵ ∠ ۷/۱°	

جدول ۱۵ ـ ۷ م مقایسهٔ مُد شبکه با و بدون نمایش چندجرمیِ روتورِ توربین ـ ژنراتور با $P_L = Q_L = 0$

درصدجبرانسازی خط ۲ ـ ۳	مُدشبکه بانمایش‌چندجرمی مربوط به محورهای رِوتور توربین ـ ژنراتور		مُد شبکه با نمایش جرم فشردهٔ منفرد مربوط به روتور توربین ـ ژنراتور	
	فرکانس (HZ)	ξ	فرکانس (HZ)	ξ
۲۵/۰	۳۵/۲۰	۰/۰۰۸۸	۳۵/۳۲	۰/۰۰۸۸
۷۰/۰	۱۸/۲۵	−۰/۰۰۵۸	۱۸/۷۸	−۰/۰۰۱۸
۷۵/۰	۱۶/۹۴	−۰/۰۶۱۱	۱۷/۳۵	−۰/۰۰۵۰
۷۸/۸	۱۶/۳۶	−۰/۰۷۵۰	۱۶/۲۶	−۰/۰۰۸۰
۸۰/۰	۱۶/۲۰	−۰/۰۷۵۸	۱۵/۹۶	−۰/۰۰۹۰
۸۵/۰	۱۵/۴۶	−۰/۰۶۳۹	۱۴/۶۲	−۰/۰۱۳۸
۹۳/۷	۱۲/۹۰	−۰/۰۲۴۱	۱۲/۳۸	−۰/۰۲۴۶

نکته: مُد شبکهٔ نشان داده شده در بالا در چهارچوب مرجع d-q است.

۱۵ ـ ۳ ـ ۵ روشهای مواجهه با مسائل SSR

در مراجع، روشهای متنوعی برای برخورد با مسائل SSR پیشنهاد شده است [۲۵ و ۲۶]. به طور کلی می‌توان این روشها را به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

الف) فیلتر استاتیکی؛ این فیلتر می‌تواند به صورت یک فیلتر بلوکه کننده (نوع تشدید ـ موازی) سری با ژنراتور، یا مدارهای میراکنندهٔ موازی با خازنهای سری باشد.

ب) فیلتر دینامیکی؛ این فیلتر یک وسیله فعال است که به طور سری با ژنراتور قرار داده می‌شود و سیگنال حاصل از حرکت موتور را گرفته، ولتاژی با فاز مخالف تولید می‌کند، به طوری که ولتاژِ زیر سنکرونِ تولید شده در آرمیچر را جبران نماید یا حتی ممکن است از آن نیز بیشتر باشد.

ج) *پایدارساز دینامیکی*؛ این‌وسیله از راکتورهای شنت‌مدوله‌شدهٔ تریستوری تشکیل شده که به پایانهٔ ژنراتور متصل می‌باشد. کنترل نوسانات زیرسنکرون به کمک مدولاسیون زوایای آتشِ کلیدزنی تریستور (با استفاده از سیگنالهای حاصل از سرعت محور ژنراتور)، انجام می‌پذیرد.

د) میراکنندهٔ سیستم تحریک؛ کنترل تحریک ژنراتور با استفاده از سیگنال حاصل از سرعت محور به گونه‌ای مدوله می‌شود که میراییِ نوسانهای پیچشی را افزایش دهد.

ه) رله‌های حفاظتی؛ حالت SSR به کمک رله آشکار می‌شود و واحدهای متأثر عمل می‌کنند. رله ممکن است شکلهای مختلفی مانند آشکارسازیِ حرکت پیچشیِ زیادی به وسیلهٔ

جدول ۱۵ ـ ۶ م مُدهای پیچشی و شبکهٔ الکتریکی به صورت تابعی از درجهٔ جبرانسازی سری با $P_L = Q_L = 0$

درصد جبرانسازی خط ۲ ـ ۳	مُد پیچشی						مُد شبکه (در چارچوب مرجع d - q)					
	مقدار ویژه	فرکانس (HZ)	ζ	ضرایب مشارکت			مقدار ویژه	فرکانس (HZ)	ζ	ضرایب مشارک		
				$\Delta\omega_1$	$\Delta\nu_c$					$\Delta\omega_1$	$\Delta\nu_c$	
۰/۰	−۰/۰۳ ± j۱۰۲/۳	۱۶/۲۸	۰/۰۰۰۳	۰/۸۹۶ ∠ ۰/۰°	—		—	—	—	—	—	
۲۵/۰	−۰/۰۲ ± j۱۰۲/۵	۱۶/۳۲	۰/۰۰۰۲	۰/۸۹۸ ∠ ۰/۰°	۰/۰۰۲ ∠ ۱۵۳/۰°		−۱/۹۲ ± j۲۲۱/۲	۳۵/۲۰	۰/۰۰۸۸	۰/۰۳ ∠ ۱۸۰/۰°	۱/۰۰ ∠ ۱/۲°	
۷۰/۰	−۰/۵۳ ± j۱۰۶/۲	۱۶/۹۲	۰/۰۰۵۰	۰/۹۰۹ ∠ ۵/۰°	۰/۳۲ ∠ −۱۶۶/۰°		۰/۶۷ ± j۱۱۲/۶	۱۸/۲۵	−۰/۰۰۵۸	۰/۳۳ ∠ −۱۶۵/۰°	۱/۰۰ ∠ ۶/۷°	
۷۵/۰	−۶/۰۲ ± j۱۰۵/۵	۱۶/۷۹	۰/۰۵۷۰	۰/۹۲۰ ∠ ۲۸/۰°	۰/۸۸ ∠ −۳۰/۰°		۶/۵۱ ± j۱۰۶/۲	۱۶/۹۲	−۰/۰۶۱۱	۰/۷۸ ∠ −۳۲/۰°	۱/۰۰ ∠ ۲۹/۸°	
۷۸/۸	−۶/۹۷ ± j۱۰۲/۳	۱۶/۲۸	۰/۰۶۸۰	۰/۹۴۰ ∠ ۳/۹°	۰/۸۸ ∠ ۱/۷°		۷/۷۱ ± j۱۰۲/۸	۱۶/۳۶	−۰/۰۷۵۰	۰/۷۹ ∠ −۲/۱°	۱/۰۰ ∠ ۲/۶°	
۸۰/۰	−۶/۹۷ ± j۱۰۱/۲	۱۶/۱۲	۰/۰۶۸۱	۰/۹۳۰ ∠ −۲/۷°	۰/۸۸ ∠ ۱۰/۰°		۷/۷۲ ± j۱۰۱/۸	۱۶/۲۰	−۰/۰۷۵۸	۰/۷۸ ∠ ۳۳/۰°	۱/۰۰ ∠ −۲/۰°	
۸۵/۰	−۵/۰۳ ± j۹۷/۶	۱۵/۵۳	۰/۰۵۰۰	۰/۸۷۱ ∠ −۳۲°	۰/۸۳ ∠ ۵۱/۰°		۶/۲۲ ± j۹۷/۱	۱۵/۲۶	−۰/۰۶۳۹	۰/۷۱ ∠ ۲۱/۳°	۱/۰۰ ∠ −۳۲/۰°	
۹۳/۷	−۰/۱۳ ± j۹۹/۵	۱۵/۸۰	۰/۰۰۱۳	۰/۸۷۰ ∠ −۱/۰°	۰/۱۳ ∠ −۱۷۸/۰°		۱/۹۶ ± j۸۱/۱	۱۲/۹۰	−۰/۰۲۴۱	۰/۰۷ ∠ ۱۶۷/۱°	۱/۰۰ ∠ ۳/۸°	

توجّه: مُد شبکه نشان داده شده در بالا در چارچوب مرجع d-q است.

انتقال جلب کرد که می‌توانند به آسیب به محور منجر شوند. تعدادی از پژوهشگران، اغتشاشهای شبکه و وقایع کلیدزنی را بر روی محورهای توربین ـ ژنراتور و به طور مستقل از وضعیت SRR، بررسی کرده‌اند [۲ ـ ۶، ۲۹ و ۳۰]. در پروژهٔ تحقیقاتی EPRI، براساس آزمایشهای متعدد روی نمونه‌های مختلف محور، روشی نیز برای تخمین عمر خستگی پیچشی، مطرح شده‌است [۳۱].

این مسأله را گروهی از IEEE بررسی و رهنمودهای کلی خود را دربارهٔ الف) کلیدزنی حالت ماندگار [۳۲] و ب) کلیدزنی پی در پی شبکه [۳۳]، به صنعت ارائه کرده است.

کلیدزنی حالت ماندگار

عملیات کلیدزنی (شامل باز و بسته کردن کلیدها) ممکن است به گشتاورهای گذرا منجر شود که تنش شدیدی را بر ژنراتورهای نزدیک آن تحمیل خواهد کرد. معمولاً، هنگامی که شبکه در ابتدا در حالت ماندگار است، شدیدترین عمل کلیدزنی، بازبستِ خط انتقالی است که زاویهٔ دو سر کلید آن بزرگ است. بسته به امپدانسهای شبکه، ممکن است افزایش ناگهانی ایجاد شده در گشتاور فاصلهٔ هواییِ ژنراتورهای نزدیک، بسیار بزرگ باشد. این موضوع باعث می‌شود که سیستم مکانیکی به فرکانسهای طبیعی پیچشی اصلی پاسخ دهد. اگر گشتاورهای به وجود آمده، زیاد باشد، ممکن است باعث از دست رفتن عمر خستگی محور شود. به منظور تبیین مبنایی که برای تعیین پذیرش تحمل محور ناشی از عمل کلیدزنی به کار می‌رود، مرور مختصری بر مشخصه‌های خستگی مواد محور سودمند است.

مشخصه‌های خستگی پیچشی [۲، ۳، ۱۶ و ۳۳]. خستگی بدین صورت تعریف می‌شود، فرایند پیشروندهٔ تغییر ساختار دائمی در مکان خاصی از ماده هرگاه ماده‌ای تحت شرایطی قرار گیرد که تنشهای نوسانی و کششهایی در نقطه یا نقاطی از آن تولید شود و ممکن است پس از تعداد کافیِ نوسان به ترکها یا شکستگی کامل منجر شود [۱۶].

خستگی فرایندی تجمعی است که در آن رخدادهای بعدی نیز به مقدار قبلی عمر خستگی اضافه می‌شوند تا زمانی که عمر خستگی به انتها نرسیده باشد، آسیبهای قابل مشاهده از قبیل ترکها تشکیل نمی‌شود.

نمونه‌ای از مشخصهٔ خستگی مربوط به نوعی محور تحت تنشِ سیکلی معکوس شدهٔ کامل در شکل ۱۵ ـ ۱۱ نشان داده شده است. شکل، نشان می‌دهد که چگونه تعداد سیکل به خرابی به دامنهٔ تنش سیکلی بستگی دارد. علاوه بر این، شکل حد خستگی *سیکل بالا* (HCFL)[1] را تعریف

1. High - Cycle Fatigue Limit

اندازه‌گیری سرعت روتور یا آشکارسازی حالت SSR به کمک اندازه‌گیری جریان آرمیچر، داشته باشد.

و) طرح NGH [۲۶]؛ این شیوه از یک مقاومت خطیِ سری با تریستورهایی که پشت به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است. حضور مؤلفه‌های SSR در ولتاژ خازن آشکار شده، با عمل مدار تخلیهٔ مقاومتی، کاهش می‌یابد.

مثالی از طرح جامع حفاظتی SSR، طرحی است که در پروژهٔ سالت ریور[1] نیروگاه ناواجو[2]، اجرا شده است [۲۷]. این طرح از سه نوع حفاظت تشکیل شده است: ۱) فیلتری که برای بلوکه کردن تشدید تنظیم شده است و سری با ژنراتور قرار دارد، ۲) میراکنندهٔ سیستم تحریک برای میراکردن نوسانهای زیر سنکرون، و ۳) رلهٔ استاتیکی که درصورت بالا زدن پاسخ گذرای محور از یک سطحِ قابل قبول، واحدها را از مدار خارج می‌کند.

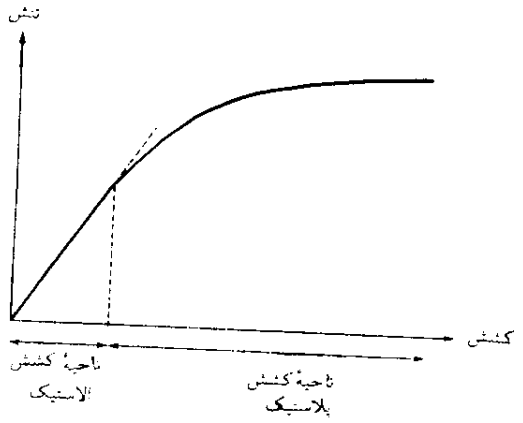
۱۵ ـ ۴ اثر اغتشاشهای حاصل از کلیدزنی شبکه

واحدهای تولیدی، در طول عمر کاری خود با کلیدزنیهای بسیاری مواجه می‌شوند. این کلیدزنیها شامل وقایع برنامه‌ریزی شده و برنامه‌ریزی نشده‌ای از قبیل: کلیدزنی سادهٔ خط، خطاهای سیستم و رفع خطا، باز بست خطوط و سنکرون کردن غلط است. چنین اغتشاشهایی ممکن است موجب بروز گشتاورهای نوسانیِ با دامنه‌های زیاد شود و ممکن است تغییرات تنش سیکلیِ حاصل، که باید محور آنها را تحمل کند، منجر به از دست رفتن عمر خستگی شود. این پدیده یک فرایند تجمعی[3] است، که در آن هر واقعه قسمتی از عمر خستگی کلی را کم می‌کند.

به طور سنتی، توربین ـ ژنراتورها چنان طراحی شده‌اند که برطبق استانداردهای صنعت، پدیدهٔ اتصال کوتاه پایانه را بخوبی تحمل می‌کنند [۲۸]. اتصال کوتاه پایانه، واقعهٔ نادری است و درنتیجه انتظار نیست که یک واحد تولیدی در طول عمر کاری خود تعداد زیادی از چنین وقایعی را تجربه کند. در اوایل دههٔ ۱۹۷۰ میلادی، درک گردید که عملیات کلیدزنی شبکه می‌تواند در بروز خسارت به خستگی محور نقش داشته باشد. این مسأله با مطالعاتی که در خصوص خرابی محور ناشی از SSR در واحدهای موهیو[4] صورت گرفت، روشن شد. اگرچه پدیدهٔ SSR دارای ماهیت متفاوتی است، لیکن نظرها را به سمت وضعیتهای ممکن دیگر شبکهٔ

1. Salt river's Project
2. Navajo Plant
3. Comulative Process
4. Mohave units

شکل ۱۵ ـ ۱۳ منحنی تنش ـ کشش نوعی را برای ماده‌ای خاص نشان می‌دهد. ناحیهٔ خطیِ منحنی را ناحیهٔ کشش الاستیک[1] می‌نامند. ماده‌ای که به صورت الاستیک از شکل طبیعی خود خارج شود، به‌شکل و قوت اولیهٔ خود بعداز تغییرشکل برمی‌گردد. مقادیر کشش در ناحیهٔ غیرخطی را کشش پلاستیک[2] می‌نامند. کشش پلاستیک به تغییر شکل دائمی در ماده منجرمی‌شود.

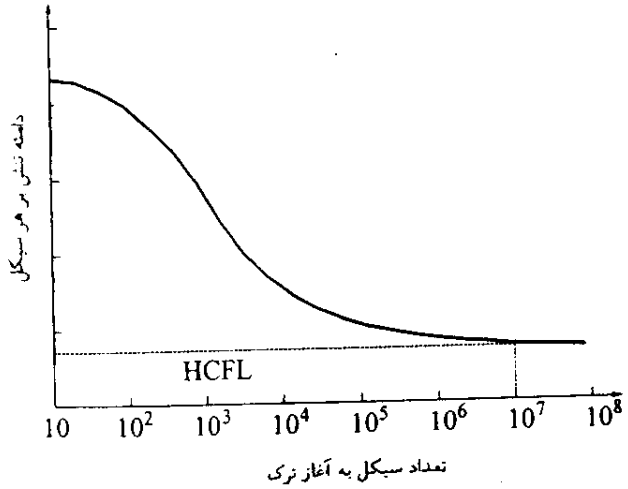


شکل ۱۵ ـ ۱۳ منحنی تنش ـ کشش

تعداد زیاد نوسانهای با دامنهٔ کم، باعث بروز خستگی سیکل بالا می‌شود که منجر به تغییر شکل الاستیک می‌گردد. از طرف دیگر، تعداد کمی از نوسانهای با دامنهٔ زیاد نیز باعث بروز خستگی سیکل پایین می‌شوند که منجر به تغییر شکل پلاستیکِ محلی در نواحی مانند نوارها و برشها می‌شود.

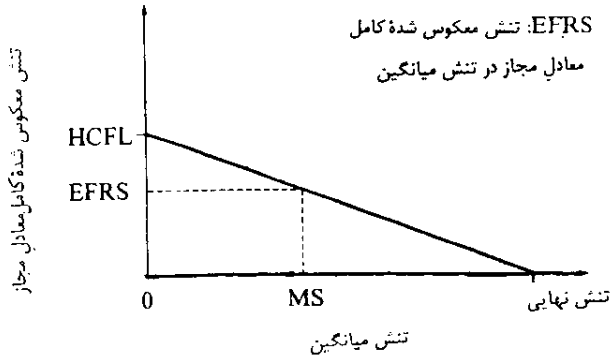
پیشنهادها. برای عملیات کلیدزنیِ برنامه‌ریزی شده، از قبیل بازیابی سادهٔ خط، رهنمودهای IEEE [۳۲] پیشنهاد می‌کند که کلیدزنی به‌گونه‌ای اجرا شود تا چندان در خستگی تجمعی محور نقش نداشته باشد. این بدان معنی است که باید دامنهٔ تنش سیکلی محور، همراه با اثر تنش میانگین، به طور عمده زیر حد خستگی سیکل بالا نگه داشته شوند (شکلهای ۱۵ ـ ۱۱ و ۱۵ ـ ۱۲ را ببینید). بدین صورت، تقریباً همهٔ قابلیتهای خستگی محور برای مواجه با اغتشاشهای غیرقابل اجتناب و برنامه‌ریزی نشده از قبیل: خطاها، رفع خطاها، بازبست در خطاهای سیستم و

1. Elastic Strain 2. Plastic Strain



شکل ۱۵ ـ ۱۱ مشخصهٔ خستگی نوعی، نشان‌دهندهٔ منحنی عمر سیکلی برای تنش معکوس شدهٔ کامل

می‌کند، که طبق تعریف، مقدار حدی تنش سیکلی است که می‌تواند به محور اعمال شود بدون اینکه هیچ خسارت خستگیِ تجمعی به آن وارد گردد. علاوه بر تنش متناوب، اثر تنش میانگین نیز باید درنظر گرفته شود. شکل ۱۵ ـ ۱۲ نشان می‌دهد که چگونه تنش میانگین یا گشتاور حالت ماندگار، گشتاور سیکلی مجاز را کم می‌کند. هنگامی که تنش میانگین صفر است، گشتاورِ سیکلی مجاز برابر با **HCFL**، و هرگاه تنش میانگین، برابر با تنش نهایی ماده باشد، مقدار آن مساوی صفر است. برای هر مقدار دیگر از تنشِ میانگین بین این دو مقدار حدی، گشتاورِ سیکلیِ مجاز به صورت نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۱۲ تعیین می‌شود.



شکل ۱۵ ـ ۱۲ اثر تنش میانگین

در تحلیل اثر عملیات کلیدزنیِ شبکه بر روی گشتاورهای محور، مشاهده می‌شود که معمولاً مؤلفهٔ ۶۰ هرتز گشتاور فاصلهٔ هوایی مربوط به افست جریان مستقیم در جریان استاتور، تأثیر بسزایی دارد. بنابراین، مدلسازی استاتور ژنراتور و گذراهای شبکه الزامی است. برای شبیه‌سازی کافی عمل کلید، زمانی که جریان در هر فاز از صفر عبور می‌کند، لازم است که از یک نمایش سه فاز سیکل به سیکل استفاده شود.

برنامهٔ گذراهای الکترومغناطیسی [۲۳]، وسیله‌ای برای نمایش این اثر را فراهم می‌کند. همچنین این برنامه گشتاورهای محور را محاسبه می‌کند و بهای عمر خستگی پیچشی را تعیین می‌نماید.

مرجع ۳۳ که به وسیلهٔ گروه کاری IEEE تهیه شده است، خلاصه‌ای از گسترهٔ پیش‌بینی شدهٔ هزینهٔ عمر خستگی را برای اغتشاشهای گوناگون شبکه ارائه می‌کند: انواع مختلف خطاها، رفع خطاها، بازبست موفق و بازبست غیرموفق.

بازبست با سرعت بالای خودکار برای چندین خط خطادار در نزدیکی نیروگاهها به عنوان یک عامل مخاطره‌آمیز مهم در هزینهٔ عمر خستگی محور، شناسایی شده است. هرگاه راهبردهای بازبست با سرعت بالا موردنظر باشد، پیشنهاد می‌شود تحمل خستگی محور مطالعه شود. در زیر راهبردهای بازبست دیگری با مخاطرهٔ کمتر از نظر خسارت به محور، آورده شده است:

الف) بازبست تأخیردار[1]، با تأخیر ۱۰ ثانیه یا بیشتر؛

ب) بازبست ترتیبی[2]؛ یعنی بازبست خودکار از طرف راه دور نیروگاه و به دنبال آن بازبست سینکروچک از طرف نیروگاه؛

ج) بازبست انتخابی[3]؛ یعنی محدود کردن بازبست با سرعت بالای خودکار به خطاهای خط‌به زمین و زمین به زمین.

مرجع ۳۰ مقایسه‌ای را بین هزینهٔ عمر خستگی با بازبستِ سرعت بالای غیرمقید و راهبردهای بازبست بالا ارائه می‌کند.

۱۵ ـ ۵ تداخل پیچشی بین واحدهایی که به طور تنگاتنگ به هم تزویج شده‌اند

یک ژنراتور منفرد متشکل از M جرم که به یک سیستم قدرت وصل شده است، M مُد نوسانی دارد (برای مثال، شکل ۱۵ ـ ۳ را ببینید). یکی از این مُدها، مُد سیستم یا مُد جرم صلب است که در آن کلیهٔ جرمهای روتور تقریباً با دامنهٔ مساوی و همفاز حرکت می‌کنند. بقیهٔ (M-۱) مُد،

1. Delayed Reclosing
2. Sequential Reclosing
3. Selective Reclosing

کلیدزنیِ اضطراری خط، محافظت خواهند شد.

رهنمودهایی برای مرور بر وظایف قابل قبول کلیدزنی. بررسی تفصیلیِ کلیهٔ حالتهای ممکن کلیدزنی خط، در عمل غیرممکن است. بنابراین، IEEE رهنمودهای کلی را پیشنهاد کرده است [۳۲] تا به کمک آنها شرکتهای برق، عملیات کلیدزنی را ملاحظه کنند، در صورتی که یکی از حالتها، به مطالعهٔ تفصیلی نیازمند باشد، آنرا تعیین نمایند. این رهنمودها، *بازیابی سادهٔ خط را از حالت ماندگار* مفروض می‌گیرند؛ از این‌رو فقط برای بازبست تأخیردار با زمان بازبست حدود ۱۰ ثانیه یا بیشتر قابل اعمال می‌باشند. رهنمودها براساس مطالعات تفصیلیِ انجام شده بر روی حالتهای متعددی است که در آنها یک زاویهٔ بزرگ در دو سر کلید باز نشان داد، که ممکن است گشتاورهای شدیدی روی محور وجود داشته باشد.

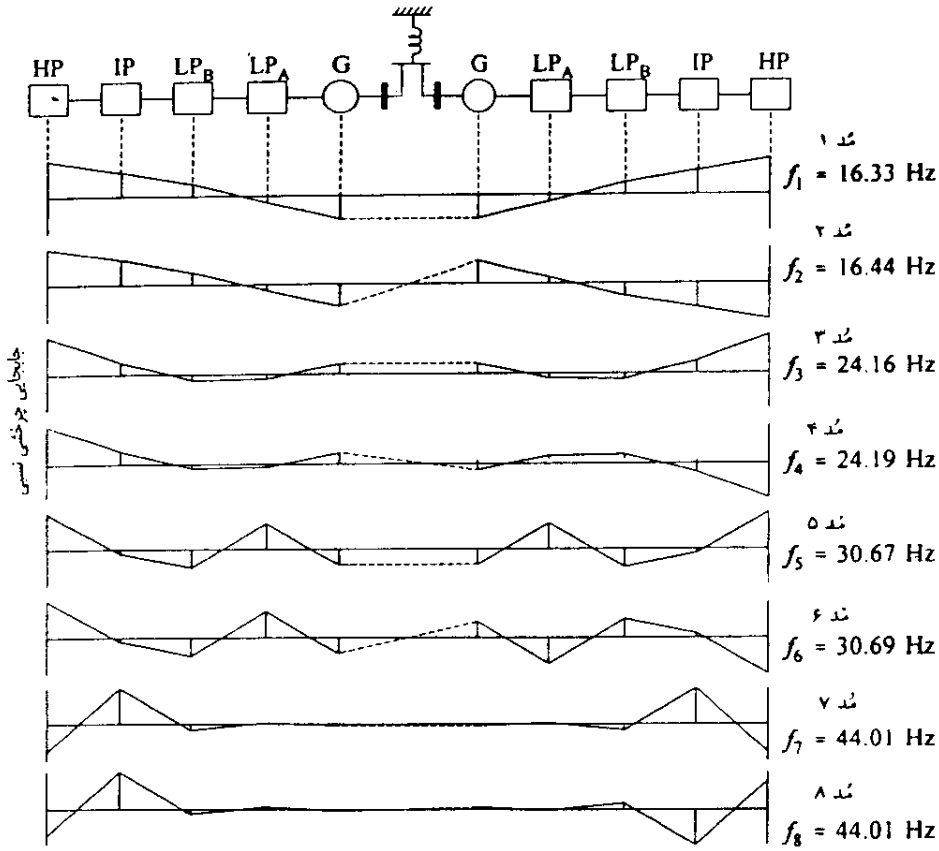
زاویهٔ کلید بتنهایی برای قضاوت دربارهٔ شدت عمل کلیدزنی، چندان سودمند نیست و در این خصوص امپدانسهای مدار، نقش بسزایی را ایفا می‌کند. بنابراین، شدت برحسب تغییر ناگهانی در توان ژنراتور (ΔP) اندازه‌گیری می‌شود، این توان به کمک یک برنامهٔ معمولی پایداری گذرا محاسبه می‌شود. قاعده‌ای سرانگشتی برای ΔP، که IEEE آن را پیشنهاد کرده ۰/۵ در مبنای واحد از ظرفیت MVA ژنراتور است. بنابراین یک کلیدزنی خط که به ΔP کمتر از ۰/۵ در مبنای واحد منجر گردد، ایمن شناخته می‌شود و عملیات کلیدزنی که به ΔPی بزرگتر از حد ۰/۵ در مبنای واحد منجر می‌شود، باید برای ارزیابی تحمل محور مورد مطالعهٔ تفصیلی قرار گیرد.

اغتشاشهای پی‌درپی کلیدزنی شبکه

اغتشاشهای پی‌درپی شبکه، از قبیل: بازبست خودکار خط با سرعت بالا به دنبال بروز خطا، ممکن است به گشتاورهای زیاد و خطرناکی منجر شود. نگرانی دربارهٔ این مورد، برای *اثرهای* ترکیبی عملیات کلیدزنی، متفاوت است. برای نمونه، در حالت بازبست با سرعت بالا، اغتشاشهای پی در پی کلیدزنیِ زیر وجود دارد:

- خطای خط انتقال؛
- رفع خطا؛
- بازبست خط (موفق یا ناموفق).

ممکن است نوسانهای پیچشی ناشی از برخوردهای پی در پی، نوسانهای اولیه را تقویت کند. مخاطرهٔ افزایش نوسانها به سطوح لطمه زننده، تابعی از نوع اغتشاش و زمان‌بندی عملیات بعدی کلیدزنی است.



شکل ۱۵ ـ ۱۴ فرکانسهای پیچشی و صورتهای مُد دو توربین ـ ژنراتورِ تزویج شده.

در تحلیل بالا فرض شده است که **N** واحد، واقعاً یکسان هستند. اگر واحدها فقط به طور اسمی یکسان باشند، خانواده‌هایی **N** مُد، وجود خواهند داشت که اندکی در فرکانس با هم اختلاف دارند. هر خانوادهٔ مُد پیچشی شامل یک مُد همفاز، که در آن ژنراتورها با دامنه‌های اندکی متفاوت مشارکت می‌کنند، و شامل **N - ۱** مُد خلاف فاز خواهد بود که با اختلاف اندکی در فرکانس در آن مشارکت می‌کنند. به دلیل اختلاف در فرکانسهای پیچشی منفرد واحدها، در این حالت، تداخل پیچشی کمتر خواهد بود.

در مواقعی که از فیلترهای شیاردار برای حل مسائل مربوط به پیچش استفاده می‌شود، هرگاه واحدهای اضافی وارد مدار شوند، توزیع احتمالیِ مُدهای پیچشیِ خلاف فاز مهم خواهد بود.

مُدهای پیچشی هستند که فرکانسهای آنها با یکدیگر متفاوت است و M جرم روتور در آنها درجه‌های متفاوتی از مشارکت دارند.

اگر N ماشین به طور موازی درحال کار باشند، سیستمهای محور آنها از طریق سیستم الکتریکی به هم تزویج شده است. اندازهٔ سختیِ الکتریکیِ چنین تزویجی، کوچکتر از سختی مکانیکی محورهای متصل کنندهٔ جرمهای روتور همجوار است. بنابراین، فرکانس مُدهای جرم صلب درحال نوسان، در گسترهٔ ۰/۲ تا ۳/۰ هرتز هستند.

تداخل بین سیستمهای محور واحدهای موازی بر مُدهای پیچشی تأثیر می‌گذارد. لزوم درنظر گرفتن این تداخل، نخستین بار در نیروگاه موهیو هنگام آزمایشهای میدانی، آشکار شد [۴] که در آن اوج تشدیدی دوگانه نزدیک یکی از فرکانسهای پیچشی، با دو واحد تولید درحال کار به طور موازی، مشاهده شد.

اثر تداخل بین دینامیکهای پیچشی دو واحد تزویج شده به طور تنگاتنگ، در شکل ۱۵ ـ ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل فرض شده که هرکدام از واحدها مشخصه‌های پیچشیِ نشان داده شده در شکل ۱۵ ـ ۱۳ را دارند.

مُدهای ۱ و ۲، پایین‌ترین مُدهای پیچشی را نمایش می‌دهند. در مُد ۱ (f_1 = ۱۶/۳۳ Hz) جرمهای متناظر در دو واحد به طور همفاز نوسان می‌کنند، در حالی که در مُد ۲ (f_2 = ۱۶/۴۴ Hz) جرمهای متناظر در خلاف جهت هم نوسان می‌کنند. تفاوت در فرکانسهای دو مُد، ۰/۱۱ هرتز است. این تفاوت تابعی از ضریب سختی تزویج الکتریکی بین دو واحد است. با تزویج پایین، دو فرکانس، مساوی خواهند بود. اما با افزایش تزویج، تفاوت فرکانسی افزایش می‌یابد.

به‌طور مشابهی، مُدهای همفاز و خلاف فاز متناظر با هر یک از سه مُد پیچشیِ دیگر مربوط به واحدهای منفرد وجود دارند.

در حالت کلی، در N ماشین همانند (هرکدام دارای M جرم) که به طور موازی کار می‌کنند، مُدهای پیچشی زیر وجود دارد [۳۴]:

- یک گروه M مُد که در آن روتورهای متناظر در هر واحد به طور هماهنگ نوسان می‌کنند. این مُدها به وسیلهٔ اغتشاشهای متقارن در کلیهٔ N واحد تحریک می‌شوند و به عنوان *مُدهای همفاز*[1] معرفی می‌شوند.
- M گروه ۱ - N مُد همانند، نشان‌دهندهٔ دینامیکهای بین ماشینی. این مُدها صورت مُدهای مستقل خطی دارند و به عنوان *مُدهای خلاف فاز*[2] معرفی می‌شوند.

1. In - Phase Modes
2. Antiphase Modes

منابع

[1] J.P. Den Hartog, *Strength of Materials*, Dover, 1961.

[2] M.C. Jackson, S.D. Umans, R.D. Dunlop, S.H. Horowitz, and A.C. Parikh, "Turbine-Generator Shaft Torques and Fatigue: Part I - Simulation Methods and Fatigue Analysis; Part II - Impact of System Disturbance and High Speed Reclosure," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-98, No. 6, pp. 2299-2328, November/December 1979.

[3] D.N. Walker, S.L. Adams, and R.J. Placek, "Torsional Vibration and Fatigue of Turbine-Generator Shafts," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4373-4380, November 1981.

[4] D.N. Walker, C.E.J. Bowler, R.L. Jackson, and D.A Hodges, "Results of Subsynchronous Resonance Test at Mohave," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-94, No. 5, pp. 1878-1889, September/October 1975.

[5] R. Quay and A.C. Schwalb, discussion of reference 4, *IEEE Trans.*, Vol. PAS-94, No. 5, pp. 1887-1888, September/October 1975.

[6] R.G. Ramey, A.C. Sismour, and G.C. Kung, "Important Parameters in Considering Transient Torques on Turbine-Generator Shaft Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, No. 1, pp. 311-317, January/February 1980.

[7] W. Watson and M.E. Coultes, "Static Exciter Stability Signal on Large Generators - Mechanical Problems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-92, pp. 205-212, January/February 1973.

[8] D.C. Lee and P. Kundur, "Advanced Excitation Controls for Power System Stability Enhancement," CIGRE paper 38-01, 1986.

[9] D.C. Lee, R.E. Beaulieu, and G.J. Rogers, "Effects of Governor Characteristics on Turbo-Generator Shaft Torsionals," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-104, No. 6, pp 1255-1261, June 1985.

[10] M. Bahrman, E.V. Larsen, R.J. Piwko, and H.S. Patel, "Experience with HVDC - Turbine Generator Torsional Interaction at Square Butte," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, pp. 966-975, May/June 1980.

[11] N. Hingorani, S. Nilsson, M. Bahrman, J. Reeve, E.V. Larsen, and R.J. Piwko, "Subsynchronous Frequency Stability Studies of Energy Systems Which Include HVDC Transmission," Paper presented at the Symposium on

۱۵ ـ ۶ مشخصه‌های پیچشی ژنراتور آبی

روتور واحدهای تولید آبی از یک روتور توربین و یک روتور ژنراتور تشکیل می‌شود. اگر واحد، تحریک کننده‌ای داشته باشد که با محور به حرکت درآید، یک جرم روتور اضافی نیز وجود خواهد داشت.

لختی روتورِ ژنراتور، تقریباً ۱۰ تا ۴۰ برابر بیشتر از لختی روتور توربین (چرخ آبگرد)[1] است. فرکانسهای طبیعی پیچشی در بازهٔ ۶ تا ۲۶ هرتز قرار دارند [۳۵].

حالت گزارش شده‌ای از تداخل دینامیکی زیان‌آور بین روتور ژنراتور آبی و شبکهٔ الکتریکی وجود ندارد. در زیر دلایل اصلی فقدان تداخل زیان‌آور، بیان شده است [۳۵، ۳۶]:

۱. مقدار زیاد لختی روتور ژنراتور نسبت به لختیهای روتور توربین و روتور تحریک کننده. این ویژگی به طور مؤثری سیستم مکانیکی روتور را حفاظت می‌کند. درنتیجه، تحریک نوسانهای پیچشی روتور از طریق اغتشاشهای ژنراتور مشکل است.

۲. میرایی غلظت آبگردان. این موضوع موجب می‌شود که میراییِ ذاتیِ نوسانهای پیچشیِ واحدهای آبی به میزان چشمگیری بیشتر از ژنراتورهای توربین بخار باشد.

1. Water Wheel

[23] EPRI/DCG Report EL-7321, "Electromagnetic Transients Program - Version 2: Revised Application Guide," November 1991.

[24] A.S. Morched, J.H. Ottevangers, and L. Marti, "Multi-port Frequency Dependent Network Equivalents for the EMTP," Paper 92 SM 461-4 PWRD, Presented at the IEEE PES Summer Meeting, Seattle, July 1992.

[25] IEEE Committee Report, "Countermeasures to Subsynchronous Resonance Problems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, No. 5. pp. 1810-1817, September/October 1980.

[26] N.G. Hingorani, "A New Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Torsional Oscillations and Transient Torque - Part I," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 1852-1855, April 1981.

[27] R.F Wolff, "Stop Subsynchronous T/G - Shaft Damage," *Electrical World*, pp. 129-133, April 1981.

[28] ANSI Standard C50.13-1977, *Requirements for Cylindrical Rotor Synchronous Generators*.

[29] J.S. Joyce, T. Kulig, and D. Lambrecht, "The Impact of High-Speed Reclosure of Single and Multi-Phase System Faults on Turbine-Generator Shaft Torsional Fatigue," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, No. 1, pp. 279-291, January/February 1980.

[30] C.E.J. Bowler, P.G. Brown, and D.N. Walker, "Evaluation of the Effect of Power Breaker Reclosing Practices on Turbine-Generator Shafts," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, No. 5, pp. 1764-1779, September/October 1980.

[31] EPRI Report EL-3083, "Determination of Torsional Fatigue Life of Large Turbine Generator Shafts." Final Report of Project 1531-1, Prepared by General Electric Company, April 1984.

[32] IEEE Working Group Report, "IEEE Screening Guide for Planned Steady-State Switching Operations to Minimize Harmful Effects on Steam Turbine-Generators," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1519-1521, July/August 1980.

[33] IEEE Working Group Interim Report, "Effects of Switching Network Disturbances on Turbine-Generator Shaft Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, No. 9, pp 3151-3157, September 1982.

Incorporating HVDC Power Transmission into System Planning, Phoenix, Ariz., March 24-27, 1980.

[12] EPRI Report EL-2708, "HVDC System Control for Damping Subsynchronous Oscillations," Final Report of Project RP1425-1, Prepared by General Electric Company, October 1982.

[13] CIGRE/IEEE guide for "Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capabilities, Part I: AC/DC Interaction Phenomenon," 1992.

[14] E. Katz, "Subsynchronous Resonance," Paper presented at the panel discussion on Dynamic Stability in the Western Interconnected Power Systems, IEEE PES Summer Meeting, July 18, 1974.

[15] C. Concordia, J.B. Tice, and C.E.J. Bowler, "Sub-synchronous Torques on Generating Units Feeding Series-Capacitor - Compensated Lines," Paper presented at the American Power Conference, Chicago, May 8-10, 1973.

[16] IEEE Committee Report, "Proposed Terms and Definitions for Subsynchronous Oscillations," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, No. 2, pp. 506-511, March/April 1980.

[17] C. Concordia, discussion of reference 16.

[18] B.L. Agrawal and R.G. Farmer, "Use of Frequency Scanning Techniques for Subsynchronous Resonance Analysis," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-98, pp. 341-349, March/April 1979.

[19] P.M. Anderson, B.L. Agrawal, and J.E. Van Ness, *Subsynchronous Resonance in Power Systems*, IEEE Press, 1990.

[20] J.M. Undrill and T.E. Kostyniak, "Subsynchronous Oscillations Part I - Comprehensive System Stability Analysis," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-95, pp. 1446-1455, July 1976.

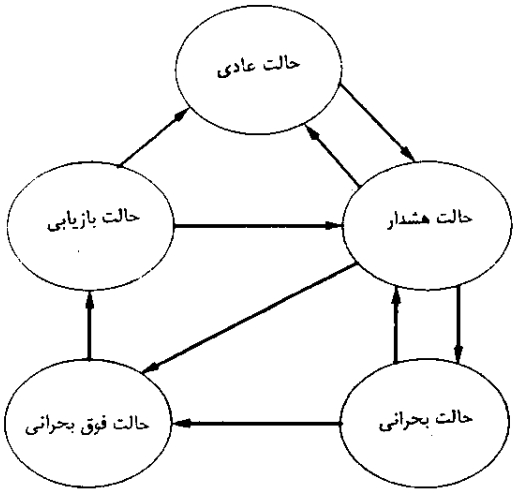
[21] L.A. Kilgore and D.G. Ramey, "Transmission and Generator System Analysis Procedures for Subsynchronous Resonance Problems," tutorial session, IEEE PES Summer Meeting, July 1975.

[22] EPRI Report EL-2614, "Study of Turbine Generator Shaft Parameters from the Viewpoint of Subsynchronous Resonance," Final Report of Contract TPS81-794, Prepared by Power Technologies Inc., September 1982.

[34] R.T.H. Alden, P.J. Nolan, and J.P. Bayne, "Shaft Dynamics in Closely Coupled Identical Generators," *IEEE Trans.* Vol. PAS-96, pp. 721-728, May/June 1977.

[35] G. Andersson, R. Almuri, R. Rosenquist, and S. Torseny, "Influence of Hydro Units' Generator-to-Turbine Inertia Ratio on Damping of Subsynchronous Oscillations," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-103, pp. 2352-2361, August 1984.

[36] L.E. Eilts and E. Campbell, "Shaft Torsional Oscillations of Hydrogenerators." U.S. Bureau of Reclamation Report REC-ERC-79-6, Denver, Colo., August 1979.



شکل ۱۶ ـ ۱ حالتهای عمل سیستم قدرت

شود، نشان داده شده است. حادثهٔ آغازگر می‌تواند اغتشاشی با مبداء طبیعی، بد عمل کردن یک وسیله، یا نتیجهٔ عملکرد نیروی انسانی باشد. سیستمهای مدرن قدرت به گونه‌ای طراحی و راه‌اندازی می‌شوند که در مواجهه با پیشامدهای احتمالی با احتمال وقوع بیشتر، عملکردی مطمئن داشته باشند (برای توصیف پیشامدهای احتمالیِ طراحی فصل ۱ را ببینید). در اکثر موارد، سیستمهای قدرت می‌توانند هر پیشامد احتمالی منفرد و بسیاری از پیشامدهای احتمالی را که با هم رخ می‌دهند، تحمل کنند. سیستمهای حفاظتی و کنترل برای جلوگیری از انتشار اغتشاش به سایر قسمتهای شبکه عمل می‌کنند.

لیکن گاهی، ترکیب غیرعادی حوادث باعث می‌شود که قسمتی از سیستم به هم پیوسته، به‌طور کامل جدا شده و یک یا چند *پارهٔ الکتریکی*[1] را تشکیل دهد. حادثهٔ آغازگر معمولاً پیشامدی است که از موارد درنظر گرفته شده در معیار طبیعی طراحی، شدیدتر است: برای نمونه، خارج شدن چندین خط انتقال در اثر گردبادی سخت؛ بروز توفان یخ؛ یا بد عمل کردن وسیلهٔ مخابراتی. حوادث ناشی از حادثهٔ آغازگر، با تحت فشار قرار دادنِ بیشتر سیستم، باعث وقفه‌های زنجیره‌ای غیرقابل کنترل می‌شود. ممکن است در طی وضعیت پیش‌آمده تغییرات وسیعی در فرکانس (از ۵۸ تا ۶۳ هرتز) و نیز در ولتاژ (از ۵۰٪ تا ۱۲۰٪ مقدار قبل از اغتشاش)

1. Electrical Islands

فصل شانزدهم

پایداری میان مدت و بلند مدت

پایداری میان مدت و پایداری بلند مدت، مربوط به پاسخ سیستمهای قدرت به آشفتگیهای شدید، است. آشفتگیهای شدید، اغتشاشهایی هستند که به انحرافهای فرکانس، ولتاژ و توانهای انتقالی منجر می‌شوند که این انحرافها چنان بزرگ یا ماندنی هستند که اقدامات فرایندهای کُند، سیستمهای حفاظتی و کنترلهایی را که در مطالعات مرسوم پایداری گذرا مدل نشده‌اند، بر می‌انگیزانند.

این فصل ماهیت پاسخ سیستم را، هنگامی که تحت آشفتگیهای شدید قرار گرفته باشد، نشان می‌دهد و نیاز به تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت را بررسی می‌کند. همچنین در این فصل ملاحظات مدلسازی و روشهای تحلیلیِ شبیه‌سازیِ پاسخ دینامیکی بلند مدت توصیف و مثالهایی توضیحی و رهنمودهایی برای افزایش توانمندیِ سیستمهای قدرت در مواجهه با این آشفتگیها بیان شده است.

۱۶ ـ ۱ ماهیت پاسخ سیستم به آشفتگیهای شدید

در مطالعهٔ ماهیت پاسخ سیستم به اغتشاشهای بزرگ، به تصویر درآوردن وضعیت کاری سیستم برحسب پنج حالت نشان داده شده در شکل ۱۶ ـ ۱ سودمند است. توصیفی از این حالتها و راههای انتقال از یک حالت به حالت دیگر، در فصل اول (بخش ۱ ـ ۳)، آورده شده است. این فصل بر وقایع و شرایط سیستمی تمرکز دارد که با حالت فوق بحرانی مرتبط است.

بررسی اغتشاشهای واقعی سیستم [۱ ـ ۶] نشان می‌دهد که الگویی اساسی در خصوص وقایعی که به خرابیهای سیستم منجر می‌شود، وجود دارد. این الگو در شکل ۱۶ ـ ۲ شرح داده شده است که در آن وقایعی که ممکن است منجر به انتقال از حالت هشدار به حالت فوق بحرانی

به‌وجود آید [۱]. بدین ترتیب سیستم می‌تواند به حالت فوق بحرانی نیز تنزل موقعیت پیدا کند، که نتیجهٔ آن از دست دادن قسمتهای اعظم بار سیستم است. به‌طور کلی، اَعمال کنترلی و سیستمهای حفاظتی، پاسخ سیستم را در طی این وضعیت، تحت شعاع خود قرار می‌دهند. در برخی موارد، این موقعیت با هماهنگی ضعیف بین سیستمهای حفاظتی و کنترل، تشدید می‌شود. در اینجا باید به‌منظور نجات هرچه بیشتر سیستم از فروپاشی کامل، از عمل کنترل اضطراری استفاده کرد.

پاسخ سیستم به حالت پارگی

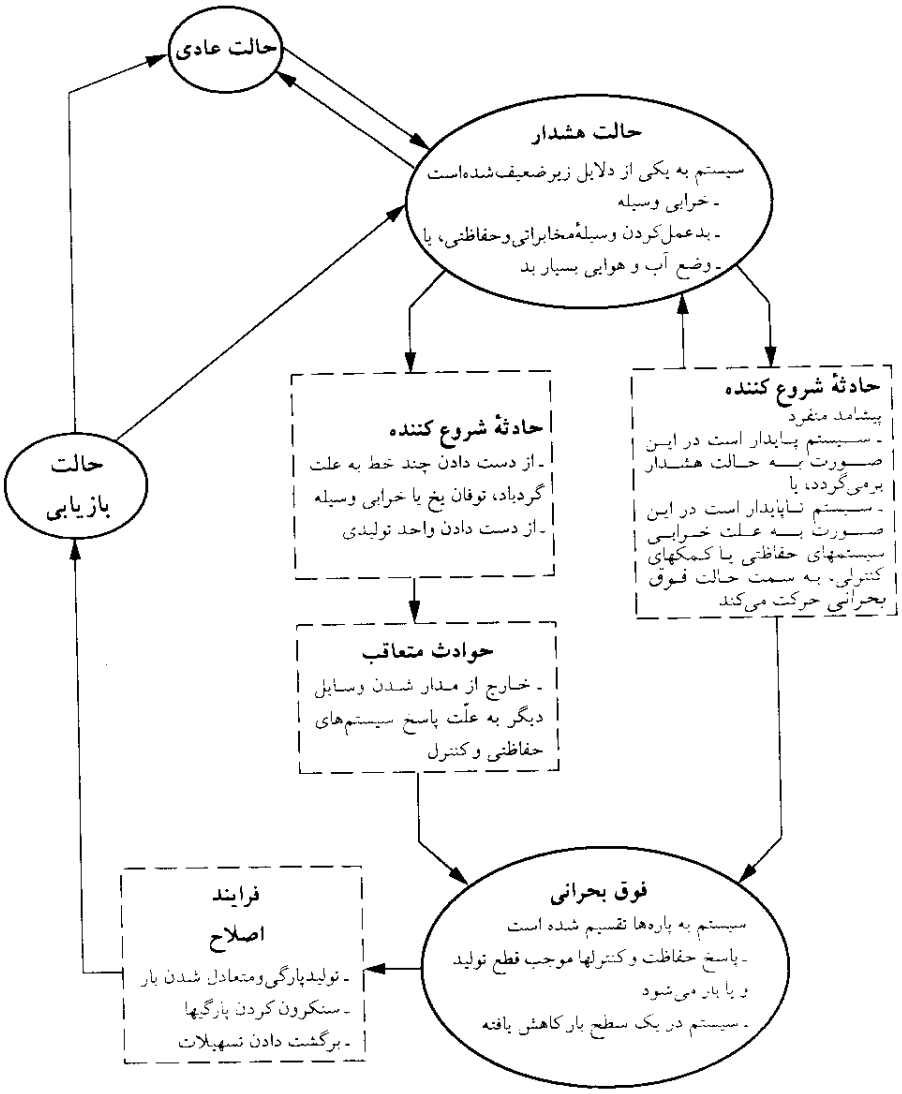
پاسخ سیستم به وضعیت پارگی، در اصل یک گذرای فرکانس مداوم است. بنابراین، کنترل سرعت و پاسخهای متعاقب توربین و سیستمهای تغذیهٔ انرژی نقشی اساسی در تعیین ماهیت عملکرد دینامیکی سیستم ایفا می‌کنند. اغلب، وضعیت با شرایط ولتاژ بالا یا پایین ترکیب می‌شود.

پاره‌های کم تولید. در یک پارگی با مجموع تولید اولیهٔ کمتر از مجموع بار، فرکانس کاهش پیدا می‌کند. اگر ذخیرهٔ چرخانِ کافی در داخل پارگی وجود داشته باشد، فرکانس سیستم در چند ثانیه به نزدیکی مقدار عادی باز می‌گردد، اما اگر تولید کافی با توانایی افزایش سریع خروجی در دسترس نباشد، فرکانس ممکن است به مقادیری برسد که به‌وسیلهٔ رله‌های حفاظتی کمبود فرکانسی به خارج از مدار کردن واحدهای تولید حرارتی منجر شود و بدین ترتیب وضعیت را تشدید کند. بنابراین، از اغلب طرحهای بارزدایی کمبود فرکانسی، برای کاهش بار وصل شده به سطحی که بتواند به‌طور رضایتبخشی به وسیلهٔ تولید تأمین گردد، استفاده می‌شود (فصل ۱۱، بخش ۱۱ ـ ۷ ـ ۱ را ببینید).

درنتیجه، در یک پارهٔ کم‌تولید، گذرای اولیه به پاسخهای ذخیرهٔ چرخان تولید و رله‌های بارزدایی وابسته است. ظرف چندین ثانیه، حداقل مقدار فرکانس به‌دست خواهد آمد. پس ا ز این نقطه، پاسخ فرکانسی سیستم به مشخصه‌های توربین بستگی خواهد داشت.

پاره‌های پُر تولید. در پاره‌ای با تولید اضافی اولیه، فرکانس بالا خواهد رفت، و سیستم کنترل سرعت با کاهش توان مکانیکیِ تولید شده حاصل از توربینها، پاسخ خواهد داد. در عمل، نیروگاهها در این حالت، یک «باربرداری[1] جزئی» را تجربه می‌کنند. عملکرد پاره و توانایی آن در پایدارسازی، بدون از دست دادن بار به توانایی نیروگاهها در تحمل باربرداری جزئی، بستگی

1. Load Rejection



شکل ۱۶ ـ ۲ انتقال حالتهای سیستم حین آشفتگیهای شدید

میزان چشمگیری سرعت داد. بنابراین، بسیاری از شرکتها روش «عمل به بارخانگی»[1] را اختیار کرده‌اند. در زیر چند روش مختلف استفاده شده برای این کار آورده شده است [۹ و ۱۰]:

الف) در هنگام قطع، آتش را خاموش کنید و برای مدت تقریباً ۲۰ دقیقه به ذخیرهٔ حرارتی دیگ بخار تکیه کنید.

ب) همانند «الف». لیکن آتش را مجدداً روشن کنید و اجازه دهید دیگ بخار با مشعلهای مشتعل کار کند.

ج) در بار بسیار پایین یکی از روشهای خاص آتش را اعمال کنید.

د) دیگ بخار را در توان کامل رها کنید یا توان را به حداقل کاهش دهید. بخار اضافی را در جو رها سازید و از ذخیرهٔ آب تغذیه (معمولاً برای چندین ساعت) استفاده کنید.

ه) دیگ بخار را در بارِ حداقل رهاکرده، بخار اضافی را به‌طور میان بُر به داخل کندانسور وارد کنید.

۱۶ ـ ۲ تفاوت بین پایداری میان مدت و بلند مدت

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، عبارتهای *پایداری میان مدت* و *پایداری بلند مدت*، واژه‌های جدیدی در مراجع پایداری سیستم قدرت هستند. معرفی این عبارتها، به دلیل نیازی بود که در برخورد با مسائل مرتبط با پاسخ دینامیکی سیستمهای قدرت به آشفتگیهای شدید، احساس می‌شد.

پایداری بلند مدت، آنگونه که در مراجع ۱۱ تا ۱۵ تعریف شده است، فرض می‌کند که نوسانهای توان سنکرون‌کنندهٔ بین ماشینی میراشده و نتیجهٔ آن یکنواختیِ فرکانس سیستم است. در اینجا، تمرکز بر پدیده‌های کُندتر و طولانی‌تر همراه با آشفتگیهای مقیاس بزرگ سیستم و **عدم تطابقهای مداوم حاصل بین تولید و مصرف توان حقیقی** و راکتیو می‌باشد و عواملی چون دینامیک دیگ بخار واحدهای حرارتی، دینامیک کانال و آبگذر واحدهای آبی، کنترل خودکار تولید، حفاظتها و یا کنترلهای سیستم انتقال و نیروگاه، اشباع ترانسفورمر، و اثر غیر اسمی بر بارها و شبکه، به احتمال زیاد بر پایداری بلند مدت نقش خواهند داشت.

عبارت *پایداری میان مدت* در مراجع ۱۴ و ۱۵ معرفی شده است که انتقال بین پاسخهای گذرا و پاسخهای بلند مدت را نشان می‌دهد. در پایداری میان مدت، مرکز توجه نوسانهای توان سنکرون‌کنندهٔ بین ماشینها، برخی از پدیده‌های کُندتر، و احتمالاً انحرافهای بزرگ ولتاژ یا فرکانس است.

1. Tripping to House Load

دارد. این موضوع در بخش ۱۶ ـ ۳ بیشتر توضیح داده خواهد شد.

تعادل توان راکتیو. عملکرد سیستم در داخل پارگی، تحت تأثیر تعادل توان راکتیو نیز قرار دارد. ممکن است عدم تطابق زیاد در مجموع توان راکتیو تولید شده و جذب شده به شرایط ولتاژ بالا یا پایین منجر شود و ممکن است محدودکننده‌های فوق و یا زیر تحریک گاورنر و کنترلها فعال گردند. در بدترین حالت، پاسخ رله‌های حفاظتی، به خارج کردن واحدهای تولید منجر می‌شود. برای نمونه، یک پارگی با خطوط و یا کابلهای EHVی کم بار، ممکن است باعث جذب مقادیر بالایی از توان راکتیو به‌وسیلهٔ ژنراتورها شود و اگر این موقعیت بسرعت اصلاح نشود، این احتمال وجود دارد که به خارج شدن واحدها (به وسیلهٔ حفاظتِ بی‌تحریکی) منتهی گردد.

تجهیزات جنبی نیروگاه. بروز تغییرات، بخصوص کاهش، در ولتاژ و فرکانس منبع تغذیه ممکن است باعث تنزلِ عملکرد آن دسته از تجهیزات جنبی نیروگاه شود که با موتورهای القایی کار می‌کنند. برای نمونه، پمپهای گردش آب، آب حاصل از میعان، تخلیهٔ گرمکن، و آب تغذیه با موتورهای القایی کار می‌کنند. تنزل عملکرد این پمپها ممکن است به از دست دادن خلأ کندانسور، درجه حرارت بالای خروجی توربین و جریان ناکافی آب تغذیه و یا آب حاصل از میعان منجر شود. بنابراین، بسیاری از نیروگاههای هسته‌ای، به رله‌های کمبود ولتاژ و کمبود فرکانس مجهز می‌شوند تا نیروگاه را در حالت ولتاژهای پایین (به‌طور نوعی، ۷۰٪ مقدار نامی) و یا حالت فرکانسهای پایین (به‌طور نوعی، ۵۹/۲ هرتز) از مدار خارج کنند [۸].

معمولاً موتورهای نیروگاه، در مدارهای راه‌اندازی و حفاظتی از رله‌ها و کنتاکتورهای الکترومغناطیسی استفاده می‌کنند. پاسخ این کنتاکتورها و رله‌ها به افتهای شدید یا طولانی ولتاژها می‌تواند موتورها را قطع کند.

بازیابی سیستم

هنگامی که پارگیها به وضعیت حالت دائمی می‌رسند، اپراتورها اقداماتی اتخاذ می‌کنند تا سیستمِ به هم پیوسته را بازیابی کنند. این اقدامات شامل تنظیم تولید و بار در هر پارگی، دوباره سنکرون کردن پارگیها و بازیابی واحدهای تولیدی، بارها و سایر امکاناتی است که به هنگام بروز اغتشاش، از مدار خارج شده‌اند. راه‌اندازی و بارگذاری مجدد واحدهای حرارتی با چندین عامل محدود می‌شود، و ممکن است که توان کامل برای چندین ساعت وجود نداشته باشد. اگر واحدهای حرارتی بسرعت برای بارگذاری مجدد در دسترس باشند، می‌توان بازیابی توان را به

با *حداقل اختلال* در *سرویسها* به یک *تعادل قابل قبول کاری* می‌رسد یا خیر. در بدترین وضعیت، حفاظتهای سیستمی و واحدی ممکن است به‌طور ترکیبی شرایط را خراب کنند و منجر به فروپاشی بخش یا تمام پاره شوند.

به‌طورکلی، مسائل پایداری بلند مدت با پاسخهای غیرکافی وسایل، هماهنگی ضعیف تجهیزات کنترلی و حفاظتی، یا ذخیرهٔ ناکافیِ توان حقیقی یا راکتیو مرتبط می‌باشد.

زمانهای مشخصهٔ فرایندها و وسایل که در اثر تغییرات بزرگ ولتاژ و فرکانس فعال می‌شوند، از چند ثانیه متناظر با پاسخهای وسایلی از قبیل کنترل‌های ژنراتورها و حفاظتها، تا چندین دقیقه متناظر با پاسخهای وسایلی از قبیل سیستمهای تغذیهٔ انرژی توربین‌ها و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ بار است.

از دیدگاه تحلیلی، برنامه‌های پایداری بلند مدت، برنامه‌های تعمیم یافتهٔ پایداری گذراست که در آنها توانایی تنظیم مرحلهٔ زمانیِ انتگرالگیری برحسب گذراهای غالب، ایجاد شده است [۱۷].

یکی از کاربردهای شبیه‌سازی پایداری بلند مدت، که مورد توجه روزافزون نیز قرار گرفته است، تحلیل دینامیکی پایداری ولتاژ (که در فصل ۱۴ بررسی شد) است، که در آن لازم است اثر تغییر دهندهٔ یک ترانسفورمر، حفاظت فوق تحریک ژنراتور و حدود توان راکتیو، و بارهای ترموستاتی، شبیه‌سازی شوند. در این حالت، نوسانهای بین ماشینی، چندان مهم نیست و گذراهای سیستم منبع تغذیهٔ انرژی نیز ممکن است حیاتی نباشد. لیکن، باید برای نادیده گرفتن برخی از دینامیکهای سریع با احتیاط عمل کرد.

۱۶ ـ ۳ پاسخ نیروگاه حین آشفتگیهای شدید

۱۶ ـ ۳ ـ ۱ نیروگاههای حرارتی

توانایی نیروگاهها در پشت سرگذاشتن بار برداری جزئی، از اهمیت فراوانی در حداقل کردن اثر آشفتگیِ شدید و بازیافتن سریع کار عادی نیروگاه برخوردار است. مراجع ۱۸ تا ۲۱ پاسخهای نیروگاهها را به بار برداریهای جزئی و مسائل تجربه شده در برخورد موفقیت‌آمیز با چنین اغتشاشهایی توصیف می‌کنند.

مرجع ۲۲، که به‌وسیلهٔ یک گروه کاری از IEEE تهیه شده است، رهنمودهایی را برای بهبود پاسخ نیروگاه به بار برداریهای جزئی ارائه می‌کند. خلاصه‌ای از این رهنمودها در زیر آورده شده است:

الف) کنترل کلی نیروگاه: برای تحمل باربرداری جزئی، کنترل کلی نیروگاه باید برای تطابق با توان الکتریکی خروجی بیدرنگ توان ورودی (جریان سوخت) را کم کند. از آنجا که در این

از این تعاریف مشاهده می‌شود، تفاوت چندانی بین پایداری میان مدت و بلند مدت وجود ندارد. آنچه که پایداری بلند مدت را متمایز می‌کند فرض یکنواخت بودن فرکانس سیستم است و اینکه دینامیکهای سریع، قابل توجه نیستند. این فرضیات درصورتی سودمندند که ابزار تحلیلی، آنها را برای پیاده کردن شبیه‌سازی لازم داشته باشد؛ لیکن با نرم‌افزارهای امروزی که روشهای پیشرفته مبتنی بر پراکندگی و روشهای مؤثر انتگرالگیری ضمنی را به‌کار می‌گیرد، شبیه‌سازی چارچوبهای بلند زمان با مدلسازی دینامیک سریع، کمتر موجب نگرانی است.

تا آنجاکه ملاحظات مدلسازی موردنظر باشد، تفاوت تعریف شدهٔ مشخصی بین چارچوب زمانیِ میان مدت و چارچوب زمانی بلند مدت وجود ندارد. برای دوره‌های زمانی پس از دورهٔ گذرا، باید انتخاب مدلهای کاربردی در شبیه‌سازی، براساس پدیده‌های مورد تحلیل و نمایش سیستم به‌کار گرفته شده (به‌جای طول واقعی شبیه‌سازی)، باشد. برای نمونه ممکن است نادیده گرفتن دینامیکهای دیگ بخار یا کنترل فرایند بخار در شبیه‌سازی «میان مدت»، برای شبیه‌سازیِ اغتشاشهایی که برای آنها توابع محرک این دینامیکها کوچک هستند، قابل قبول باشد. لیکن، نادیده گرفتن این دینامیکهای کُند برای اغتشاشهای شدیدتری، که ممکن است حفاظتهای مربوط به متغیرهایی مانند فشارهای بخار را تحریک کند، می‌تواند اثر فوق‌العاده‌ای بر نتایج شبیه‌سازی داشته باشد. تجربیات به‌دست آمده از چندین شرکت، نیاز به نمایش نوسانهای بین ماشینی و گذراهای سریعِ مربوط به سیستمهای تحریک را در مطالعات پایداری بلند مدت مشخص کرده است [۱۶]. از این‌رو تفاوت بین پایداری بلند مدت و میان مدت را نمی‌توان به‌طور رضایتبخشی بر مبنای ثابت چارچوب زمانی و یا ملاحظات مدلسازی بنا کرد. با توجه به این نکات، بهترین روش برای دسته‌بندی مسائل پایداری مرتبط با آشفتگیهای شدید سیستم، حذف ایدهٔ میان مدت به عنوان یک دستهٔ جدا و استفاده از بلند مدت برای شامل کردن کلیهٔ مطالعاتِ پس از چارچوب زمانیِ گذرا می‌باشد.

در این صورت پایداری بلند مدت به‌صورت «توانایی سیستم قدرت در دستیابی به یک تعادل قابل قبولِ کاری پس از بروز اغتشاش شدید در سیستم» تعریف می‌شود، که ممکن است سیستم را به چندین زیر سیستم تقسیم کرده یا نکند. چارچوب زمانی موردنظر، به اندازهٔ کافی بیش از دورهٔ گذراست تا علاوه بر دینامیکهای سریع، اثر دینامیکهای کُندِ سیستمهای خودکار کنترل و حفاظتی را نیز شامل شود. ممکن است شبیه‌سازیهای بلند مدت، اعتشاشهای شدید فراتر از پیشامدهای احتمالی عادی طراحی را نیز شامل شود، پیشامدهایی که سبب شود تا سیستم قدرت به چند پارهٔ مجزای متوالی تجزیه شود، به‌طوری که ژنراتورها در هر پاره، به صورت سنکرون باقی بمانند. *پایداری در این حالت، بدین ترتیب تعریف می‌شود که آیا هر پاره*

هنگامی که شیرهای کنترل و شیرهای میان راهی بسته هستند، جریان بخار در توربین وجود نخواهد داشت. به‌منظور جلوگیری از اضافه حرارت لوله‌های باز حرارت ده، در صورتی‌که وقفهٔ جریان بخار از طریق باز حرارت ده ادامه یابد، باید آتش دیگ بخار قطع شود. لیکن، از آنجا که بستن شیرهای بخار موقتی است، می‌توان با هماهنگی مناسب بین حفاظت دیگ بخار و کنترل سوخت با کنترلهای توربین، از قطع آتش دیگ بخار اجتناب کرد.

علاوه بر این، همان‌طور که در مرجع ۴ پیشنهاد شده است، کنترلهای اضافه سرعت باید:

۱. تداخل آن با کنترل عادی سرعت به‌گونه‌ای نباشد که موجب برهم زدن عملکرد سیستم پاره‌شده شود.

۲. توانایی تمایز بین واحد برداری‌ها[1] و اغتشاشهای گذرای سیستم را، از قبیل خطاهای سیستم انتقال که به‌طور موقت توان نیروگاه را کاهش می‌دهند، داشته باشد.

د) تجهیزات جانبی نیروگاه؛ اثر تغییر ولتاژ و فرکانس، که در حالت باربرداری جزئی رخ می‌دهد، باید بررسی شود، تا از عدم خروج از مدار تجهیزات جانبیِ مهم اطمینان حاصل گردد.

ه) کنارگذرهای توربین بخار؛ با بکارگیری سیستم کنارگذر بخار، کاهش تحت کنترل توان دیگ بخار امکان‌پذیر است. سیستمهای کنارگذر با طراحی خوب، توانایی نیروگاه را در مواجهه با باربرداری جزئی به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

نیروگاههای هسته‌ای به‌طور طبیعی دارای سیستمهای کنارگذر توربین بخار، هستند. در امریکای شمالی، نیروگاههایی که با سوختهای فسیلی کار می‌کنند عموماً مجهز به سیستمهای کنارگذر توربین نمی‌باشند. نیروگاههایی با دیگهای بخار یکبار عبور دارای سیستمهای کنارگذر توربین و فوق حرارت ده هستند که این سیستمها، در اصل به‌منظور راه‌اندازی و از کار انداختن، تعبیه شده‌اند.

۱۶ ـ ۳ ـ ۲ نیروگاههای آبی

تجربهٔ کار با واحدهای آبی تحت شرایط پارگیِ سیستم، نشان داده که تنظیم گاورنر، بسیار مهم است [۲۳]. ملاحظات برای پایداری خوبِ کنترلِ سرعت، تحت شرایط پارگی یا سایر مُدهای منفرد کاری، با تنظیم گاورنر برای بارگذاری و باربرداری‌های سریع در شرایط کارکرد عادی در حالت سنکرون در تضاد می‌باشد. در تغییرات سریع بار، لازم است پاسخ گاورنر سریع باشد؛

1. Unit Rejections

کاهش تأخیرهای زمانی وجود دارند، باید توان ورودی به‌طور موقت، کاهش زیادی در توان خروجی ایجاد کند. بهترین منبع برای تعیین میزان کاهش توان ورودی، توان خروجیِ واقعی است.

ب) *کنترل دیگ بخار*؛ بدون سیستم کنارگذر توربین، بار برداری جزیی از نظر دیگ بخار به‌صورت کاهشی پله‌ای در جریان بخار ظاهر می‌شود. همان‌طور که در بالا اشاره شد، کاهش سریع سوخت مهم است.

برای دیگهای بخار یکبار عبور، کاهش سریع جریان آب تغذیه، که بشدت با جریان سوخت تزویج شده است، نیز لازم است. لیکن، دیگهای بخار یکبار عبور اغلب دارای سیستمهای کنارگذرِ فوق حرارت ده و یا توربینِ با ظرفیت محدود برای حفاظت لوله‌های کوره و کمک به کنترل فشار هستند. از این توانمندی کنارگذر می‌توان برای ایجاد سهولت در آهنگ کاهش سوخت و جریان آب تغذیه استفاده کرد.

برای دیگهای بخار نوع طبله‌ای، باید کاهش جریان آب تغذیه به تأخیر انداخته شود زیرا پاسخ بلافاصلهٔ سطح آب طبله، با جریان بخار افزایش حاصل در فشار طبله، کاهش می‌یابد. به‌علاوه، برای به‌دست آوردن سطح بالاتری از آب ذخیره در سطح توان پایین‌تر اضافه تغذیه الزامی می‌باشد. کنترل مناسب سطح آب، بخصوص برای تغییرات بزرگ در جریان بخار، مهم است. به‌منظور تقویت توانایی کنترل سطح آب طی یک باربرداری جزئی، باید به افزایش موقت بازهٔ بین حدود عمل کنندهٔ بالا و پایینِ سطح آب، توجه کرد یا عمل کننده را برای جریان شدید آب تغذیه به تأخیر انداخت.

برای هر کدام از انواع دیگ بخار به‌طور کلی تأخیر در کاهش جریان هوا مطلوب است زیرا اثر سرمایشی جریان هوای اضافی عقب افتادگیهای پاسخ جریان سوخت را جبران می‌کند. لیکن، باید ورود هوا به مشعلهای درحال کار نسبت به جریان سوخت کنترل شود تا احتراقِ پایدار، حفظ شود.

برای پمپهای تغذیه‌ای که به وسیلهٔ توربینهای بخار کمکی کار می‌کنند، بستن شیرهای میان راهی در جریان بخار، وقفه ایجاد می‌کند، بنابراین لازم است که از یک منبع بخار جایگزین و یا از پمپهایی که به‌وسیلهٔ موتور کار می‌کنند استفاده شود.

ج) *کنترل توربین ـ ژنراتور (توربوژنراتور)*؛ کنترلهای اضافه سرعتِ توربین به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا اضافه سرعت پیش آمدهٔ ناشی از بار برداری کامل را به حدود ۱٪ زیر نقاط تنظیم رلهٔ اضافه سرعت، محدود کنند. بدیهی است که بدین ترتیب از عمل کردن اضافه سرعت حین باربرداری جزئی جلوگیری می‌شود.

جدول ۱۶ ـ ۱، مقادیر ویژهٔ متناظر با سه مُد را، که به تغییر پارامترهای گاورنر حساس هستند نشان می‌دهد. اولین مُد، مُدی نوسانی است که با یک جفت مقادیر ویژهٔ مختلطِ مزدوج دارای فرکانس حدود ۰/۶ رادیان بر ثانیه یا ۰/۱ هرتز، نشان داده شده است. پایداری این مُد برای کارکرد منفرد و حین حالت پارگی سیستم، از اهمیت اصلی برخوردار است. دو مُد دیگرِ نشان داده شده مُدهای غیرنوسانی با مقادیر ویژهٔ حقیقی هستند. معکوس مقادیر ویژهٔ حقیقی، ثابتهای زمانی را نشان می‌دهند که معیاری از پاسخدهی گاورنر تحت شرایط کارکرد منفرد می‌باشد.

در کارکرد منفرد، انتخاب پارامترهای گاورنر به‌منظور تضمین میرایی بسیار خوب نوسانها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، و مطلوب آن است که بدون کم کردن بی‌مورد سرعت پاسخ، به این هدف دست پیدا کنیم، زیرا سرعت پاسخ هنگامی که یک پارگی تشکیل می‌شود، بر حداکثر انحراف فرکانس تأثیر می‌گذارد. نتایج جدول ۱۶ ـ ۱ نشان می‌دهد که تغییر پارامترهای گاورنر اثرهای زیر را بر دینامیک واحد (تحت شرایط کارکرد منفرد) دارد:

- افزایش زمان باز نشانی میراکنندهٔ مکانیکی، T_R، به افزایشِ میرایی، همراه با کاهش آهنگ پاسخ، منجر می‌شود.
- افزایش شیب موقتی افتی R_T، به افزایشِ میرایی و کاهش اندک زمان رسیدن به حالت دائمی منجر می‌شود.
- افزایش بهرهٔ سیستم سروُ K_S، به بهبود میرایی و آهنگ پاسخ منتهی می‌شود. بهبودِ آهنگ پاسخ به‌طور عمده از طریق کاهشِ ثابت زمانی مربوط به مُد ۳ صورت می‌گیرد.

نتایج جدول ۱۶ ـ ۱ برای حالتی خاص از پارامترهای گاورنر به‌منظور نشان دادن طبیعت کلی مسأله است و از آنجا که ترکیبهای فراوانی از پارامترها امکان‌پذیر است و همچنین مُد ۱ بیش از سایر مُدها مورد توجه می‌باشد، انتخاب بهینهٔ پارامترهای گاورنر را می‌توان با نمایش نتایج، به‌صورت نشان داده شده در شکل ۱۶ ـ ۳ به‌صورت بهتری به‌دست آورد. نتایج، به‌صورت نمودار مکان هندسی نسبت میراییِ ثابت (ζ) در صفحهٔ پارامتری $T_R - R_T$ با K_S ثابت، نشان داده شده است. تغییرات فرکانس طبیعیِ نوسان نیز در شکل آورده شده است.

نتایج، نشان می‌دهد که برای واحدی با $T_M = ۶/۲$ (ثانیه) و $T_W = ۱/۰$ (ثانیه)، مقادیر R_T کمتر از ۰/۲۲۵، و T_R کمتر از ۱/۵ (ثانیه) منجر به نوسانهای فرکانسی ناپایدار می‌شود. با افزایش T_R از ۱/۵ (ثانیه) به حدود ۵/۰ (ثانیه)، میرایی به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. افزایش T_R فراتر از ۵/۰ (ثانیه) به بهبود کمی در میرایی در مقابل کُند کردن سرعت پاسخ منجر می‌شود. لذا مقدار مناسب برای T_R در حدود ۵/۰ (ثانیه) است. مقدار R_T را می‌توان برای به‌دست آوردن هر مقدار

لیکن تنظیمهای گاورنر، که باعث پاسخ سریع می‌شوند معمولاً موجب ناپایداری فرکانس تحت شرایط پارگی سیستم می‌شود. مراجع ۲۳ تا ۲۵ رهنمودهایی کلی برای انتخاب تنظیمهای گاورنر ارائه کرده است.

همان‌طور که در فصل نهم (بخش ۹ ـ ۱ ـ ۳) توضیح داده شد، تنظیمهای گاورنر که می‌توان آنها را برای کنترل عملکرد دینامیکیِ واحد تولید تغییر داد، عبارتند از: زمان بازنشانی میراکنندهٔ مکانیکی (T_R)، شیب موقتی افتی (R_T) و بهرهٔ سیستم سرو مربوط به دریچه (K_S). یکی از روشهای مناسب برای تحلیل اثر تغییر این پارامترها بر پایداری نوسانهای فرکانس، تحلیل مقدار ویژهٔ ارائه شده در فصل ۱۲ است. برای تعیین پارامترهای بهینهٔ گاورنر، باید پایداریِ واحد تولیدی را هنگام تأمین بار منفرد غیر سنکرون، درنظر گرفت. این حالت، بدترین موقعیت را از نظر کنترل فرکانس نشان می‌دهد.

جدول ۱۶ ـ ۱ اثر تغییر پارامترهای گاورنر را بر پایداری یک واحد آبی با زمان شروع مکانیکی T_M، ۶/۲ ثانیه و زمان شروع آب T_W، ۱/۰ ثانیه، نشان می‌دهد. فرض شده است که واحد، درحال تأمین توان نامی خود به یک بار منفردِ دارای مشخصهٔ توانی ثابت (معادل با ضریب میرایی ۱ −)، می‌باشد.

جدول ۱۶ ـ ۱ اثر پارامترهای گاورنر تحت کارکرد منفرد

پارامترهای گاورنر			مقادیر ویژه		
K_S	R_T	T_R	مُد ۱	مُد ۲	مُد ۳
۵/۰	۰/۳۸	۱/۵	+ ۰/۰۴۸ ± j ۰/۶۰	− ۱/۰۵۸	− ۵/۹۶
۵/۰	۰/۳۸	۲/۰	− ۰/۰۰۶ ± j ۰/۵۹	− ۰/۷۹۹	− ۳/۸۷
۵/۰	۰/۳۸	۵/۰	− ۰/۱۷۳ ± j ۰/۶۵	− ۰/۲۵۵	− ۳/۷۷
۵/۰	۰/۳۸	۱۰/۰	− ۰/۲۱۲ ± j ۰/۷۲	− ۰/۱۰۴	− ۳/۷۵
۵/۰	۰/۲۴	۵/۰	− ۰/۰۰۳ ± j ۰/۷۵	− ۰/۲۷۷	− ۳/۴۴
۵/۰	۰/۳۰	۵/۰	− ۰/۰۸۱ ± j ۰/۷۱	− ۰/۲۳۷	− ۳/۵۸
۵/۰	۰/۳۵	۵/۰	− ۰/۱۴۱ ± j ۰/۶۸	− ۰/۲۴۸	− ۳/۷۰
۵/۰	۰/۴۰	۵/۰	− ۰/۱۹۳ ± j ۰/۶۴	− ۰/۲۶۲	− ۳/۸۲
۲/۵	۰/۳۸	۵/۰	− ۰/۱۰۷ ± j ۰/۵۴	− ۰/۲۵۲	− ۲/۸۶
۱۰/۰	۰/۳۸	۵/۰	− ۰/۲۵۱ ± j ۰/۷۳	− ۰/۲۵۶	− ۵/۷۲
۵/۰	۰/۳۰	۱/۵	+ ۰/۰۹۵ ± j ۰/۶۵	− ۰/۹۲۰	۳/۶۸
۵/۰	۰/۵۰	۱/۵	− ۰/۰۱۰ ± j ۰/۵۴	− ۱/۱۴۰	− ۲/۳۲
۲/۵	۰/۳۸	۱/۵	+ ۰/۰۴۴ ± j ۰/۵۱	− ۰/۹۵۴	− ۲/۹۳
۱۰/۰	۰/۳۸	۱/۵	+ ۰/۰۳۹ ± j ۰/۶۸	− ۱/۰۵۸	− ۵/۹۶

دلخواه نسبت میرایی، انتخاب کرد. یک مقدار خوب برای نسبت میرایی، ۰/۲۵ است. این مقدار با انتخاب $R_T = ۰/۳$ (ثانیه) و $T_R = ۵/۰$ (ثانیه)، به‌دست می‌آید. مقدار بیشتر R_T به میرایی بیشتر و کاهش اندک در زمان رسیدن به حالت دائمی منجر می‌شود. لیکن با مقادیر بیشتر R_T، فرا جهش حداکثر یا انحراف فرکانسی حداکثر بیشتر خواهد شد.

اثر بهرهٔ سیستم سروُ (K_S) در شکل ۱۶ ـ ۴ نشان داده شده است. این نتایج، تعمیمی از نتایج شکل ۱۶ ـ ۳ است که مکان هندسی $\zeta = ۰$ (حد پایداری مطلق) و $\zeta = ۰/۲۵$ را برای سه مقدارِ K_S، نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنیم که مقادیر بیشترِ K_S، نواحی پایداری را از طریق گستره‌های R_T و T_R افزایش می‌دهد.

تحلیلهای مشابهِ انجام شده بر روی واحدهای دارای ترکیبهای مختلف از زمانهای شروع آب و ماشین، نشان می‌دهند که انتخابهای بهینه شیب موقتی افتی (R_T) و زمان بازنشانی (T_R) با روابط زیر نمایش داده می‌شوند [۲۳]:

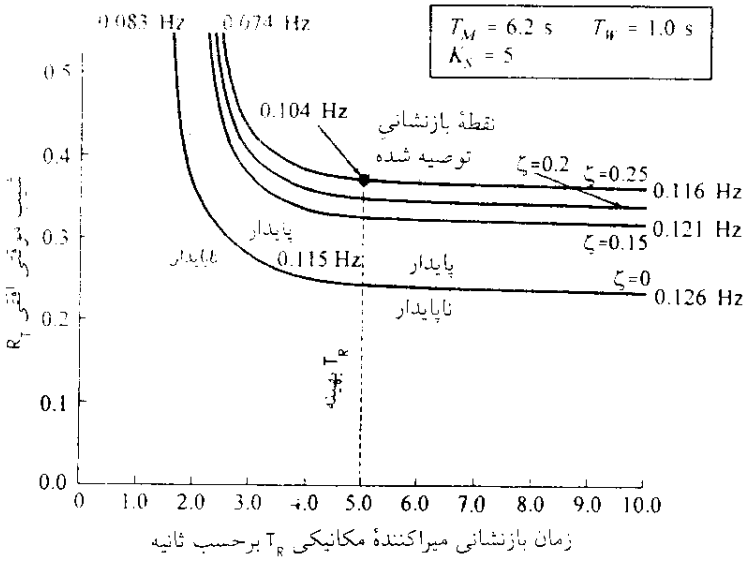
$$R_T = [\, ۲/۳ - ۰/۱۵\,(T_W - ۱/۰)\,]\,\frac{T_W}{T_M} \qquad (۱ - ۱۶)$$

$$T_R = [\, ۵/۰ - ۰/۵\,(T_W - ۱/۰)\,]\,T_W \qquad (۲ - ۱۶)$$

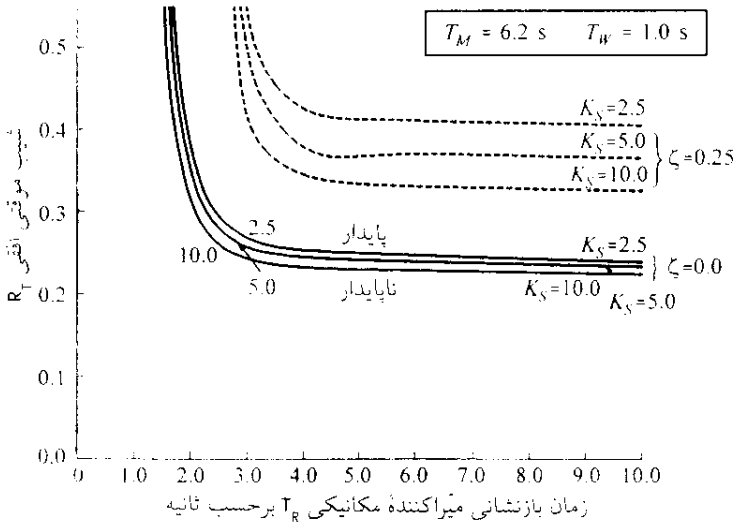
به‌علاوه، از نظر عملی باید بهرهٔ سیستمِ سروُ (K_S) برابر با بالاترین مقدار ممکن باشد. *تنظیمهای بالا، عملکرد پایدار خوب را هنگامی که واحد در بار کامل، یک بار منفرد را تغذیه می‌کند، تضمین می‌کند؛ که این، سخت‌ترین حالت ممکن را نمایش می‌دهد و عملکرد پایدار را برای تمامی وضعیتهای شامل پارگی سیستم تضمین می‌کند.*

برای بارگذاری حین کار عادی، تنظیمهای بالا به پاسخ بسیار کندی منجر می‌شود [۲۳]. برای رسیدن به آهنگهای بارگذاری رضایتبخش، باید زمان بازنشانی T_R کمتر از ۱/۰ (ثانیه) (و ترجیحاً نزدیک به ۰/۵ (ثانیه))، باشد.

همانطور که در فصل نهم بحث شد، این ملاحظاتِ متضاد را می‌توان با یک آرایش کنارگذر میراکنندهٔ مکانیکی که در آن، بدون کنارگذر کردن میراکننده، تنظیمها ملاحظاتِ شرایط پارگی سیستم یا کارکرد منفرد را ارضا می‌کنند، برآورده ساخت. با کنارگذر کردن میراکننده، زمان بازنشانی (T_R)، دارای مقدار کمتری است که آهنگ بارگذاری قابل قبولی را به دست می‌دهد. میراکنندهٔ مکانیکی به‌طور عادی کنارگذر نمی‌شود، تا درصورت بروز اغتشاشی که منجر به پارگی می‌شود، کنترل سرعت پایدار باشد. میراکنندهٔ مکانیکی در دوره‌های کوتاهی حین بارگذاری و باربرداری کنارگذر می‌شود.



شکل ۱۶ ـ ۳ مکان هندسی نسبت میرایی ثابت (ζ) برای کارکرد منفرد



شکل ۱۶ ـ ۴ اثر بهرهٔ موتور سرو

ب) حفاظت و کنترلهای شبکهٔ الکتریکی:

- رله‌های سیستم انتقال؛
- رله‌های سیستم توزیع؛
- کنترلهای تغییردهندهٔ تپ زیر بار ترانسفورمر (ULTC) ؛
- تنظیم‌کننده‌های ولتاژ سیستم توزیع؛
- رله‌های بارزدایی کمبود فرکانس و کمبود ولتاژ.

توضیحات این وسایل در فصلهای ششم و یازدهم آورده شده است.

ج) حفاظت و کنترلهای توربین یا سیستم تأمین انرژی:

- حفاظتها و کنترلهای اضافه سرعت توربین؛
- حفاظت کمبود فرکانس توربین؛
- حفاظتها و کنترلهای دیگ بخار یا راکتور؛
- کنترل خودکار تولید (AGC) .

توضیحات وسایل بالا در فصلهای نهم و یازدهم آورده شده است. نمایش توربین و سیستمهای تأمین انرژی، باید نمایش مناسبی از تجهیزات جانبی نیروگاه را شامل شود. موتورهای القایی که برخی از این تجهیزات جانبی را به راه می‌اندازند تحت تأثیر ولتاژ و یا فرکانس غیرنامی منبع تغذیه قرار می‌گیرند.

برای موقعیتهایی که حالتهای ولتاژ بالای شبکه را شامل می‌شوند، نمایش اشباع ترانسفورمر، مهم است. هرجا که مقتضی باشد، باید مشخصه‌های بار موتور، هنگامی که تحت تأثیر تغییرات غیرنامی فرکانس و ولتاژ قرار می‌گیرند، نمایش داده شوند.

برنامهٔ *پایداری بلند مدت* (LTSP) که در پروژهٔ RP۳۱۴۴ ـ ۱ به کار گرفته شده است، بسیاری از توانمندیهای مدلسازی بالا را شامل می‌شود.

۱۶ ـ ۴ ـ ۳ روشهای انتگرالگیریِ عددی

برنامه‌های اولیهٔ شبیه‌سازی دینامیکی بلند مدت، مانند LOTDYS [۲۸]، با فرض یکنواخت بودن فرکانس کار می‌کردند و فقط پدیده‌های کُند را برای حصول کاراییِ محاسباتی، مدل می‌کردند. به این ترتیب بکارگیری روشهای انتگرالگیری صریح مرتبهٔ پایین امکان‌پذیر گردید، لیکن روشهای خاصی برای تبیین مقادیر اولیه لازم می‌بود. یکی از اشکالهای این روش آن است که بسیاری از گذراهای سریعی را که بر پاسخ دینامیکی بلند مدت تأثیر می‌گذارند، نادیده

۱۶ ـ ۴ شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی بلند مدت

۱۶ ـ ۴ ـ ۱ هدف از شبیه‌سازیهای دینامیکی بلند مدت

اهداف تحلیل دینامیکی بلند مدت شامل موارد ذیل است:

الف) تحلیل به‌دنبال بروز اغتشاش و آشفتگیهای شدید [۳۲]؛ این موضوع به شناسایی عوامل اساسیِ چنین وقایعی و نیز ایجاد اقدامات اصلاحی کمک می‌کند.

ب) ارزیابی توانایی نیروگاهها در پشت سرگذاشتن اغتشاش؛ این موضوع به شناسایی کمبود پاسخهای وسایل و هماهنگی سیستمهای کنترل و حفاظتی کمک می‌کند.

ج) آزمایش پاسخ سیستم به بدترین پیشامدهای احتمالی در مرحلهٔ برنامه‌ریزی و طراحی سیستم؛ بدترین پیشامدها، وقایعی هستند که شدت آنها از پیشامدهای عادیِ طراحی بیشتر است. همان‌طور که در فصل اول (بخش ۱ ـ ۴) اشاره شد، هدف از ارزیابی اغتشاش بحرانی، کسب معیارهایی برای کاهش فراوانیِ چنین پیشامدهایی و نیز تخفیف عواقب آنهاست.

د) آزمایش مراحل اضطراری و فراهم آوردن موقعیت تعلیم اپراتور.

هـ) ارزیابی روشها و سیاستهای بازردایی

۱۶ ـ ۴ ـ ۲ ملاحظات مدلسازی

برنامهٔ شبیه‌سازی پایداری بلند مدت، باید علاوه بر مدلهای به‌کار گرفته شده در شبیه سازیهای مرسوم پایداری‌گذرا، نمایش کافی از توربین و سیستمهای تأمین انرژی را نیز شامل شود. این برنامه همچنین باید مدلهای مناسبی را برای بازهٔ وسیعی از سیستمهای حفاظتی و کنترلی که هنگام وارد شدن سیستم به حالتهای اضطراری و فوق بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل شود.

بررسی اغتشاشهای عمدهٔ سیستم قدرت [۱ تا ۴، ۲۶ و ۲۷] نشان می‌دهد که وسایل حفاظتی و کنترلی زیر، بر عملکرد دینامیکیِ سیستم حین بروز آشفتگیهای شدید سیستم تأثیر بسزایی دارند:

الف) حفاظت و کنترلهای سیستم تحریک و ژنراتور:

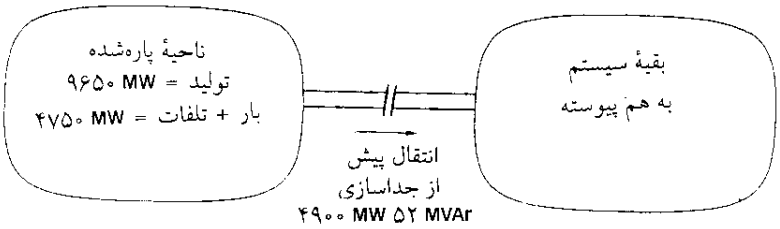
- رله‌های بی‌تحریکی؛
- محدودکننده‌های زیر تحریک (UEL)؛
- محدودکننده‌های فوق تحریک (OXL)؛
- محدودکننده و حفاظت V/Hz.

توضیحات این وسایل در فصل هشتم آورده شده است.

۱۶ ـ ۵ ـ ۱ مطالعهٔ موردی راجع به پارهٔ پُر تولید

این مطالعه به‌منظور نمایش اثر کنترلهای اضافه سرعت توربین ـ ژنراتور، بر عملکرد یک پارهٔ پُر تولید آورده‌شده‌است که بر پایهٔ تجربیات حاصل از گاورنرهای کمکی فصل ۹، بخش ۹ ـ ۲ ـ ۲، که در برخی از واحدهای تولیدی در اونتاریو به‌کار گرفته شده‌اند، بنا نهاده شده است [۴].

این پاره، درنتیجهٔ جدایی ناحیه‌ای شامل ۹۶۵۰ MW تولید و ۴۷۵۰ MW مصرف (بار به‌علاوهٔ تلفات) از بقیهٔ سیستمِ به هم پیوسته تشکیل شده است (شکل ۱۶ ـ ۵ را ببینید). قبل از جدایی، ناحیه، ۴۹۰۰ MW صادر می‌کند و در داخل ناحیه MVAr تولید و مصرف تقریباً برابر است.



شکل ۱۶ ـ ۵

تولید ناحیه

تولید در داخل ناحیه شامل موارد ذیل است:

- تولید هسته‌ای ۴۰۰۰ MW در نیروگاهی با هشت واحد ۵۰۰ MW؛
- تولید سوخت فسیلی ۳۸۵۰ MW در دو نیروگاه، هر کدام با چهار واحد ۵۰۰ MW؛
- تولید آبی ۱۸۰۰ MW در شش نیروگاه.

سیستمهای کنترل توربین

واحدهای هسته‌ای به گاورنرهای *کنترل مکانیکی ـ هیدرولیکی* (MHC) مجهز هستند که نمودار بلوکی آنها در شکل ۹ ـ ۳۱ در فصل نهم نشان داده شده است. مشخصهٔ ویژهٔ این سیستم کنترل، بکارگیری گاورنر کمکی است، که در مواقعی که سرعت بیش از تنظیم ۱٪ = V_1 باشد، وارد عمل می‌شود. گاورنر کمکی به‌صورت موازی با گاورنر اصلی عمل می‌کند و بهرهٔ حلقهٔ کنترل سرعت را به‌طور مؤثری (تا حدود ۸ برابر) افزایش می‌دهد. این کار، اضافه سرعت را با سریع بستن شیرهای کنترلی (CV ها) به همراه شیرهای میان راهی (IV ها) محدود می‌کند.

می‌گیرد؛ درنتیجه بسیاری از مسائل بالقوهٔ سیستم پوشیده باقی می‌ماند.

گرایش کنونی در شبیه‌سازیهای دینامیکی بلند مدت، به مدلسازی پدیده‌های سریع، همانند پدیده‌های کند است. این کار با استفاده از روشهای انتگرالگیری ضمنی امکان‌پذیر است. همانطور که در فصل سیزدهم گفته شد، روشهای انتگرالگیری ضمنی از نظر عددی بسیار پایدارند، سختی معادلات دیفرانسیل بر دقت آنها تأثیر می‌گذارد ولی بر پایداری تأثیری ندارد. با گامهای طولانی زمانی، مُدهای فرکانس بالا فیلتر می‌شوند و پاسخ مُدهای کُندتر دقیق می‌شود.

در مرجع ۲۹، با استفاده از روش انتگرالگیری ذوزنقه‌ای، روشی متحد برای شبیه‌سازی دینامیکی کوتاه و بلند مدت ارائه شده است. مُد شبیه‌سازی (کوتاه یا بلند مدت)، به کمک اندازهٔ گام انتگرالگیری تعیین می‌شود و به‌منظور جلوگیری از نوسان توان سنکرون کننده، یک میرایی مصنوعی اضافه شده است و هنگام شبیه‌سازی مُد بلند مدت گامهای زمانی انتگرالگیری بلندتر نیز امکان‌پذیر می‌گردد. علاوه بر این امکاناتی برای کلیدزنی از یک مُد به مُد دیگر (با اضافه یا حذف کردن میراییِ مصنوعی و تغییر گام زمانی)، فراهم می‌شود.

یکی از روشهای جذاب دیگر انتگرالگیری برای شبیه‌سازی دینامیکی بلند مدت، فرمول مشتقگیری پس رو نوع چرخدنده‌ای[1] است [۳۱ و ۳۰]. روش چرخدنده‌ای مرتبهٔ دوم، یک الگوریتم انتگرالگیری خود آغازگرِ ضمنی از نوع پیشگو ـ تصحیح کننده است. برنامهٔ EUROSTAG توصیف شده در مرجع ۱۷ این روش را به کار می‌بندد. مشخصهٔ کلیدی این کاربرد، تنظیم خودکار گام زمانی انتگرالگیری براساس خطای برشی است. هنگامی که مُدهای سریع تحریک می‌شوند، گام زمانی به کمتر از مقداری متناظر با کوچکترین مقدار ویژه تنزل پیدا می‌کند. با از بین رفتن مُدهای سریع در فرایند پاسخ، کم‌کم به گام زمانی اضافه می‌شود. اگر مُدهای سریع به علت عمل کلیدزنی بعدی تحریک شوند، گام زمانی به‌طور خودکار کوچکتر می‌شود. درحین شبیه‌سازی دینامیکی بلند مدت، ممکن است گام زمانی بین (میلی‌ثانیه) و (میلی‌ثانیه) ۱۰۰ تغییر کند.

۱۶ ـ ۵ مطالعات موردی دربارهٔ آشفتگیهای شدید سیستم

در این بخش دو مطالعهٔ موردی را درنظر می‌گیریم: یکی شامل پارگی پُر تولید و دیگری پارگی کم تولید.

---

1. Gear Type

واحدهای سوخت فسیلی گاورنرهای MHC دارند، که نمودار بلوکی آنها در شکل ۹ ـ ۳۲ نشان داده شده است.

مدل سیستمهای کنترل واحدهای آبی در شکل ۹ ـ ۱۰ نشان داده شده است که تنظیم آنها، برای دستیابی به کنترلِ بشدت میرا شده در حالت پارگی، با معادلات ۱۶ ـ ۱ و ۱۶ ـ ۲ داده می‌شود.

شکلهای ۹ ـ ۷ و ۹ ـ ۲۴ به ترتیب توربینهای آبی و بخار را نمایش می‌دهد.

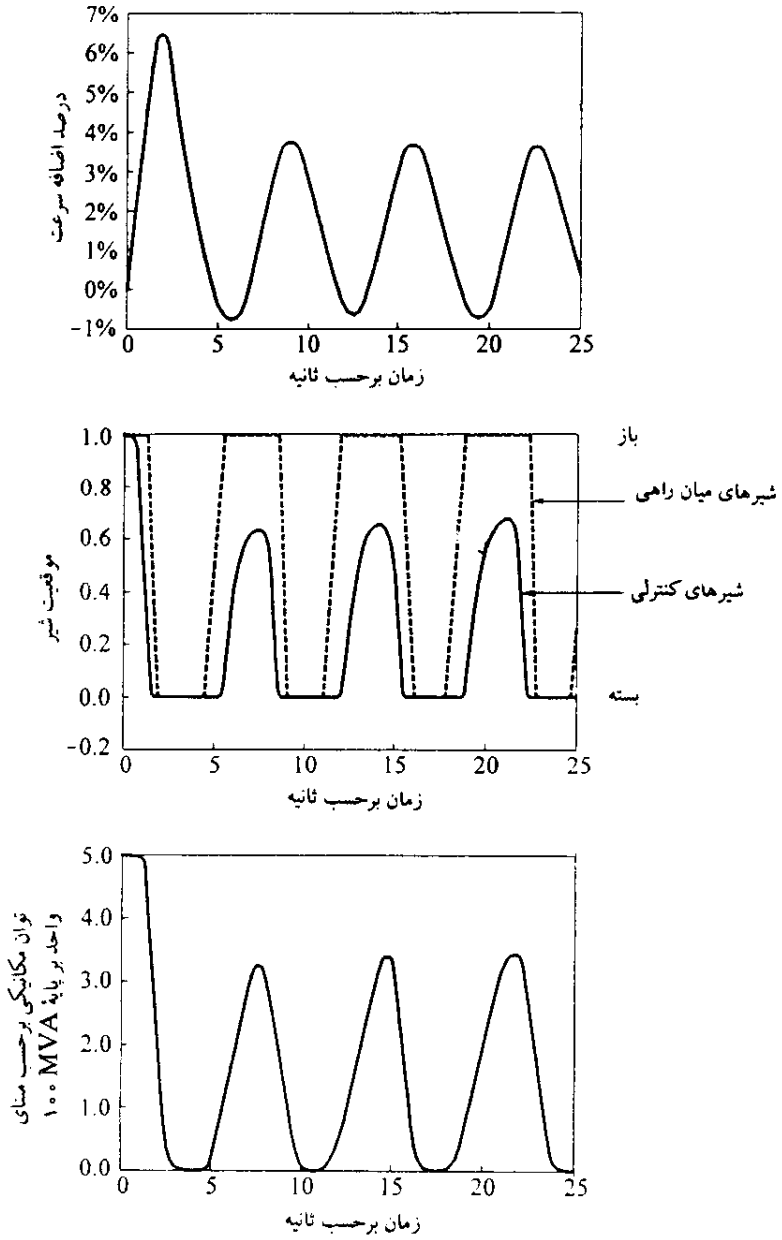
شبیه‌سازی

حضور اغتشاش به صورت باز کردن همزمان کلیهٔ خطوط ارتباطی بین ناحیه و بقیهٔ سیستم، شبیه‌سازی شده است، که درنتیجهٔ آن پاره‌ای با تولید حدود دو برابر بار ایجاد می‌شود. ژنراتورها و سیستم تحریک به‌صورت تفصیلی نشان داده شده است. بارها به صورت توابعی غیرخطی از ولتاژ و فرکانس نمایش داده شده است. عملکرد سیستم پاره شده، در موقعی که گاورنرهای کمکی واحدهای هسته‌ای درحال کار هستند و نیز در موقعی که کار نمی‌کنند، بررسی شده است.

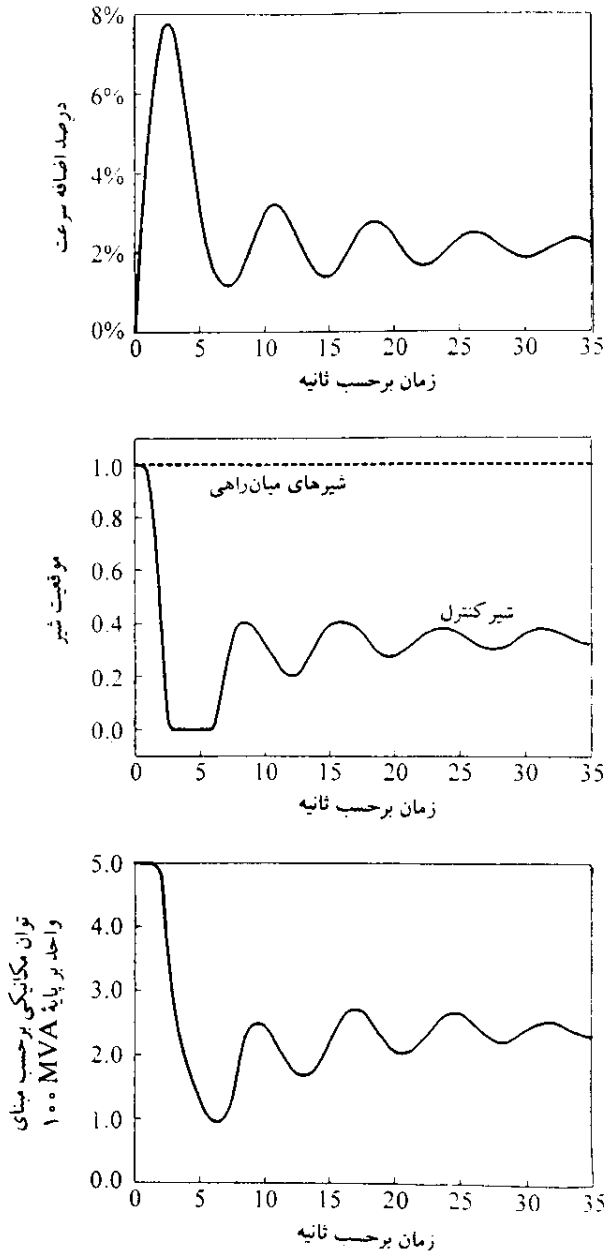
الف) با گاورنر کمکی درحال کار. شکل ۱۶ ـ ۶ نمودارهای انحراف سرعت، موقعیتهای CV و IV و توان مکانیکی یکی از واحدهای هسته‌ای را نشان می‌دهد. کلیهٔ واحدهای ناحیه، با هم نوسان می‌کنند؛ از این‌رو، نمودار سرعتِ نشان داده شده نشان‌دهندهٔ فرکانس ناحیه است.

درنتیجهٔ پارگی، سرعت به مقدار حداکثری حدود ۶/۴٪ بیش از سرعت عادی ۱۸۰۰ r/min می‌رسد و سپس با میراییِ کمی بین ۳/۵٪ بیشتر و ۰/۷٪ کمتر از سرعت عادی نوسان می‌کند. نوسان مداوم، ناشی از عمل گاورنرهای کمکی است. هنگامی که اضافه سرعت بیش از تنظیم ۱٪ = ν_1 می‌شود، گاورنرهای کمکی شیرهای بخار را می‌بندند و توان مکانیکی واحدهای هسته‌ای را به صفر کاهش می‌دهند. کمبود توانِ تولید شده، سرعت را سریعاً کاهش می‌دهد و شیرها دوباره باز می‌شوند. افزایش حاصل در توان مکانیکی به اندازه‌ای است که سرعت از مقدار تنظیم گاورنر کمکی ۱٪ بیشتر شده، شیرها دوباره بسته می‌شوند و سیکل با دورهٔ تناوبی حدود ۷ ثانیه تکرار می‌شود.

ب) با گاورنرکمکی خارج از کار. شکل ۱۶ ـ ۷ نتایج کار نکردن گاورنرهای کمکی واحدهای هسته‌ای را نشان می‌دهد. انحراف سرعت به مقدار حداکثری حدود ۷/۷٪ می‌رسد و به مقدار حالت ماندگاری حدود ۲٪ بالای مقدار نامی میرا می‌شود. حذف گاورنرهای کمکی به کنترل پایدار فرکانس منجر می‌شود. تنها CV ها به تغییرات سرعت پاسخ می‌دهند و IV ها کاملاً باز باقی می‌مانند، زیرا گاورنر اصلی بتنهایی قادر به فائق‌آمدن بر بایاس گشایش شیر میان راهی نیست.



شکل ۱۶ ـ ۶ پاسخ‌گذاری واحدهای هسته‌ای همراه با گاورنر کمکی



شکل ۱۶ ـ ۷ پاسخ‌گذاری واحدهای هسته‌ای همراه با گاورنرهای کمکی خارج از خط

با توجه به نتایج بالا، بدیهی است که گاورنرهای کمکی، باعث ناپایداری کنترل سرعت حین موقعیتهای پارگی سیستم می‌شوند. سایر واحدهای پارگی، به نوسانهای واحدهای با گاورنرهای کمکی پاسخ می‌دهند؛ اثر کلی، ایجاد نوسان کلیهٔ واحدهاست. حرکات حاصل از شیرهای بخار یا دریچه‌های فرعی[1] تا تمام شدن روغن سیستمهای هیدرولیکی گاورنرها، ادامه می‌یابد. که این به خروج واحد و احتمالاً خاموشی پارگی منجر می‌شود. همچنین ممکن است نوسانهای توان باعث «پریمینگ[2]» دیگهای بخار واحدهای سوخت فسیلی شود، که موجب می‌گردد تا آب از دیگهای بخار در تماس با فوق گرمای درجه بالا و مراحل فشار قوی قرار گیرد.

یکی از پاسخهای ممکن به این مسأله، جایگزینی گاورنر کمکی با یک آشکارساز الکترونیکی است [۴۱]. در این مطالعه فرض شده سیستمهای تولید بخار، به دنبال درخواستهای توربین، به طور رضایتبخشی عمل می‌کنند. مرجع ۳۳ انواع مسائلی را، که ممکن است به واسطهٔ پاسخ نامناسب سیستمهای حفاظتی و کنترلی تولید بخار در یک واحد هسته‌ای به وجود آید، نشان می‌دهد.

۱۶ ـ ۵ ـ ۲ مطالعهٔ موردی شامل یک پارهٔ کم‌تولید

این مطالعه به منظور نمایش عملکرد یک پارهٔ کم‌تولید هنگامی که تحت تأثیر بارزدایی کمبود فرکانس و کنترل نیروگاه قراردارد، آورده شده است. به علاوه، نیاز به وجود کنترل مناسب و کافی برای ولتاژ و توان راکتیو را نیز نشان می‌دهد.

تولید توان و وضعیّت

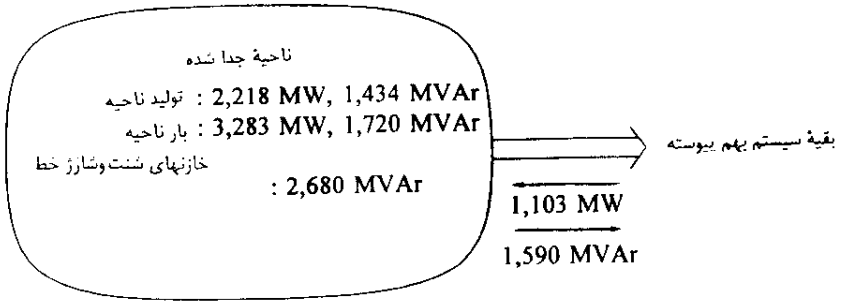
پارهٔ موردنظر درنتیجهٔ جدایی ناحیه‌ای شامل تولید ۲۲۱۸ MW و بار ۳۲۸۳ MW تشکیل شده است. همان طورکه در شکل ۱۶ ـ ۸ نشان داده شده است، قبل از پارگی ناحیه، ۱۱۰۳ MW، وارد و ۱۵۹۰ MVAr صادر می‌کند.

ترکیب تولید در داخل ناحیه به شرح زیر است:

- تولید هسته‌ایِ ۱۲۰۰ MW، به وسیلهٔ دو واحد در یک نیروگاه؛
- تولید آبیِ ۱۰۱۸ MW، به وسیلهٔ شش نیروگاه؛

دو واحد هسته‌ای در حدّهای بار خودکار می‌کنند. تولید آبی، ذخیرهٔ چرخانی حدود ۱۷۰ MW دارد.

1. Wicket Gate 2. Priming



شکل ۱۶ ـ ۸ وضعیت توان حقیقی و راکتیو قبل از جدایی

بارزدایی کمبود فرکانس

رله‌های فرکانسی (فصل ۱۱، بخش ۱۱ ـ ۱ ـ ۷ را ببینید)، مطابق شکل ۱۱ ـ ۳۱، برای قطع تا ۵۰٪ بار، در چهار مجموعه، بسته به افت فرکانسی و آهنگ کاهش فرکانس، به کار گرفته می‌شوند. بارزدایی حدود ۰/۵ ثانیه بعد از عمل رله به تأخیر انداخته می‌شود.

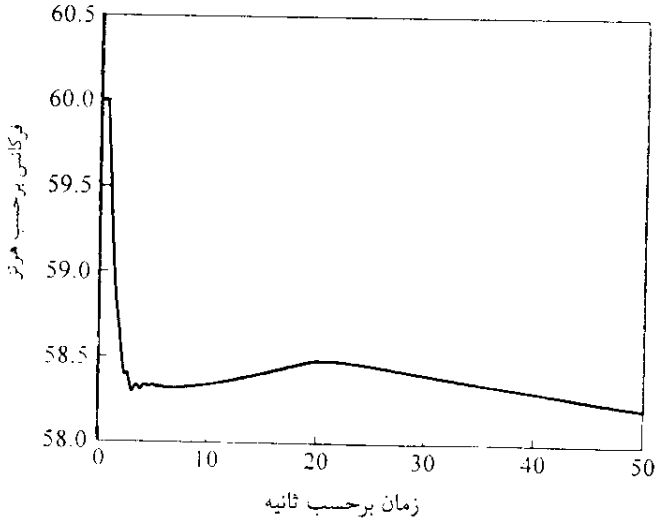
شبیه‌سازی وضعیت پارگی

وضعیّت پارگی به کمک باز کردن خطوط ارتباطی بین ناحیهٔ موردنظر و بقیهٔ سیستمِ به هم پیوسته، شبیه‌سازی می‌شود. جزئیات نمایش نیروگاهها و سایر عناصر سیستم، مشابه مطالعهٔ موردیِ توضیح داده شده در بخش ۱۶ ـ ۵ ـ ۱ است. واحدهای هسته‌ای به تحریک کننده‌های تریستوری، پایدارسازهای سیستم قدرت و سیستمهای کنترل الکتروهیدرولیکی و واحدهای آبی به تحریک‌کننده‌های چرخان جریان مستقیم و گاورنرهای مکانیکی هیدرولیکی مجهز هستند. دو حالت، در نظر گرفته شده است: یکی بدون کلیدزنیِ خازنی و دیگری با خازنهایی با ظرفیتِ نامیِ ۷۰۰ MVAr که به دنبال پارگی از مدار خارج می‌شوند. بارها به صورت توابعی غیرخطّی از ولتاژ و فرکانس نمایش داده می‌شود.

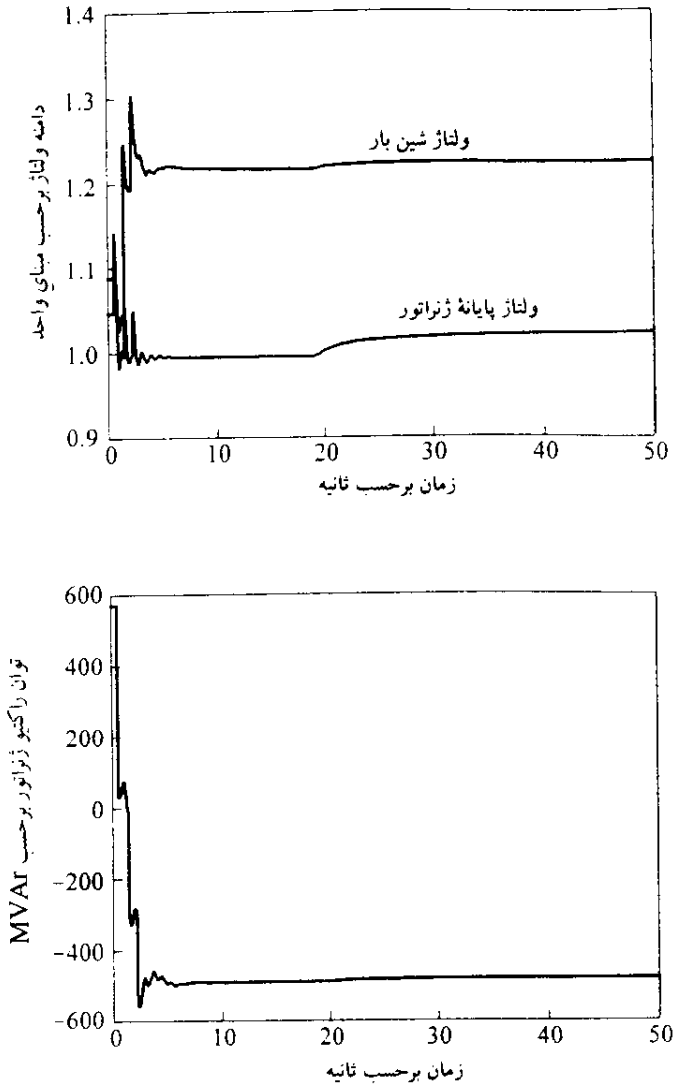
الف) بدون کلیدزنی خازنی. توالی کلیدزنی، شامل نتایج ناشی از رله‌های بارزدایی، به شرح ذیل است:

زمان(ثانیه)	حادثه
۰/۵	پارگی با خارج از مدار شدن همزمان خطوط ارتباطی، حاصل می‌شود.
۰/۹	فرکانس سیستم به HZ ۵۹/۵ افت می‌کند که آهنگ کاهش آن HZ/s ۱/۲۵ است؛ وضعیّت برای قطع اوّلین دو مجموعهٔ بار برآورده شده است.
۱/۴	۲۵٪ بارِ ناحیه، قطع می‌شود.
۱/۶	فرکانس سیستم به HZ ۵۸/۸ افت می‌کند؛ وضعیت برای قطع چهارمین مجموعهٔ بار برآورده شده است.
۲/۲	۱۵٪ دیگر از بار قطع می‌شود.
۵/۰	شبیه‌سازی خاتمه می‌یابد.

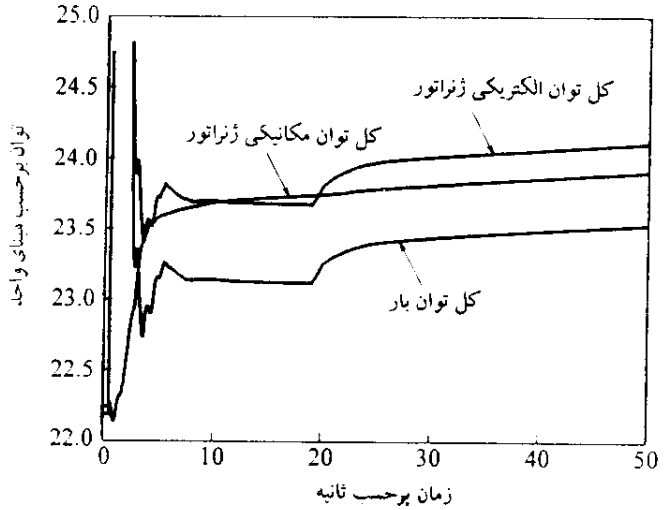
(توجه: آهنگ فرکانس از HZ/s ۲ بیشتر نمی‌شود و از این رو، سومین مجموعهٔ بار، قطع نمی‌شود).



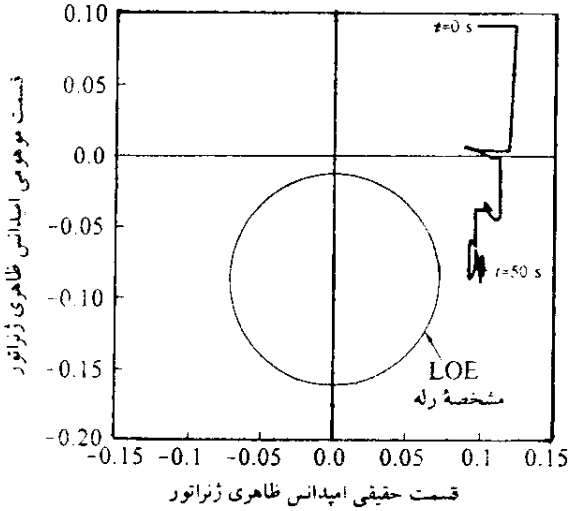
شکل ۱۶ ـ ۹ فرکانس سیستم با بارزدایی کمبود فرکانس و بدون کلیدزنی خازن



شکل ۱۶ ـ ۱۰ ولتاژ پایانهٔ واحد هسته‌ای و توان راکتیو و ولتاژ شین بار با بارزدایی بدون کلیدزنی خازنی



شکل ۱۶ ـ ۱۱ کل توان مکانیکی و الکتریکی تولیدشده و توان بار با بارزدایی و بدون کلیدزنی خازن

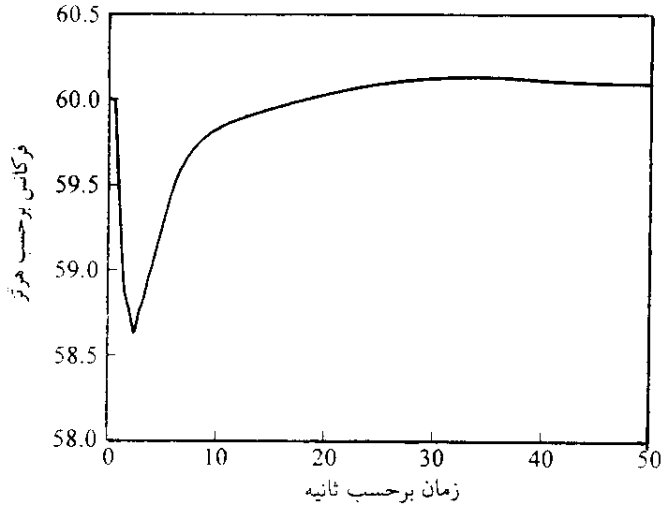


شکل ۱۶ ـ ۱۲ مکان هندسی امپدانس ظاهری از دیدگاه رلهٔ LOE؛ امپدانس برحسب مبنای واحد بر پایهٔ ۱۰۰ MVA بیان شده است.

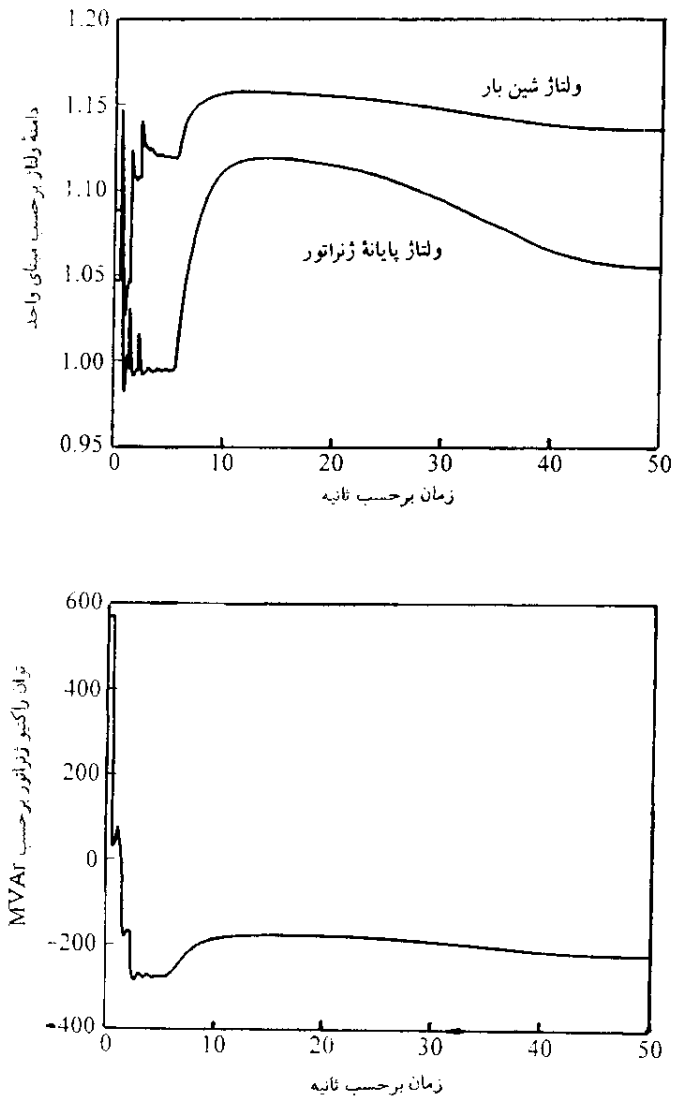
شکلهای ۱۶ ـ ۹ تا ۱۶ ـ ۱۱ نمودارهای فرکانس، ولتاژِ پایانه و خروجیِ توان راکتیو یکی از واحدهای هسته‌ای، ولتاژ یک شین بار، کلّ توان مکانیکی و توان الکتریکی همهٔ ژنراتورها و مجموع توانِ حقیقی عرضه شده به بارهای ناحیه را نشان می‌دهد. از شکل ۱۶ ـ ۹ مشاهده می‌شود که فرکانس سیستم در زمانی حدود ۲ ثانیه، به زیر ۵۸/۵ HZ افت می‌کند و علی‌رغم قطع حدود ۴۰٪ بار ناحیه، زیر این سطح باقی می‌ماند. دلیل این امر از شکلهای ۱۶ ـ ۱۰ و ۱۶ ـ ۱۱ بوضوح مشاهده می‌شود. به علت مازاد توان راکتیو در ناحیه، ولتاژ سیستم بعد از پارگی به مقدار زیادی افزایش پیدا می‌کند، که همین موضوع، توانِ بار را، حتی بعد از بارزدایی، بالا نگه می‌دارد.

کلّ توان راکتیو جذب شده به وسیلهٔ واحدهای هسته‌ای از حدّ گرمایی پیوستهٔ ناحیه انتهایی ژنراتورها فراتر می‌رود (فصل ۵، بخش ۵ ـ ۴ ـ ۱ را ببینید).

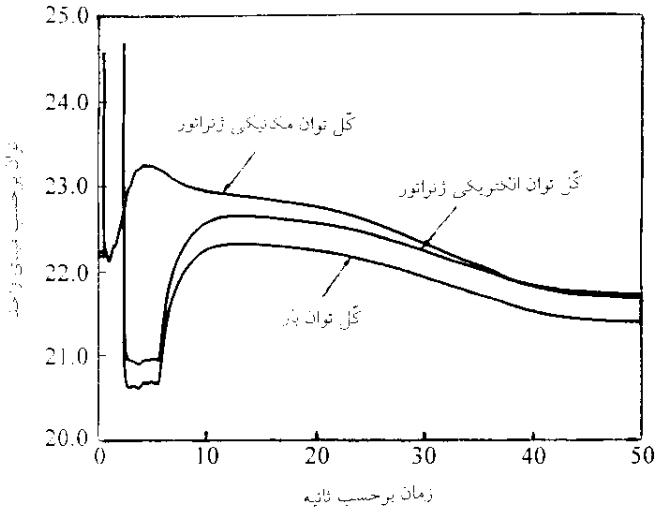
شکل ۱۶ ـ ۱۲ امپدانس ظاهری را از دیدگاه رلهٔ بی‌تحریکی (LOE)، که در پایانه‌های یکی از واحدهای هسته‌ای قرار داده شده، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مکان هندسی امپدانس، وارد مشخصهٔ عمل رله نمی‌شود.



شکل ۱۶ ـ ۱۳ فرکانس سیستم با بارزدایی کمبود فرکانس و کلیدزنی خازن



شکل ۱۶ ـ ۱۴ ولتاژ پایانهٔ واحد هسته‌ای و توان راکتیو و ولتاژ شین بار با بارزدایی و کلیدزنی خازنی



شکل ۱۶ ـ ۱۵ کل توان مکانیکی و الکتریکی تولید شده و توان بار با بارزدایی و کلیدزنی خازنی

ب) با خارج نشدن خازنهای شنت با ظرفیت MVAr ۷۲۰.

توالی کلیدزنی در این حالت به شرح زیر است:

زمان(ثانیه)	حادثه
۰/۵	پارگی، تشکیل می‌شود.
۰/۹	وضعیّت برای قطع دو مجموعهٔ اوّل بار برآورده شده است.
۱/۴	۲۵٪ بار قطع و MVA ۴۸۵ خازن خارج می‌شود.
۱/۸	فرکانس کمتر از HZ ۵۸/۸ می‌شود؛ وضعیّت برای قطع چهارمین مجموعه برآورده شده است.
۲/۳	۱۵٪ دیگر از بار قطع می‌شود و MVAr ۲۳۵ خازن خارج می‌گردد.
۵/۰	شبیه‌سازی خاتمه می‌یابد.

شکلهای ۱۶ ـ ۱۳ تا ۱۶ ـ ۱۵ نتایج متناظر را نشان می‌دهد. در این حالت، ولتاژهای سیستم به میزان حالت قبلی افزایش پیدا نمی‌کنند. به دنبال بارزدایی، مجموع توان حقیقی تحویلی به

بارها به زیر تولید موجود اُفت می‌کند. فرکانس سیستم در زمانی حدود ۲۰ ثانیه به مقدار اسمیِ خود برمی‌گردد و به مقدار حداکثری حدود ۶۰/۱ هرتز می‌رسد. فرکانس حالت ماندگار در اندکی بالاتر از مقدار اسمی، که به وسیلهٔ مشخّصه‌های افتی گاورنرهای سرعتِ کلیهٔ واحدهای تولیدی موجود در ناحیه تعیین می‌شود، قرار می‌گیرد.

شکل ۱۶ ـ ۱۴ نشان می‌دهد که ولتاژ پایانهٔ واحد هسته‌ای، در طول دوره‌ای بین ۵ تا ۱۰ ثانیه بسرعت افزایش پیدا می‌کند و سپس بتدریج به مقداری حدود ۱/۰۵ pu افت می‌کند. این پاسخ، ناشی از عمل پایدارساز سیستم قدرت است و می‌تواند تا حدودی به کمک تغییر پارامترهای PSS اصلاح شود (فصل ۱۷، بخش ۱۷ ـ ۲ ـ ۱ را ببینید).

با کلیدزنی خازنی، توان راکتیو جذب شده به وسیلهٔ واحد هسته‌ای در حدّ توانایی پیوستهٔ ژنراتور می‌باشد.

منابع

[1] D.R. Davidson, D.N. Ewart, and L.K. Kirchmayer, "Long-Term Dynamic Response of Power System Disturbance: An Analysis of Major Disturbances," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-94, No. 3, pp. 819-826. May/June 1975.

[2] C. Concordia, D.R. Davidson, D.N. Ewart, L.K. Kirchmayer, and R.P. Schulz, "Long-Term Power System Dynamics - A New Planning Dimension," CIGRE Paper 32-13, 1976.

[3] U.G. Knight, "International Survey of Major Disturbances," CIGRE SC32/WG01 Report, 1978.

[4] P. Kundur, D.C. Lee, J.P. Bayne, and P.L. Dandeno, "Impact of Turbine Generator Overspeed Controls on Unit Performance under System Disturbance Conditions," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-104, No. 6, pp. 1262-1267, June 1985.

[5] D.N. Ewart, "Whys and Wherefores of Power System Blackouts," *IEEE Spectrum*, pp. 36-41, April 1978.

[6] L.H. Fink and K. Carlsen, "Operating under Stress and Strain," *IEEE Spectrum*, pp. 48-53, March 1978.

[7] R.M. Maleszwski, R.D. Dunlop, and G.L. Wilson, "Frequency Actuated Load Shedding and Restoration," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-90, No. 4, pp. 1452-1459, 1971.

[8] G.A. Weber, M.C. Winter, and S.M. Follen, "Nuclear Plant Response to Grid Electrical Disturbances," EPRI Report NP-2849, February 1983.

[9] V.F. Carvalho, "Power Plant Control," CIGRE SC39/WG04 Survey Paper D, CIGRE SC39/IFAC Meeting, Florence, September 1983.

[10] D. Rumpel et al., "Tripping to Houseload - Methods, Application, Experience," CIGRE SC39/IFAC Meeting, Florence, September 1983.

[11] CIGRE Working Group 32-03, "Tentative Classification and Terminologies Relating to Stability Problems of Power Systems," *Electra*, No. 56, 1978.

[12] EPRI Report EL-596, "Midterm Simulation of Electric Power Systems," Project RP745, June 1975.

[13] K. Hemmaplardh, J.W. Manke, W.R. Pauly, and J.W. Lamont, "Considerations for Long Term Dynamic Simulation Program," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-1, pp. 129-135, February 1986.

[14] V. Converti, D.P. Gelopulos, M. Housley, and G. Steinbrenner, "Long-Term Stability Solution of Interconnected Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-95, No. 1, pp. 96-104, January/February 1976.

[15] Discussion of reference 14 by R.P. Schulz and H.H. Happ.

[16] CIGRE Task Force 38-02-08, "An International Survey of the Present Status and the Perspective of Long Term Dynamics in Power Systems," Final Report, January 1992.

[17] M. Stubbe, A. Bihain, J. Deuse, and J.C. Badder, "STAG - A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behaviour of Electrical Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, No. 1, pp. 129-138, February 1989.

[18] P. Kundur, "A Survey of Utility Experiences with Power Plant Response during Partial Load Rejections and System Disturbances," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, No. 5, pp. 2471-2475, May 1981.

[19] T.D. Younkins and L.H. Johnson, "Steam Turbine Overspeed Control and Behaviour during System Disturbances," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, No. 5, pp. 2504-2511, May 1981.

[20] O.W. Durrant, "Boiler Response to Partial Load Rejections Resulting from System Upsets," IEEE Paper 81-JPGC-922-4, presented at 1981 Joint Power Generation Conference, St. Louis, MO, October 4-8, 1981.

[21] A.H. Rawdon and F.A. Palacios, "Effects of Partial Load Rejection on Fossil Utility Steam Generators," IEEE Paper 81-JPGC-907-5, presented at 1981 Joint Power Generation Conference, St. Louis, MO, October 4-8, 1981.

[22] IEEE Working Group Report, "Guidelines for Enhancing Power Plant Response to Partial Load Rejections," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-102, No. 6, pp. 1501-1504, June 1983.

[23] P.L. Dandeno, P. Kundur, and J.P. Bayne, "Hydraulic Unit Dynamic Performance under Normal and Islanding Conditions - Analysis and Validation," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-97, No. 6, pp. 2134-2143, November/December 1978.

[24] L.M. Hovey, "Optimum Adjustment of Hydro Governors on Manitoba Hydro System," *AIEE Trans.*, Vol. 81, Part III, pp. 581-587, December 1962.

[25] F.R. Schleif and A.B. Wilbor, "The Coordination of Hydraulic Turbine Governors for Power System Operation," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-85, pp. 750-758, July 1966.

[26] R.P. Schulz, "Capabilities of System Simulation Tools for Analyzing Severe Upsets," *Proceedings of International Symposium on Power System Stability*, Ames, Iowa, pp. 209-215, May 13-15, 1985.

[27] EPRI Report EL-6627, "Long-Term Dynamic Simulation: Modelling Requirements," Final Report of Project 2473-22, Prepared by Ontario Hydro, December 1989.

[28] EPRI Report, "Long-Term Power System Dynamics," Final Report of Project RP 90-7, Prepared by General Electric Company, April 1974.

[29] R.J. Frowd, J.C. Giri, and R. Podmore, "Transient Stability and Long-Term Dynamics Unified," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, pp. 3841-3850, October 1982.

[30] C.W. Gear, "Simultaneous Numerical Solution of Differential-Algebraic Equations," *IEEE Trans.*, Vol. CT-18, No. 1, pp. 89-95, January 1971.

[31] C.W. Gear, "The Automatic integration of Ordinary Differential Equations," *Communications of the ACM*, Vol. 14, No. 3, March 1981.

[32] N.J. Balu, H.W. Mosteller, and R.P. Schulz, "LOTDYS Analysis of August 1973 Gulf Coast Area Power System Disturbance," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 2471-2475, May 1981.

[33] Q.B. Chou, P. Kundur, P.N. Acchione, and B. Lautsch, "Improving Nuclear Generating Station Response for Electrical Grid Islanding," *IEEE Trans.*, Vol. EC-4, No. 3, pp. 406-413, September 1989.

فصل هفدهم

روشهای بهبود پایداری

پنج فصل گذشته جنبه‌های فیزیکی دسته‌بندیهای مختلف پایداری سیستم قدرت و روشهای تحلیل آنها را توصیف کردند. همچنین عوامل کلیدی که در مسائل پایداری نقش دارند و روشهای کاهش اثر آنها مورد بررسی قرار گرفت. این فصل روشهای خاص به کارگرفته شده برای تقویت پایداری گذرا و سیگنال کوچک را مرور می‌کند. از دهۀ ۱۹۶۰ میلادی تاکنون این دو دسته از مباحث پایداری سیستم مورد توجه بسیاری قرار گرفته و روشهای بهبود آنها نیز از سایر دسته‌ها کاملتر شده است.

ممکن است برای یک سیستم معلوم، هیچیک از روشهای بهبود پایداری کافی نباشد. در این صورت احتمالاً بهترین روش، ترکیبی از چند روش است که با تشخیص درست، برای کمک به حفظ پایداری در پیشامدها و وضعیتهای مختلف سیستم، انتخاب شده است. در اعمال این روشها برای حل مسائل پایداریِ خاص، درنظر داشتن عملکرد کلی سیستم قدرت، مهم است. پاسخهای مسألۀ پایداریِ یک دسته، نباید به قیمت تخریب پاسخ دستۀ دیگر تمام شود.

بسیاری از روشهای تقویت پایداریِ توصیف شده در این فصل، راه حلهایی هستند که عموماً برای طراحی اقتصادی سیستم در دسترس است. با طراحی و کاربرد مناسب، این روشها به مقدار زیادی در قابلیت انعطاف کارِ سیستم، بدون وجه المصالحه قرار دادن سایر جنبه‌های عملکرد سیستم، نقش دارند.

البته برخی از این روشها، تا اندازه‌ای «جسورانه» هستند و بکارگیری آنها فقط در حالتهای خاصی قابل توجیه است زیرا این روشها در حالی که پایداری سیستم را بهبود می‌دهند، بر برخی از وسایل نیز باری را تحمیل می‌کنند. از این‌رو، کاربردشان باید براساس ارزیابی دقیق از مزایا و هزینه‌های آنها باشد.

۱۷ ـ ۱ تقویت پایداری گذرا

روشهای بهبود پایداری گذرا سعی دارند تا یک یا چند مورد از اثرهای زیر را برآورده کنند:

الف) کاهش تأثیر اغتشاش با حداقل سازی شدت خطا و دورهٔ آن؛

ب) افزایش نیروهای سنکرون کنندهٔ بازیافت؛

ج) کاهش گشتاور شتابدهنده از طریق کنترل توان مکانیکی توربین؛

د) کاهش گشتاور شتابدهنده با اعمال بار مصنوعی.

روشهای مختلف رسیدن به این اهداف در زیر آورده شده است.

۱۷ ـ ۱ ـ ۱ رفع خطا با سرعت زیاد

مقدار انرژی جنبشیِ کسب شده به وسیلهٔ ژنراتورها به هنگام بروز خطا، به طور مستقیم به مدت خطا بستگی دارد و هرچه خطا سریعتر برطرف شود، اغتشاش کمتری را موجب می‌گردد.

امروزه کلیدهای دوسیکلی، همراه با رله‌ها و وسایل ارتباطی با سرعت بالا، در مکانهایی که رفع خطای سریع مهم است، به طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شوند.

در حالتهای خاص، ممکن است رفع خطای سریعتر نیز مطلوب باشد. مرجع ۱ بهبود و بکارگیری نوعی کلید یک سیکلی را به وسیلهٔ BPA[1] توضیح می‌دهد. با ترکیب این کلید با یک حساسه نوع اضافه جریان با پاسخ سریع که اندازهٔ خطا را پیش‌بینی می‌کند، تقریباً دورهٔ خطای کل یک سیکل به دست می‌آید. کلیدهای یک سیکلی هنوز به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. مرجع ۲ یک سیستم رله با سرعت بسیار بالا را برای خطوط EHV براساس آشکارسازی موج سیار، توضیح می‌دهد.

۱۷ ـ ۱ ـ ۲ کاهش راکتانس سیستم انتقال

راکتانسهای اندوکیتوِ سریِ شبکه‌های انتقال، تعیین کنندهٔ اصلی حدود پایداری هستند. کاهش راکتانسهای عناصر مختلف شبکهٔ انتقال، با افزایش انتقال توان سنکرون کننده پس از خطا، پایداری گذرا را بهبود می‌بخشد. بدیهی است که سرراست‌ترین روش حصول این کاهش، کاهش راکتانسهای مدارهای انتقال است که بوسیلهٔ ظرفیت ولتاژ، ترکیب خط و هادی و تعداد مدارهای موازی تعیین می‌شوند. در زیر روشهای دیگری برای کاهش راکتانسهای شبکه آورده شده است:

---

1. Bonneville Power Administration

الف) استفاده از ترانسفورمرهایی با راکتانسهای نشتی کمتر؛
ب) جبرانسازی خازن سری خطوط انتقال.

راکتانس نشتی ترانسفورمر در مبنای واحد، به طور نوعی در بازهٔ ۰/۱ تا ۰/۱۵ قرار دارد. در ترانسفورمرهای جدیدتر، باید حداقل راکتانس نشتیِ قابل قبول که آن را می‌توان در محدودهٔ طبیعی روند طراحی ترانسفورمر به دست آورد، با مشورت سازنده تعیین شود [۳]. در بسیاری مواقع ممکن است انتخاب یک ترانسفورمر با حداقل راکتانس ممکن، از نظر اقتصادی برتری فراوانی داشته باشد.

خازنهای سری مستقیماً راکتانس سری خط را جبران می‌کنند. کاربرد خازنهای سری برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو، در فصل یازدهم مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در بخش ۱۱ ـ ۲ ـ ۸ نشان داده شده است، می‌توان حداکثر توانایی انتقال توان خط انتقال را به میزان چشمگیری با استفاده از مجموعه‌های خازن سری افزایش داد. این کار، بسته به امکانات فراهم آمده برای کنارگذریِ خازن، حین خطا و وارد کردن مجدد آن بعد از رفع خطا، مستقیماً به تقویت پایداری گذرا منجر می‌شود (بخش ۱۱ ـ ۲ ـ ۵ را ببینید). سرعت وارد کردن مجدد خازن عامل مهمی در حفظ پایداری گذراست [۴]. طراحیهای اولیه دهانه‌های حفاظتی و کلیدهای کنارگذر، مزایای قابل حصول به وسیلهٔ جبرانسازی خازن سری را محدود می‌کرد. لیکن، با روند حاضر و استفاده از مقاومتهای غیرخطی اکسید روی، در عمل ورود مجدد خازن به طور آنی رخ می‌دهد.

همان‌طور که در فصل پانزدهم (بخش ۱۵ ـ ۳) بحث شد، یکی از مشکلات جبرانسازی سری، امکان تشدید زیر سنکرون با توربوژنراتورهایی است که در نزدیکی محل جبرانسازی قرار دارند. این جنبه باید بدقت تحلیل و اقدامات باز دارندهٔ مناسبی اتخاذ شود.

خازنهای سری، به طور سنتی برای جبران کردنِ خطوط هواییِ بسیار طولانی به کار گرفته می‌شوند. اما اخیراً مزایای جبرانسازی خطوط کوتاهتر، ولی بشدت تحت بار به وسیلهٔ خازنهای سری به‌طور فزاینده‌ای مورد تأیید قرار گرفته است.

در کاربردهای پایداری گذرا، بکارگیری *خازنهای سری قابل کلیدزنی*، امتیازاتی دارد. از جمله اینکه به دنبال تشخیص خطا یا نوسان توان، می‌توان مجموعهٔ خازن سری را وارد و در حدود ۰/۵ ثانیه بعد خارج کرد. از چنین مجموعهٔ قابل کلیدزنی می‌توان در یک پُست که به چند خط سرویس می‌دهد، استفاده کرد.

در مرجع ۵ نشان داده شده که برای یک حد پایداری گذرای معلوم، کل ظرفیت خازنهای سریِ موردنیاز در صورتی که برخی از خازنها کلیدزنی شده باشند، کمتر از حالتی است که

هیچکدام کلیدزنی نشده باشند. طرحی که در آن تعدادی از خازنها کلیدزنی شده باشند، نوسانهای زاویه‌ای ماشینها را کاهش می‌دهد و این نیز به نوبهٔ خود بالا و پایین رفتن بارها را، خصوصاً آنهایی را که در نزدیکی مرکز الکتریکی هستند، کاهش می‌دهد.

البته باید افزود، بکارگیری جبرانسازی سری، رله کردن حفاظتی را بخصوص هنگامی که خازنهای سری کلیدزنی می‌شوند، پیچیده‌تر می‌کند.

۱۷ ـ ۱ ـ ۳ جبرانسازی قابل تنظیم شنت

جبرانسازی شنتی که بتواند ولتاژها را در نقاط انتخاب شدهٔ سیستم انتقال حفظ کند، می‌تواند با افزایش عبور توان سنکرون کننده بین ژنراتورهای به هم پیوسته، پایداری سیستم را بهبود بخشد. می‌توان برای این منظور از کندانسورهای سنکرون با جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو، که در فصل یازدهم (بخشهای ۱۱ ـ ۲ ـ ۶ تا ۱۱ ـ ۲ ـ ۸) توضیح داده شد، استفاده کرد.

همچنان که در بخش ۱۱ ـ ۲ ـ ۸ نشان داده شد، جبرانسازی قابل تنظیم شنت، توانایی انتقال توان حداکثر خط انتقال طولانی‌را افزایش‌می‌دهد و بدین‌ترتیب، بوضوح پایداری‌گذرا را تقویت می‌کند.

۱۷ ـ ۱ ـ ۴ بازدارندهٔ دینامیکی [۶ ـ ۱۰]

بازدارندهٔ دینامیکی، ایدهٔ اعمال یک بار الکتریکی مصنوعی را حین اغتشاش گذرا، به منظور افزایش خروجی توان الکتریکی ژنراتورها و درنتیجه کاهش شتاب روتور به کار می‌گیرد.

یکی از نمونه‌های بازدارندهٔ دینامیکی، به شکل کلیدزنی *مقاومتهای شنت*، برای حدود ۰/۵ ثانیه به دنبال بروز خطا و به منظور کاهش توان شتابدهندهٔ ژنراتورهای نزدیک و از بین بردن انرژی جنبشی حاصل از بروز خطا، می‌باشد. **BPA** چنین طرحی را به منظور تقویت پایداری گذرا برای خطوط شمال غربی پاسیفیک به کار گرفته است [۸]، بازدارنده از یک مقاومت ۲۴۰ **KV**، ۱۴۰۰ **MW** تشکیل شده که خود مقاومت از ۴۵۰۰۰ft سیم فولادی ضدزنگ ۰/۵ اینچی که بر سه برج پیچیده شده، ساخته شده است. مرجع ۹ گزارشهای مختصری را از کاربردهای مقاومت بازدارنده در ژاپن، چین، روسیه و استرالیا ارائه می‌کند.

مقاومتهای بازدارنده تا به امروز فقط به نیروگاههای آبی دور از مراکز بار اعمال شده است. واحدهای آبی، در مقایسه با واحدهای حرارتی بسیار خشن[1] هستند و بنابراین می‌توانند ضربه ناگهانی ناشی از کلیدزنی مقاومتها را بدون اثر مخربی تحمل کنند.

1. Rugged

اگر مقاومتهای بازدارنده به واحدهای حرارتی اعمال شوند، باید اثر آن بر عمر خستگی محور بدقت بررسی شود (فصل ۱۵، بخش ۱۵ ـ ۴ را ببینید) و اگر عمل کلیدزنی غیرقابل قبول تشخیص داده شود، ممکن است کلیدزنی مقاومتها به اجبار در سه یا چهار گام پخش شده روی یک سیکل کامل از پایین‌ترین مُد پیچشی، صورت پذیرد [۱۰].

مقاومتهای بازدارنده که تا امروز به کار گرفته شده‌اند، همگی به صورت موازی بوده‌اند. اما می‌توان از *مقاومتهای سری* نیز برای فراهم آوردن اثر بازدارندگی استفاده کرد. در این حالت، انرژی هدر رفته، با جریان ژنراتور (به جای ولتاژ)، متناسب است. یکی از روشهای وارد کردن مقاومتها به طور سری، نصب ترکیبی از مقاومت سه فازِ اتصال ستاره‌ای با یک کلید کنارگذر در نقطهٔ خنثای ترانسفور بالابرندهٔ ژنراتور به منظور کاهش عایق مقاومت و ملاحظات کلید است [۱۰]. با باز شدن کلید کنار گذر به هنگام بروز اغتشاش گذرا، مقاومت وارد عمل می‌شود.

صورت دیگر از کاربرد مقاومت بازدارنده، که پایداری سیستم را فقط برای خطاهای نامتعادل زمین تقویت می‌کند از مقاومتی تشکیل شده که به طور دائمی بین زمین و نقطهٔ خنثای سیم‌پیچ فشار قوی با اتصال ستاره ترانسفورمر بالابرندهٔ ژنراتور وصل می‌شود [۳۰]. در این صورت تحت حالت متعادل، جریانی از مقاومت نقطهٔ خنثی نمی‌گذرد. هنگامی که خطای خط به زمین یا دو خط به زمین رخ می‌دهد، جریان از طریق اتصال نقطهٔ خنثی جاری می‌شود و تلفات مقاومتی به صورت یک بازدارندهٔ دینامیکی عمل می‌کند.

در حالت مقاومتهای بازدارندهٔ قابل کلیدزنی، باید زمانهای کلیدزنی را براساس شبیه‌سازیهایی که به جزئیات می‌پردازند، انتخاب کرد. اگر مقاومتها برای زمان خیلی طولانی متصل باقی بمانند، امکان ناپایداری در حالت «نوسان به عقب» وجود دارد.

۱۷ ـ ۱ ـ ۵ کلیدزنی راکتور

راکتورهای شنتِ نزدیک به ژنراتورها، وسایل ساده و راحتی را برای بهبود پایداری گذرا فراهم می‌آورند. راکتور معمولاً متصل به شبکه باقی می‌ماند. بار راکتیو حاصله، ولتاژ داخلیِ ژنراتور را افزایش می‌دهد، که برای پایداری سودمند است. به دنبال بروز خطا، از مدار خارج کردن راکتور وضعیت پایداری را بهتر می‌کند.

۱۷ ـ ۱ ـ ۶ کار مستقل از قطب کلیدها

کار مستقل از قطب کلیدها به استفاه از مکانیزمهای جداگانه برای هر فاز از کلید اطلاق می‌شود، به گونه‌ای که سه فاز مستقل از یکدیگر باز و بسته می‌شوند. درنتیجه، نقص یک قطب، عملکرد

دو قطب دیگر را محدود نمی‌کند. اگرچه قطبهای کلید به طور مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند، معمولاً سیستم رله به گونه‌ای مرتب می‌شود که هر سه قطب را برای هر نوع خطایی قطع کند.

از کار مستقل از قطب می‌توان در مکانهایی استفاده کرد که معیار طراحی سیستم شامل یک خطای سه فاز ترکیب شده با نقص کلید است. زمانی که هر سه قطب کلید نتوانند باز شوند، حفظ پایداری سیستم در پیشامدهای خطای سه فاز، بسیار مشکل است. البته با کلیدهای طراحی شده برای کار مستقل از قطب، نقص هر سه قطب بسیار بعید است؛ زیرا استفاده از سیستم‌های دوگانهٔ رله، مقدار تحریک کلید و مکانیزمهای عملیاتی، تضمین می‌کنند که حداقل دو قطب باز خواهند شد. از این‌رو، کار مستقل کلید معیوب هنگامی که دو قطب باز شوند، وضعیت خطای سه فاز را به وضعیت خطای تک خط به زمین تقلیل می‌دهد. بنابراین، شدت یک خطای سه فاز با کلید معیوب به میزان زیادی کاهش خواهد یافت.

۱۷ ـ ۱ ـ ۷ کلیدزنیِ تک قطبی

کلیدزنی تک قطبی، مکانیزم عملیاتی جداگانه‌ای را برای هر فاز به کار می‌گیرد، برای خطای تک خط به زمین، سیستم رله به گونه‌ای طراحی شده که فقط فاز معیوب را خارج کند، و به دنبال آن بست مجدد سریع در زمانی بین ۰/۵ تا ۱/۵ ثانیه رخ می‌دهد. برای خطاهای چند فازه، تمامی سه فاز خارج می‌شوند.

در مدتی که یک فاز باز است، توان بر روی دو فاز باقیمانده منتقل می‌شود.

از آنجا که اکثر خطاها در خطوط انتقال از نوع تک خط به زمین است، در مقایسه با خارج کردن و بستن مجدد سه فاز، باز و بست مجددِ فاز معیوب به تنهایی باعث بهبود پایداری گذرا می‌شود.

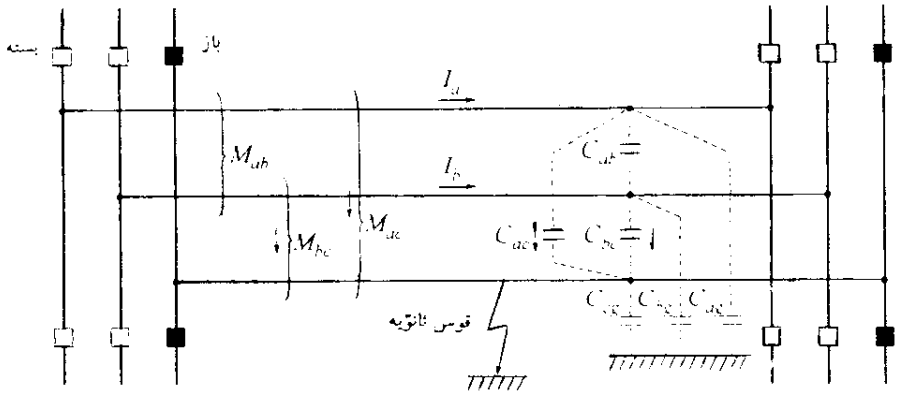
کلیدزنی تک قطبی، در مواقعی که یک خط اصلی عمده دو سیستم را به هم وصل می‌کند یا هنگامی که یک خط اصلی عمده یک نیروگاه را به بقیهٔ سیستم وصل می‌کند، مورد توجه خاص می‌باشد. این روش همچنین می‌تواند در سیستمهایی با چند خط برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم در مقابل اغتشاشهای چند پیشامدی، به کار گرفته شود [۱۱].

سه مشکل بالقوه در اعمال کلیدزنی تک قطبی وجود دارد که باید آنها را درنظر گرفت:

- خاموشی قوس ثانویه؛
- خستگی بر روی محورهای توربین ـ ژنراتور و تیغه‌های توربین؛
- بار گرمایی بر روی ژنراتورهایی که در نزدیکی قرار گرفته‌اند (ناشی از جریانهای توالی منفی).

خاموشی قوس ثانویه

هنگامی که یک فاز از یک خط سه فاز در هر دو طرف باز شود، فاز معیوب به طور خازنی و اندوکتیو به دو فاز بدون عیب، که هنوز دارای انرژی هستند، دارای تزویج است (شکل ۱۷ ـ ۱ را ببینید). ولتاژی در فاز جدا شده، به علت تزویج خازنی و به میزان کمتری به علت تزویج القایی، القا می‌شود. اندازهٔ ولتاژ القا شده تابع مستقیمی از ظرفیتهای خازنی فاز به فاز و فاز به زمین است. ممکن است ولتاژ القا شده، قوس خطا را برای یک دورهٔ اضافه به دنبال باز کردن فاز، حفظ کند. قوس موجود روی هادیِ فازِ خطادار را بعد از آنکه از مدار خارج شده است، قوس ثانویه[1] می‌نامند. جریان قوس ثانویه به طور عمده به وسیلهٔ ولتاژ مدار و طول بخشی از خط که از مدار خارج شده است، تعیین می‌شود. این جریان همچنین تحت تأثیر موقعیت خطا، راکتورهای شنتی که مستقیماً به فازِ باز وصل شده‌اند و نیز جابجایی خط، قرار دارد.



شکل ۱۷ ـ ۱ جریان قوس ثانویه

مؤلفهٔ خازنی جریان قوس ثانویه، در اصل مستقل از موقعیت خطا و جریان بار است. مؤلفهٔ القایی جریان به مقدار زیادی به جریانهای بار بر روی دو فازِ دارای انرژی و موقعیت خطا، وابسته است؛ این مؤلفه برای خطا در وسط خط تقریباً صفر است و برای خطا در هر دو سر، حداکثر است. مرجع ۱۲ مقادیر نوعی جریان قوس را برای خطوط ۷۵۶ KV و ۳۴۵ KV می‌دهد: مؤلفهٔ خازنی جریان، به ازای هر (۱۶۰ Km) ۱۰۰ mi از طول خط، در حد ۵۰ A برای خطوط ۱۶۵ KV و ۳۰ A برای خطوط ۳۴۵ KV می‌باشد؛ حداکثر مؤلفهٔ القایی جریان در گسترهٔ ۱۰ تا

1. Secondary Arc

۱۵A، برای خطوط ۷۶۵ KV قرار دارد و هنگامی رخ می‌دهد که انتقال توان بر دو فاز دارای انرژی متناظر با بارگذاری امپدانس ضربه‌ای انجام می‌پذیرد.

در مرجع ۱۳، نتایج آزمایشهای خاموشی را که بر روی سیستم قدرت امریکا انجام شده، با نتایج چاپ شده از آزمایش بر روی سیستمهای دیگر و نیز نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌کند. نتیجهٔ کلی آن است که اگر جریان قوس بر روی خطوطِ با جبرانسازی راکتور شنت، حدود ۴۰ A یا کمتر و بر روی خطوط جبران نشده حدود ۲۰ A یا کمتر باشد قوس ثانویه باید در زمان ۵۰۰ ms خود بخود خاموش شود.

در کاربردهایی که برای آنها جریان قوس ثانویه بیش از مقادیر بالاست، خنثی کردن راکتانس خازنی الزامی است. یکی از روشهای این کار، استفاده از راکتورهای القایی شنت است. طرح راکتور چهارپایهٔ[1] توصیف شده در مراجع ۱۴ و ۱۵ در تعدادی از کاربردهای کلیدزنی تک قطبی برای کاهش جریان قوس ثانویه به کار گرفته شده است [۱۱]. در این طرح، یک راکتور فاز بین هر فاز و نقطهٔ خنثی و یک راکتور خنثی نیز بین زمین و نقطهٔ خنثی وصل می‌شود. شایان ذکر اینکه اگر راکتورهای شنت در جبرانسازی جریان عادی شارژ خط، برای کنترل ولتاژ لازم باشند، استفاده از این روش بسیار کارا خواهد بود (فصل ۱۱، بخش ۱۱ ـ ۲ ـ ۳ را ببینید). با اتصال مناسب، از این راکتورها می‌توان برای دستیابی به هدف کاهش جریان قوس ثانویه استفاده کرد.

یک روش دیگر برای جلوگیری از قوس ثانویه، همان طور که در مرجع ۱ توصیف شده است، استفاده از کلیدهای زمین‌ساز با سرعت بالاست. این روش برای خطوط بدون راکتورهای شنت کارایی دارد.

خستگی تیغه‌های توربینِ توربوژنراتور و محورها

همان‌طور که در فصل نهم (بخش ۹ ـ ۲ ـ ۳) بحث شد، یکی از ملاحظات در طراحی تیغه‌های طولانیِ توربین فشار ضعیف، آن است که فرکانس مُدهای ارتعاشیِ اصلی نباید با مضارب سرعت کار مطابقت داشته باشند زیرا ممکن است کلیدزنی تک قطبی حین زمان راکد بازبست و به هنگامی که یک فاز باز است، نوسانهای ۱۲۰ Hz گشتاور را تحریک کند. اگر این نوسانها با مُدهای نوسان طبیعی تیغه تشدید شوند، به تیغه‌ها صدمه خواهد زد.

ترتیب کلیدزنی تک قطبی، اغتشاشهایی پیاپی را بر سیستم محور توربین ـ ژنراتور تحمیل می‌کند. اغتشاش اولیه از خودِ خطا ناشی می‌شود، که برای یک خطای خط به زمین چندان

1. Four Legged Reactor Scheme

شدید نیست. هنگامی که خطا با بازکردن فاز خطادار برطرف می‌شود، اغتشاش دومی تحمیل می‌گردد. بازبست فازِ باز شده به طور موفق یا غیرموفق، اغتشاش اضافه‌ای را بر آن تحمیل می‌کند. همان‌طور که در فصل پانزدهم (بخش ۱۵ ـ ۴) بحث شد، ممکن است نوسانهای پیچشی محور ناشی از ضربه‌های پیاپی، حالت گذرای گشتاورهای محور را تقویت کند و هرکدام از چنین وقایعی می‌تواند به مقدار کمی به از بین رفتن عمر خستگی سیستم محور کمک کند. اگر توربین ـ ژنراتور تحت اثر تعداد زیادی از چنین وقایعی قرار گیرد، اثر تجمعیِ آنها می‌تواند موجب خرابی محور شود.

اثر کلیدزنی تک قطبی بر عمر خستگی محورها و تیغه‌ها، در مرجع ۷، برای واحدهای خاصی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج، کاهش چندانی را در عمر تیغه‌های یا بخشهای محور نشان نمی‌دهند. علاوه بر این، تاکنون تجربیات عملی هیچگونه مشکلی را در محور یا تیغهٔ توربین ژنراتور، که از کلیدزنی تک‌قطبی ناشی شده باشد، نشان نداده است [۱۱]. لیکن، مطالعهٔ هر کاربرد خاص قبل از اعمال عاقلانه خواهد بود.

بارگرمایی بر روی ژنراتورهای نزدیک

نامتعادل بودن سیستم حین دوره‌ای که یک فاز باز است به جریانهای توالی منفی در استاتورهای ژنراتورهای نزدیک و کندانسورهای سنکرون منجر می‌شود. جریانهای استاتور توالی منفی، موجب القای جریانهای روتور با فرکانس ۱۲۰ Hz می‌شود که باعث تولید حرارت می‌گردد. استانداردهایی ثبت شده‌اند که قابلیت جریان نامتعادل زمان ـ کوتاه و پیوستهٔ ژنراتور را تعریف می‌کنند [۱۸]. قابلیت زمان ـ کوتاه برحسب حاصل‌ضرب مجذور جریان فازِ توالی منفیِ ماشین (I_2) و زمان (t)، یعنی $I_2^2 t$، بیان می‌شود. مقدار $I_2^2 t$ مجاز، همان طور که در جدول ۱۷ ـ ۱ نشان داده شده است، به نوع ماشین بستگی دارد.

جدول ۱۷ ـ ۱ قابلیت جریان نامتعادل زمان ـ کوتاه

نوع ماشین	$I_2^2 t$ مجاز
ژنراتور قطب برجسته	۴۰
کندانسور سنکرون	۳۰
ژنراتورهای روتور استوانه‌ای	
ـ خنک شوندهٔ غیرمستقیم	۳۰
ـ خنک شوندهٔ مستقیم: تا ۸۰۰ MVA	۱۰
ـ خنک شوندهٔ مستقیم: ۸۰۰ ـ ۱۶۰۰ MVA	۱۰ − [(MVA - ۸۰۰) × ۰/۰۰۶۲۵]

I_2 در مبنای واحد جریان نامی آرمیچر و t برحسب زمان بیان شده است.

مطالعهٔ کاربردهای خاص کلیدزنی تک قطبی که به خطوط نزدیک به واحدهای حرارتی اعمال شده، نشان می‌دهد که بارگرمایی محدودکننده نیست (برای نمونه، مرجع ۱۲ را ببینید). لیکن، هر کاربردی باید به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد تا از زیاد نبودن بارگرماییِ توالی منفی، اطمینان حاصل شود.

۱۷ ـ ۱ ـ ۸ باز و بست سریع شیر توربین بخار

باز و بست سریع شیر[1] (که بعضی اوقات باز و بست زود شیر[2] نامیده می‌شود) روشی است قابل اعمال به واحدهای حرارتی که به حفظ پایداری گذرای سیستم قدرت کمک می‌کند. این روش، شامل بستن و بازکردن سریع شیرهای بخار به صورتی از قبل تعیین شده است تا به دنبال آشکار شدن خطای شدید سیستم انتقال، توان شتابدهندهٔ ژنراتور راکاهش دهد.

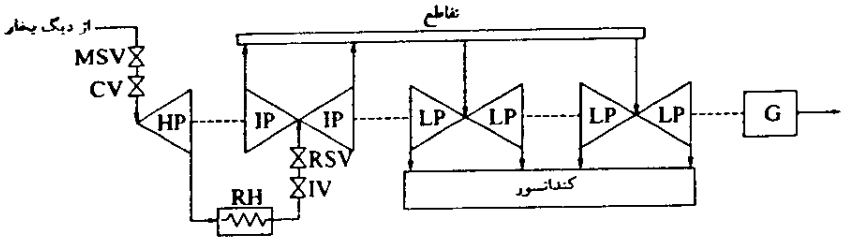
اگرچه اصول باز و بست سریع شیر در اوایل دههٔ ۱۹۳۰ میلادی شناخته شده بود [۱۹]، لیکن به چندین دلیل به طور گسترده‌ای به کار گرفته نشده است. از اواسط دههٔ ۱۹۶۰ میلادی تاکنون، شرکتهای برق متوجه شده‌اند که می‌توان در برخی مواقع از باز و بست سریع شیر به عنوان روشی مؤثر در بهبود پایداری سیستم استفاده کرد. تعدادی مقالهٔ تکنیکی چاپ شده است که مفاهیم اولیه و اثر این روش را توضیح می‌دهند [۲۰ ـ ۲۳] و چندین شرکت برق، روش مزبور را بر روی برخی از واحدهای خود آزمایش کرده و به کار گرفته‌اند [۲۴ ـ ۲۷].

مراحل باز و بست سریع شیر

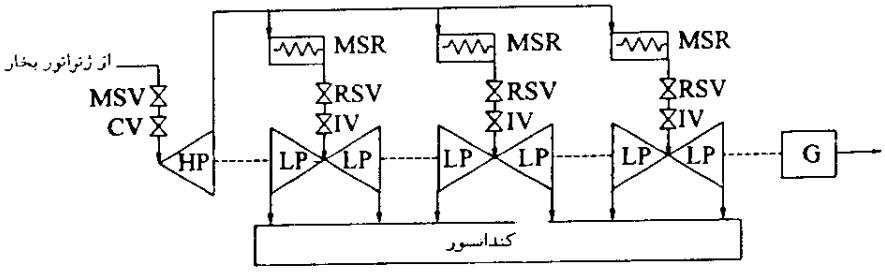
فصل نهم ساختار توربین بخار را برای واحدهای تولیدی سوخت فسیلی و هسته‌ای مورد بررسی قرار داد. برای نمایش کاربردهای باز و بست سریع شیر، یک واحد تولیدی سوخت فسیلی را با یک توربین باز حرارتی منفرد با ترکیب سری و یک واحد هسته‌ای درنظر بگیرید. ساختار توربین در شکل ۱۷ ـ ۲ نشان داده شده است. برای این واحدها، شیرهای کنترلی ورودی اصلی (CVها) و شیرهای میان‌راهی باز حرارت (IVها)، وسیله‌ای مناسب را برای کنترل توان مکانیکی توربین فراهم می‌آورند. بسته به چگونگی استفاده از این شیرها برای کنترل جریان بخار، امکانات متنوعی برای اعمال طرحهای باز و بست سریع شیر وجود دارد.

در یکی از طرحهای متداول، فقط شیرهای میان‌راهی بسرعت بسته شده، سپس پس از یک تأخیر زمانیِ کوتاه، به طور کامل باز می‌شوند. از آنجاکه شیرهای میان‌راهی تقریباً ۷۰٪ کل توان

1. Fast - Valving 2. Early - Valving



(الف) توربین بخار باز حرارتی منفرد با ترکیبی سری مربوط به واحد سوخت فسیلی



(ب) توربین یک واحد هسته‌ای

HP = فشار قوی (توربین)؛
IP = فشار متوسط (توربین)؛
LP = فشار ضعیف (توربین)؛
MSV = شیر ایمنی (ورودی) اصلی؛
RSV = شیر ایمنی بازحرارت؛
IV = شیر میان‌راهی؛
MSR = بازحرارت ده و تفکیک‌گر رطوبت؛
CV = شیر کنترلی؛
RH = باز حرارت ده؛

شکل ۱۷ ـ ۲ ساختار نوعی توربین بخار

واحد را کنترل می‌کنند، این روش به کاهش چشمگیری در توان توربین منجر می‌شود. برای کاهش موقت بیشتر در توان توربین، می‌توان هر دو شیرهای کنترل و میان‌راهی را با هم به کار برد. روش بستن سریع و بازکردن کامل بعدی شیرها را باز و بست سریع آنی شیر[1] می‌نامند.

هرگاه سیستم انتقال پس از خطا بسیار ضعیفتر از حالت پیش از خطا باشد، مطلوب آن است

1 Momentary Fast - Valving

که توان توربین، بعد از اینکه بسرعت کم شده است، به سطحی پایین‌تر از توان اولیه برگردانده شود. یک روش، بستن سریع شیرهای کنترل و میان‌راهی و به دنبال آن بازکردن جزئی شیرهای کنترل و بازکردن کامل شیرهای میان‌راهی است. یک روش دیگر، بستن سریع و بازکردن کامل شیرهای میان‌راهی، همراه با بستن جزئی شیرهای کنترل است. این روش را که به موجب آن،علاوه بر کاهش موقت سریع، کاهشی مداوم نیز در توان توربین حاصل می‌شود، *باز و بست سریع مداوم شیر*[1] می‌نامند.

بهبود پایداری سیستم

باز و بست سریع نیز به حفظ پایداری سیستم به دنبال بروز خطای شدید باکاهش توان مکانیکیِ توربین کمک می‌کند. نتایج مطالعات مربوط به مؤثر بودن باز و بست سریع نیز در تقویت پایداری سیستمهای منفرد، در مراجع ۲۷ تا ۳۲ آورده شده است. بسیاری از این مطالعات، روشهای دیگر تقویت پایداری سیستم از قبیل: تحریک کننده‌های پاسخ سریع، جبرانسازی خازن سری، کلیدزنی مستقل از قطب، مقاومتهای بازدارنده و خارج کردن ژنراتور را نیز درنظر می‌گیرند.

به طور کلی باز و بست سریع نیز، روشی مؤثر و اقتصادی در برآورده کردن ملاحظات عملکرد سیستمهای قدرت است که طراحی و معیار عمل آن، مستلزم حفظ پایداری برای خطای سه فاز با رفع تأخیری به واسطهٔ یک کلید معیوب است. در چنین حالاتی، مسألهٔ پایداری گذرا عموماً به شکل مد نوسانی محلی در نیروگاه با دورهٔ تناوبی در حدود ۰/۵ تا ۱/۲ ثانیه، ظاهر می‌شود.

اگرچه این مطلب به طور گسترده‌ای مورد پذیرش قرار نگرفته است، لیکن در مواقعی که ناپایداری از طریق یک نوسان بین ناحیه‌ایِ کُند، با دورهٔ تناوبی در حدود ۲/۰ تا ۴/۰ ثانیه رخ می‌دهد، باز و بست سریع شیر می‌تواند بسیار مؤثر باشد. معمولاً مسأله بدین صورت رخ می‌دهد که به علت خطا در یک ناحیه، ژنراتورهای آن ناحیه نسبت به دیگر نواحیِ متصل پیش می‌افتند. این موضوع موجب جاری شدن توان سنگینی از طریق خطوط ارتباطی ضعیفِ بین نواحی می‌شود، که به نوبهٔ خود به جداسازی نواحی منجر می‌گردد. باز و بست سریع شیر یک یا چند واحد در داخل ناحیه‌ای که در آن خطا اتفاق می‌افتد، توان شتاب‌دهنده را حداقل می‌کند و از این‌رو نوسانهای توان گذرا را کاهش می‌دهد. از آنجا که دورهٔ تناوب نوسانهای توان طولانی

1. Sustained Fast - Valving

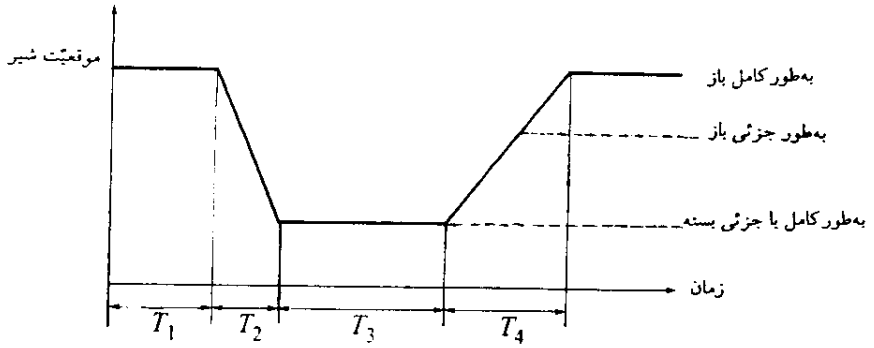
است، باز و بست سریع شیر، در چنین مواردی بسیار مؤثر خواهد بود و بنابراین برای دستیابی به کاهش توان، زمان بیشتری در اختیار خواهد بود.

معمولاً هزینهٔ اعمال باز و بست سریع شیر کم است. لیکن، از نظر ملاحظات مربوط به اثرهای مخرب احتمالی روی توربین و دیگ بخار یا ژنراتور بخار، فقط در مواقعی باید از راهبرد باز و بست سریع شیر استفاده کرد که اقدامات کمتر «جسورانه» قادر به حفظ پایداری سیستم نباشد؛ در چنین مواقعی، تنها وسیلهٔ مؤثر دیگر برای حفظ پایداری سیستم، استفاده از روش خارج کردن ژنراتور است. در مقایسه با خارج کردن ژنراتور، باز و بست سریع شیر این مزیت را دارد که واحد همچنان متصل به سیستم باقی می‌ماند. درنتیجه، کل لختی سیستم کاهش پیدا نمی‌کند و تمامی توان خروجی (یا جزئی از آن) در کمتر از چند ثانیه باز گردانده می‌شود. به علاوه، عقیده بر این است که تنش حاصل بر روی توربین به مقدار چشمگیری، شدت کمتری دارد. لیکن، باز و بست سریع شیر به اندازهٔ خارج کردن ژنراتور، در حفظ پایداری مؤثر نیست.

منطق باز و بست سریع شیر بسته به تأمین کننده و کاربرد موردنظر از آن، می‌تواند به صورتهای مختلفی اجرا شود. به طور کلی، چنین منطقی دو مدار اصلی را در بر دارد: یکی برای ایجاد ترتیب کنترل شیر[1] و دیگری برای تولید یک سیگنال باربرداری، به شرطی که بخواهیم به دنبال باز و بست سریع شیر، کاهشی در خروجیِ ژنراتور داشته باشیم. ترتیب کنترل شیر، سیگنالی را برای بستن شیرها با آهنگی از پیش تعیین شده، تولید می‌کند. شکل ۱۷ ـ ۳ ترتیبی نوعی از بستن و باز کردن شیر را نشان می‌دهد. زمانهای تحریک مجاز، تحت تأثیر وسیله و ملاحظات سیستمی، قرار دارند.

توانایی شیرهای بخار در سریع بسته و باز شدن مجدد، به نوع سیستم گاورنر به کار گرفته شده بستگی دارد. سیستم الکتروهیدرولیکی گاورنر توربین که از مدارهای الکترونیکیِ حالت جامد و سیستم فشار قوی محرک هیدرولیکی استفاده می‌کند قادر به کنترلی سریع است. یکی از روشهای متداول، بویژه در تولید کنندگان آمریکای شمالی، استفاده از شیرهای هیدرولیکیِ سریع عمل کننده است، این شیرها به گونه‌ای مرتب می‌شوند که روغن را از سیلندرهای تحریک مجهز به فنر شیرهای کنترلی و میان راهی خالی و بسته شدن سریع شیر را آسان کنند. این عمل، بستن کامل شیر را در زمانی بین ۰/۰۸ تا ۰/۴ ثانیه امکان‌پذیر می‌سازد. باز کردن مجدد بعد از بستن سریع، به طور ذاتی تأخیری به اندازهٔ ۰/۳ تا ۱/۰ ثانیه به همراه دارد، این تأخیر اجازه می‌دهد تا روغن سیلندرِ هیدرولیکی باز گردانده شود. زمان باز کردن شیر به اندازهٔ سیلندر عمل

1. Valve Control Sequence



T_1 = تأخیر بین زمان شروع و زمانی که شیر شروع به بستن می‌کند؛
T_2 = زمان بستن شیر؛
T_3 = زمانی که در طول آن شیر بسته می‌ماند؛
T_4 = زمان باز کردن شیر.

شکل ۱۷ ـ ۳ ترتیب نوعی باز کردن و بستن شیر

کنندهٔ هیدرولیکی بستگی دارد ولی معمولاً در بازهٔ ۳ تا ۱۰ ثانیه قرار دارد. البته ممکن است در دربرخی کاربردها لازم باشد برای باز و بست سریع شیر، باز کردن مجدد شیر، سریعتر از آنچه که در کار عادی گاورنرِ الکتروهیدرولیکی استفاده می‌شود، انجام شود که می‌توان این هدف را به کمک نصب مخازنی بر روی سیستم هیدرولیکی به دست آورد [۲۲ و ۲۳].

در مقابل، برخی تولیدکنندگان اروپایی به استفاده از شیرهای سروُ بزرگ با امکاناتی برای کارکرد سریع تمایل دارند در این شیرها زمان باز کردن به کمتر از یک ثانیه می‌رسد.

همچنین می‌توان باز و بست سریع شیر را به واحدهایی با گاورنرهای مکانیکی ـ هیدرولیکی توربین اعمال کرد، لیکن در آن صورت قابلیت انعطاف کمتری خواهد داشت و اِعمال آن نیز مقداری مشکلتر خواهد شد.

برای واحدهای سوخت فسیلی، ملاحظات حفاظت فلزی باز حرارت ده، زمان باز کردن شیرِ میان راهی را تعیین می‌کند. اما هنگامی که جریان بخار قطع و متعاقباً وصل می‌شود، مشکلاتی در خصوص گرمایش لولهٔ باز حرارت ده بوجود می‌آید. زمانی که لازم است تا در طی آن جریان بخار باز حرارت ده دوباره برقرار شود، نوعاً در حدود ۱۰ تا ۱۲ ثانیه است.

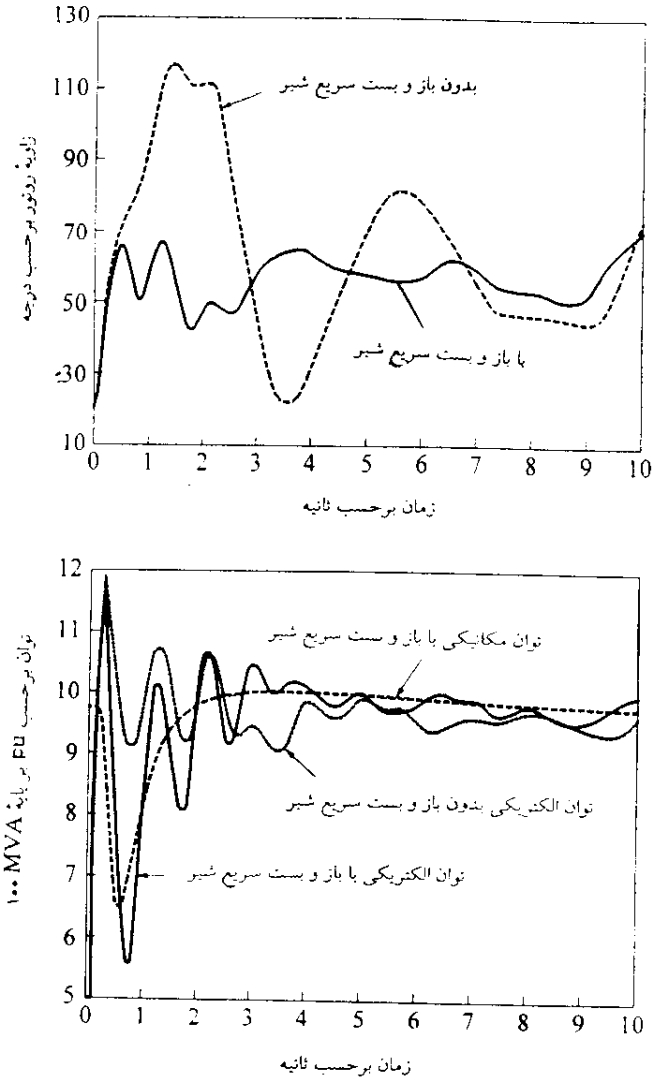
از دیدگاه پایداری سیستم، شیرها باید هرچه سریعتر بسته شوند. با باز و بست سریع آنی شیر، ممکن است که آغاز باز کردن مجدد کمی قبل از آنکه اولین اوج زاویهٔ روتور فرا رسد،

مطلوب شود. بازکردن مجددِ کُند، نوسان به عقب را افزایش می‌دهد و این موضوع ممکن است به ناپایداری دومین نوسان منجر شود [۲۲، ۲۹]. همچنین ممکن است در صورت زیاد بودن تأخیر در بازکردن شیر، نوسان ژنراتورها در ناحیه‌ای در مقابل بقیه سیستم اهمیت پیدا کند و باز به ناپایداری، منتهی شود [۲۲]. بنابراین برای هر سیستم خاص، باید زمان قابل قبول تحریک شیر براساس مطالعات تفصیلی بنا نهاده شده باشد.

عمل باز و بست سریع را می‌توان به وسیلهٔ رله‌های عدم تعادل بار توان، آشکارسازهای شتاب یا رله‌هایی که خطاهای شدید انتقال را تشخیص می‌دهند، آغاز کرد [۶]. مراجع ۲۳ و ۳۳ منطقهای نوعی آغازگر باز و بست سریع شیر را که در مدارهای استاندارد تهیه شده به وسیلهٔ تولیدکنندگان توربین ـ ژنراتور امریکای شمالی به کار گرفته شده است، توصیف می‌کند. منطق، معمولاً تعمیم ساده‌ای از طرح به کار گرفته شده برای محدود کردن اضافه سرعت است و به مقایسهٔ توان ورودی مکانیکی و توان خروجی الکتریکی بستگی دارد. توان ورودی مکانیکی با نظارت بر فشار دیگ بخار باز حرارت ده، اندازه‌گیری می‌شود. به منظور جلوگیری از آغاز عمل غیرضروری باز و بست سریع شیر، معمولاً معرفی منطقی اضافی برای تمایز خطاهایی که نیاز به باز و بست سریع شیر ندارند، الزامی است. در اکثر موارد، از آنجا که بسته شدن سریع شیرها حیاتی است، تضمین حداقل بودن تأخیر ایجاد شده از طرف قدرت انتخاب منطق، مهم است.

زمان تأخیر ایجاد شده به وسیلهٔ منطق کنترل فیدبک، از قبیل آشکارسازی براساس عدم تعادلهای توان ـ بار، در حدود ۰/۱ ثانیه است که ممکن است در برخی موارد غیرقابل قبول باشد. یک منطق کنترلی پیشرو که مستقیماً از سیستمهای رلهٔ حفاظتی استنتاج شده است، می‌تواند زمان شروع را یک یا دو سیکل کاهش دهد [۲۲].

تأثیر باز و بست سریع شیر در بهبود پایداری گذرا در شکل ۱۷ ـ ۴ نمایش داده شده است. شکل، پاسخهای یک نیروگاه سوخت فسیلی را که شامل دو واحد MW ۵۰۰ با و بدون باز و بست سریع شیر است، نشان می‌دهد. ترتیب‌باز و بست سریع شیر بدین‌صورت است که فقط شیرهای میان راهی بسته و دوباره به‌طور کامل باز می‌شوند، زمانهای متناظر نیز، (ثانیه) T_1 = ۰/۱، (ثانیه) T_2 = ۰/۲۵، (ثانیه) T_3 = ۰/۱ و (ثانیه) T_4 = ۰/۸۵، فرض شده‌اند. واحدها، دارای سیستم تحریک تریستوری با پایدارسازهای سیستم قدرت هستند. اغتشاش درنظر گرفته شده، خطایی سه فاز بر روی خط انتقال اصلی نزدیک پُست است، که به کمک رله‌های اولیه در ۶۰ میلی‌ثانیه رفع شده است. بدون باز و بست سریع شیر، واحدهای تولید، نوسان بین ناحیه‌ای غالب را با دوره‌ای در حدود ۴/۵ ثانیه نشان می‌دهند. درنتیجه، ترتیب باز و بست سریع شیر در محدود کردن اوج اولین نوسان در زاویهٔ روتور بسیار مؤثر است. در اینجا زمانهای بسته و باز شدن شیرها بسیار کوتاه فرض



شکل ۱۷ ـ ۴ اثر باز و بست سریع شیر برپایداری یک نیروگاه سوخت فسیلی که دارای یک نوسان بین ناحیه‌ای کند است.

شده‌اند. با زمانهای کمتر برای باز شدن شیر، ترتیب باز و بست سریع شیر، همان‌طور که در مرجع ۲۹ نشان داده شده است، به ناپایداری نوسان دوم منجر می‌شود.

ملاحظات نیروگاه

باز و بست سریع شیر، حالت گذرای نسبتاً شدیدی را بر توربین و سیستم ژنراتور بخار تحمیل می‌کند. در این خصوص، چند موضوع مشکل‌ساز وجود دارد که باید در اِعمال باز و بست سریع شیر درنظر گرفته شوند. در زیر بحث مختصری از ملاحظات تجهیزاتی که باید مورد توجه قرار گیرند، آورده شده است.

ملاحظات ژنراتور بخار واحد سوخت فسیلی. بستن شیرهای میان راهی، به افزایشی موقتی در فشار باز حرارت ده منجر می‌شود که ممکن است باعث بالا رفتن شیر ایمنی باز حرارتی گردد و این احتمال وجود دارد که بعد از این عملیات شیرهای ایمنی به طور مناسبی به جای خود برنگردند. همچنین، ضربه‌های نویزی ناشی از بخار خارج شده بر محیط نیز باید مورد توجه قرار گیرد. بستن هر دو شیر کنترلی و میان‌راهی، امکان بالا رفتن شیرهای ایمنی را کم می‌کند ولی این موضوع فقط مشکل را به شیرهای ایمنیِ اصلی منتقل می‌کند.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، حفاظت لولهٔ باز حرارت ده عاملی محدودکننده است که تعیین می‌کند چه زمانی جریان بخار باید به باز حرارت ده باز گردانده شود. معمولاً در طراحی باز حرارت ده، زمان محدودکننده در حدود ۱۱ ثانیه درنظر گرفته می‌شود. اگر از شیرهای ایمنی تواندار در خروجی باز حرارت‌ده استفاده شود و به طور خودکار دوباره باز شوند، مشکل در هر رخدادی که در آن فقط شیرهای میان راهی بسته هستند، حداقل می‌شود.

باز و بست سریع مداوم شیر از دید دیگ بخار به شکل یک بارزدایی جزئی به نظر می‌رسد. بدون حضور سیستم کنارگذر توربین یا فوق حرارت‌ده، بستن ناگهانی شیرهای ورودی توربین، نیازمند تخلیهٔ بخارِ محبوس در جو است. اگر این کار به وسیلهٔ شیرهای ایمنی مجهز به فنر انجام شود، ممکن است با وقفه‌ای برای تعمیر این شیرها، همراه باشد. بنابراین باید از شیرهای ایمنی فشار تواندار و یا کنارگذری توربین استفاده شود. لیکن در وضعیت بهینه، دیگ بخار یکبار عبور می‌تواند سریعاً بدون عمل شیرهای ایمنی، باز و بست سریع مداوم شیر را تحمل کند؛ این مطلب با آزمایشهای TVA بر روی واحدهای کامبرلند[1] نشان داده شده است [۲۶].

اگر از سیستم کنارگذر استفاده نشود، با یک دیگ بخار نوع طبلکی، بازبست سریع مداوم شیر موجب کاهش سطح طبلک می‌شود. که می‌تواند به وسیلهٔ حفاظت سطح پایین طبلک، که به

1 Cumberland

منظور جلوگیری از گرم شدن بیش از اندازهٔ دیواره‌های آتش کوره تعبیه شده است به خارج شدن واحد منجر شود. بهبودِ کنترل آب تغذیه، سطح طبلک و آهنگ کاهش ورودیِ سوخت به کوره و استفاده از شیرهای ایمنی توانمند توانایی دیگهای بخار نوع طبله‌ای را در مواجهه با باز و بست سریع و مداوم افزایش می‌دهد.

ملاحظات ژنراتور بخار واحد هسته‌ای. در مقایسه با واحدهای سوخت فسیلی، باز حرارت دهنده‌های واحدهای هسته‌ای، ثابت زمانی کوچکتری دارند و از این‌رو بستن شیرهای میان‌راهی بتنهایی موجب صعود سریعتر فشار باز حرارت‌ده می‌شود. بنابراین در واحدهای هسته‌ای احتمال بالا رفتن شیر ایمنی باز حرارت‌ده بیشتر است. بعلاوه، احتمال خرابی قسمت پایین شیر ایمنی بیشتر است زیرا فوق حرارت کمتری در بخار می‌تواند طی بالا رفتن شیرهای ایمنی، به قطع آب منجر شود. اگر به جای شیرهای ایمنی در سیستم باز حرارتی، از دیسکهای انفجاری بزرگ استفاده شود، مسألهٔ صعود فشار باز حرارت دهنده‌ها نگران کننده‌تر خواهد بود. انفجار دیسک عملاً واحد را از مدار خارج می‌کند و به آشفتگی سیستم می‌افزاید.

بستن هر دو شیر میان‌راهی و کنترلی، اثری همانند واحدهای سوخت فسیلی دارد؛ یعنی، مشکل را به شیرهای ایمنیِ اصلی انتقال می‌دهد. بستن شیرهای کنترلی موجب صعودِ فشار ژنراتور بخار می‌شود و باید بخار را به کندانسور یا به محیط، کنارگذر کرد. سیستم کنترل فشار دیگ بخار از توربین یا سیستم کنارگذر، برای کنترل فشار دیگ بخار استفاده می‌کند.

ملاحظات توربین. بی‌عیب بودن قسمت پایینی و دماغهٔ شیرکنترل (CV) موضوعی است که‌باید به‌آن‌توجه‌کرد. تخلیهٔ‌مایع‌محرک، موجب‌بسته شدنِ با شتاب شیر می‌شودکه ممکن است به بالا پریدن شیر یا خم شدن دماغهٔ آن منجر شود. ممکن است در واحدهای موجود لازم باشد شیرهای تخلیهٔ سلونوییدی بیشتری را برای دستیابی به زمان بسته شدن سریعِ CVها، اضافه کرد.

عمل ترکیبی شیرهای کنترلی و میان‌راهی ایجاب می‌کند که بر سیستم استحصال بخار به منظور تعیین احتمال تحریک شیر کنارگذری راه‌اندازی از توربین فشار قوی به کندانسور، مروری انجام شود. از این‌رو ممکن است سیکل باز و بست سریع مداوم شیر، مستلزم افزودن زمان تأخیری به منطق کنترل، برای این شیر کنارگذر باشد.

زوال خروجی فشارِ شیرهای میان راهی بدین معنی است که محرکهای شیر باید توانایی باز کردن مجدد شیرها را در برابر فشار بالای دیفرانسیلی داشته باشند. همانند شیرهای کنترلی، باید سیستم کنترل شامل سلونوییدهای تخلیهٔ سریع عمل کننده و یک منبع سیالِ با کنترل کافی داشته باشد تا باز نشانی شیرها صورت گیرد بدون اینکه کنترل فشار کم روغن عمل کند.

شیرهای میان راهی بزرگتر از شیرهای کنترل هستند؛ از این‌رو، اثر بارگذاری ضربه‌ای بیشتری

بر وسایل به کار گرفته شده برای توقف شیرها در انتهای ضربه‌هایشان، باید ارزیابی شود. پرهیز از یک بست کامل ترجیح داده می‌شود.

در مورد واحدهای هسته‌ای با بازحرارت ده تفکیک‌گر رطوبت، در قسمتی از لوله‌کشیها سرعتهای بخار بیش از حد عادی است، درنتیجه تنش بیشتری بر لوله‌ها وارد خواهد آمد و باید پاسخ سیستم لوله کشی به این تحریک ارزیابی شود.

زوال سریع فشار در توربین فشار ضعیف امکان فلاش بخار[1] را در آبگرمکنهای تغذیه و درنتیجه القای آب[2] را که منجر به بسته شدن سیکل تغذیه به وسیلهٔ سیستم حفاظتی می‌شود، افزایش می‌دهد.

روتورهای توربین ـ ژنراتور نباید از تنشهای پیچشیِ ناشی از باز و بست سریع نیز زیان عمده‌ای ببینند. نتایجِ شبیه‌سازیهای کاربردهای خاص نشان داده است که تنشهای حاصل در محور قابل قبول هستند [۲۴].

مرجع ۳۴ آزمایشهای باز و بست سریع شیر را بر دو واحد در نیروگاه هسته‌ای پیکرینگ ـ B[3] در اونتاریو توضیح می‌دهد. این آزمایشها، اثر زیان آور مشخصی را بر وسایل آشکار نکردند و از دید نیروگاه، باز و بست سریع شیر حادثهٔ خاصی تلقی نشد اما از دیدگاه سیستم، ترتیب باز و بست سریع شیر در ایجاد کاهش سریع و مداوم توان توربین، مؤثر تشخیص داده شد.

۱۷ ـ ۱ ـ ۹ خارج کردن ژنراتور

برای سالیان متمادی، خارج کردن انتخابی واحدهای تولیدی در پیشامدهای شدیدِ سیستم انتقال، به عنوان روشی در بهبود پایداری سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. تولید زدایی در مکانی مناسب از سیستم، توانی را که قرار است از واسطهای بحرانی انتقال عبور کند کاهش می‌دهد. از آنجا که واحدهای تولیدی می‌توانند بسرعت خارج شوند، این روش در بهبود پایداری گذرا بسیار مؤثر است. (برای نمایش، فصل ۱۳، بخش ۱۳ ـ ۶ را ببینید).

از نظر تاریخی، روش خارج کردن ژنراتور به عنوان کمکی به پایداری نیروگاههای آبی محدود می‌شد. چنین نیروگاههایی معمولاً دور از مراکز بار هستند و احتمال آسیب کمتری ناشی از خارج شدن ناگهانی واحد وجود دارد. از دههٔ ۱۹۷۰ میلادی تاکنون، این روش بتدریج به عنوان وسیله‌ای برای حل مسائل شدید پایداری در واحدهای سوخت فسیلی و هسته‌ای نیز بسط داده شده است.

---

1. Steam Flashing 2. Water Induction 3. Pickering - B

طرح استفاده شده برای آشکارسازیِ وضعیت سیستم، که نیازمندِ خارج کردن واحد باشد، معمولاً تعمیمی از مدار خارج‌سازی از چندین حفاظت خط محلی و دور است و اگر خط خطادار در چند دقیقه بازیابی شود، واحدهای خارج شده نیز بسرعت به مدار بازگردانده می‌شوند.

واحد خارج شده، به جز در مواردی که امکانات خاصی مهیا باشد، وارد یک سیکل خاموش و روشن شدن استاندارد می‌شود، درنتیجه ممکن است توان کامل تا چندین ساعت در دسترس نباشد. بسیاری از شرکتهای برق، در این موارد واحدهایی حرارتی را طراحی می‌کنند تا بعد از خارج شدن، به تولید ادامه دهند و تجهیزات جنبی واحد را تغذیه کنند. بدین ترتیب واحدها اجازه می‌یابند تا دوباره با سیستم سنکرون شوند و در زمانی بین ۱۵ تا ۳۰ دقیقه به بارِ کامل باز گردند [۳۵].

رشته حوادثی که بعد از خارج شدن ژنراتور رخ می‌دهد عبارت است از: دیگ بخار خارج می‌شود؛ کنترلهای توربین، اضافه سرعت را محدود می‌کنند (توربین خارج نشده است) و سرعت به نزدیکی سرعت نامی بازگردانده می‌شود؛ سپس واحد در حالتِ بی‌باری کار می‌کند و یا بار جنبی واحد را تغذیه می‌کند؛ سرانجام دوباره واحد با سیستم قدرت سنکرون می‌شود و در مقدار از پیش تعیین شده‌ای بارگذاری می‌شود.

در ظاهر، خارج کردنِ واحد آن را در معرض تغییرات ناگهانی در بارگذاری مکانیکی و الکتریکی، ضربه بر ژنراتور، توربین و سیستم منبع تغذیه قرار می‌دهد. گرچه واحدهای حرارتی و کنترل آنها برای تحمل چنین ضربه‌هایی طراحی شده‌اند، اما این احتمال نیز وجود دارد که کنترلها به طور صحیح عمل نکنند. همچنین، واحدهای حرارتی برای باربرداری کاملِ متواتر، طراحی نشده‌اند. لذا افزایش قابل توجه در تعداد باربرداریهای کامل ممکن است نیازهای تعمیر و نگهداری واحدها را افزایش و دسترس پذیری آنها را کاهش دهد. بنابراین، نباید از این نوع اقدام کنترلی برای بهبود پایداری سیستم، بی‌پروا استفاده کرد.

موارد زیر، نگرانیهای عمده درخصوص توربین - ژنراتور است:

الف) اضافه سرعت حاصل از خارج شدن ژنراتور؛

ب) تنشهای حرارتی ایجاد شده ناشی از تغییرات سریع بار؛

ج) سطوح تشدید گشتاورهای محور درنتیجهٔ اغتشاشهای پی در پی.

ملاحظات اضافه سرعت

کنترلهای توربین باید قابلیت بار برداریِ کامل را بدون خارج کردن توربین دارا باشند. همان‌طور که در فصل نهم (بخش ۹ - ۲ - ۲) بحث شد، معمولاً کنترل توربینهای بخار، برای محدود کردن

اضافه سرعت به دنبال باربرداری کامل به حدود ۱٪ زیر سطح عمل اضافه سرعت از ۱۱۰ تا ۱۱۵٪ سرعت نامی، طراحی شده‌اند. اگر واحد بخواهد بار جنبی خود را تا دوباره سنکرون شدن با سیستم قدرت تحمل کند، جلوگیری از خارج شدن توربین بسیار مهم است.

به دنبال اضافه سرعت اولیه، واحد به سرعت حالت ماندگاری می‌رسد که با مشخصهٔ افتی گاورنر تعیین می‌شود. تنظیم استاندارد ۵٪ به سرعت حالت ماندگاری که اندکی زیر ۱۰۵٪ سرعت نامی (متناظر با فرکانس ۶۳ هرتز) است، منجر می‌شود. باید اشاره کرد که کار پیوسته در این فرکانس ممنوع است زیرا ممکن است به تیغه‌های توربینِ فشار ضعیف، صدمه وارد سازد (بخش ۹ ـ ۲ ـ ۳ را ببینید). بر روی واحدهای قدیمی‌تر با کنترل مکانیکی هیدرولیکی (MHC)، اپراتور می‌بایست تغییردهندهٔ سرعت ـ بار را تنظیم می‌کرد تا واحد را به سرعت نامی بازگرداند. بر روی واحدهای مدرن با کنترل الکتروهیدرولیکی (EHC)، کاهش سرعت به مقدار سرعت نامی، به صورت خودکار انجام می‌پذیرد.

اگر برای حفظ پایداری سیستم، خارج کردن مکرر ژنراتور لازم باشد، امکان بیشتری برای از کنترل خارج شدن توربین ـ ژنراتور به واسطهٔ خرابی تجهیزات وجود دارد. به منظور تضمین کار ایمن و قابل اطمینانِ کنترلهای سرعت، باید بیشتر بر نگهداری بازدارنده و آزمایش دوره‌ای شیرهای توربین و سیستم حفاظت، تأکید شود.

ملاحظات تنش حرارتی

به علت تغییر خروجی واحد در بازه‌ای وسیع، خارج کردن ژنراتور، تنش حرارتی بالایی را به توربین تحمیل می‌کند. قبل از اغتشاش، خروجیِ واحد نسبتاً زیاد است و گرمایش فلز توربین در نقاط بحرانی، نزدیکِ حالت نامی می‌باشد. هنگامی که واحد خارج شود، واحد برای زمانی حدود ۲۰ دقیقه، در بار بسیار سبک یا بدون بار کار می‌کند. این پدیده به سرد شدن سریع فلز توربین منجر می‌شود، و به دنبال آن موجب سنکرون سازی و بارگذاری مجدد واحد خواهد شد. فلز توربین، حین بارگذاریِ مجدد اولیه تا تطبیق گرمایشِ بخار با گرمایشِ فلز توربین در نواحی بحرانی، به سرد شدن ادامه می‌دهد. پس از این نقطه، افزایش بار، فلز را گرم می‌کند که آهنگ گرمایش، تابعی از آهنگ بارگذاری و درجهٔ سرد شدنی است که در عملیات بار سبک رخ می‌دهد. قسمتهایی از توربین که از ملاحظات تنش حرارتی بحرانی هستند، نواحی با دمای زیاد بخش توربین فشار قوی می‌باشند.

تنشهای حرارتی حاصل از خارج کردن ژنراتور را می‌توان به وسیلهٔ روشهای عملیاتی مناسب در سطوح قابل قبول محدودکرد، این روشها با مشورتِ تولیدکنندهٔ توربین ـ ژنراتور انتخاب می‌شود.

ملاحظات عمر خستگی محور

هنگامی که یک واحد تولید در یک نیروگاه چند واحدی از مدار خارج شود، تمامی واحدها اغتشاشهایی پیاپی را تجربه می‌کنند که ممکن است به سطوح تشدید گشتاورهای محور منجر شود. همان‌طور که در فصل پانزدهم (بخش ۱۵ ـ ۴) بحث شد، نوسانهای پیچشیِ ناشی از ضربه‌های پیاپی ممکن است نوسانهای اولیه را تقویت کند. لذا باید شبیه‌سازیهای تفصیلی اجرا شود تا تضمین گردد که اثر ترکیب شدهٔ خطای شبکه، رفع خطا و خارج شدن واحد، عواقب مخربی بر عمر خستگی محور نداشته باشد. برای واحدی که خارج شده است، گشتاور الکتریکی به طور ناگهانی به مقدار بسیار پایینی کاهش خواهد یافت. در ابتدا، واحدهای باقیمانده، افزایش مناسبی را در گشتاور الکتریکی تجربه می‌کنند. اگر دو واحد یا بیشتر خارج شوند، بسیار بعید است که آنها دقیقاً در یک لحظه خارج شوند. بنابراین، ممکن است یک طرح خارج کردن چند واحدی، بار شدیدتری را تحمیل نماید.

مراجع ۳۶ و ۳۷ یک طرح تولیدزدایی و باربرداری را که به وسیلهٔ اونتاریو هایدرو در تجمع توسعهٔ نیروگاه هسته‌ای بروس[1] با ظرفیت تولیدی حدود MW ۶۰۰۰ اعمال شده است، توضیح می‌دهند. طرح، که به علت تأخیرهای کسب مجوز انتقال، به عنوان یک معیار تدبیر موقتی[2] پیاده می‌شود، بسته به تولید کل در مجتمع، تعداد مدارهای انتقالِ درحال کار و نوع خطا، امکان قطع تا چهار واحد ۷۵۰ مگاواتی و ۱۵۰۰ مگاوات بار مشتری را فراهم می‌آورد. تصمیم پیاده‌سازی طرح براساس یک ارزیابی تفصیلی از منافع و مضرات آن، گرفته شده است. عوامل زیر در انتخاب طرح، مورد توجه قرار گرفتند:

الف) هزینهٔ جایگزینی انرژی هسته‌ای غیرقابل تغییر با تولید سوخت فسیلی؛

ب) فراوانی قابل انتظار خطاهای سیستم انتقال و تعداد تخمینی خروج واحدها؛

ج) تأثیر بر واحدهای تولیدی از نظر احتمال از کنترل خارج شدن توربین ـ ژنراتور؛ آهنگ وقفه‌های اجباری و نگهداری؛ هزینهٔ افزایش یافته به علت فرسایش اضافی و تلفات تجمعی عمر عناصر شامل عمر خستگی محور.

۱۷ ـ ۱ ـ ۱۰ جداسازی کنترل شدهٔ سیستم و بارزدایی

می‌توان از روش جداسازی کنترل شده برای جلوگیری از انتشار یک اغتشاش عمدهٔ موجود در قسمتی از سیستم به هم پیوسته به سایر بخشهای سیستم و درنهایت جلوگیری از پاشیدگی سیستم، استفاده کرد. اغتشاشِ آغازگر می‌تواند از دست دادن خط انتقال اصلی (جریان متناوب یا

1. Bruce 2. Stopgap

جریان مستقیم) حامل مقدار زیادی توان یا از دست دادن مقدار قابل توجهی از تولید باشد. معمولاً در این حالتها، ناپایداری اولیه به صورت تغییرات ناگهانی در توان خط ارتباطی، ظاهر می‌شود. اگر این مسأله به موقع تشخیص داده شود و اطلاعات فراهم شده برای آغاز عملیات اصلاحی به کار گرفته شود، می‌توان از آشفتگیهای شدید سیستم جلوگیری کرد.

ناپایداریِ رو به ظهور سیستم، با نظارت بر یک یا چند مورد از کمیتهای زیر تشخیص داده می‌شود: تغییر ناگهانی در جریان توان از طریق مدارهای خاص انتقال، تغییر زاویهٔ ولتاژ شین، آهنگ تغییر توان، اتصالات جنبی کلیدها.

به دنبال آشکارسازی ناپایداریِ رو به ظهور، با بازکردن خطوط ارتباطی مناسب، قبل از آنکه وقفه‌های پیاپی بتوانند رخ دهند، جداسازیِ کنترل شدهٔ سیستم آغاز می‌شود. ممکن است در برخی مواقع برای حفظ تعادل تولید و بار در سیستمهای جدا شده، لازم باشد بارهای انتخاب شده‌ای قطع شوند.

در مواقع دیگر، برای حفظ پایداری گذرا بدون متوسل شدن به جداسازی سیستم، باید از راهبرد بارزدایی استفاده کرد.

یک نمونه از رله‌های به کار گرفته شده برای جداسازیِ کنترل شده، رلهٔ $\Delta P / \Delta\theta$ بر روی خطوط ارتباطی بین هایدرو اونتاریو و هایدرو مانیتوبا است. رله بر تغییرات ناگهانیِ جریان توان (ΔP) بر روی خطوط ارتباطی و تغییراتِ زاویهٔ فاز ($\Delta\theta$) مربوط به ولتاژ شین در انتهای خطوط ارتباطی اونتاریو، نظارت می‌کند. عنصر $\Delta\theta$، عنصر ΔP را تنظیم می‌کند. تنظیمهای رله به گونه‌ای انتخاب می‌شود که خطوط ارتباطی در حالت بروز اغتشاشهایی که در مانیتوبا باعث ناپایداری در اونتاریو می‌شوند، خارج شوند. گاهی اوقات، به منظور تضمین وضعیت رضایتبخش در سیستم بعد از جداسازی، خارج سازی خط ارتباطی با بارزدایی همراه می‌شود.

مرجع ۳۸ یک‌طرح‌آشکارسازی‌مستقل‌محلی‌راکه برای جداکردن سیستم قدرت جنوب غربی امریکا از سیستم شمال غربی آن در وقفه‌های خط ارتباطی جریان متناوب اقیانوس اطلس، ایجاد شده است را توضیح می‌دهد. طرح، از آهنگ تغییرات توان در دو موقعیت برای تشخیص شرایط لازم برای جداسازی شمال غربی از جنوب غربی، استفاده می‌کند. این طرح شامل جداسازی سیستمهای قدرت یوتا و کلرادو از سیستم آریزونا با باز کردن پنج خط ارتباطی و جداسازی سیستم نوادا از سیستم کالیفرنیا در شمال سانفرانسیسکو با بازکردن سه خط ارتباطی، می‌باشد.

مرجع ۳۹ یک طرح بارزدایی راکه به وسیلهٔ مجموعه تسهیلات اشتراکی شمال غربی امریکا جهت حفظ پایداری گذرای سیستمهای شورای هماهنگی سیستم غرب (WSCC)[1] استفاده شده

1. Western System Coordinationg Council

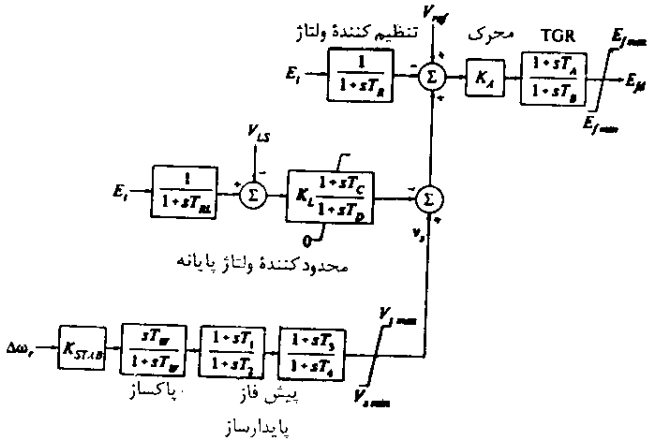
است، توضیح می‌دهد.

۱۷ ـ ۱ ـ ۱۱ سیستمهای تحریک با سرعت زیاد

از طریق افزایش سریع و موقتی تحریک ژنراتور می‌توان به بهبود چشمگیری در پایداری گذرا دست یافت. افزایش ولتاژ تحریک ژنراتور حین یک اغتشاش گذرا، اثر افزایش ولتاژ داخلی ماشین را دارد و این موضوع به نوبهٔ خود توان سنکرون کننده را افزایش می‌دهد.

در حین بروز اغتشاش گذرا به دنبال خطای سیستمِ انتقال و رفع خطا با جداسازی عنصر تحت خطا، ولتاژ پایانهٔ ژنراتور، پایین است. تنظیم کنندهٔ خودکار ولتاژ با افزایش ولتاژ تحریک ژنراتور، به این شرایط پاسخ می‌دهد، که اثر سودمندی بر پایداری گذرا دارد. تأثیر این نوع کنترل به توانایی سیستم تحریک در افزایش سریع ولتاژِ تحریک به بیشترین مقدار خود، بستگی دارد. برای این منظور سیستمهای تحریک با پاسخ اولیهٔ زیاد همراه با ولتاژ سقف زیاد، مؤثرترین راه حل است. برای واحدهای حرارتی، ولتاژهای سقف به حدود ۲/۵ تا ۳/۰ برابر ولتاژ تحریک بار نامی می‌رسد.

پاسخ تحریک سریع به تغییرات ولتاژ پایانه، برای بهبود پایداری گذرا، اغلب به تنزل میراییِ نوسانهای مُد محلی منجر می‌شود (فصل ۱۲، بخشهای ۱۲ ـ ۴ و ۱۲ ـ ۵ را ببینید). کنترل تکمیلی تحریک، که معمولاً *پایدارساز سیستم قدرت* (PSS) نامیده می‌شود، روش مناسبی برای میرایی نوسانهای سیستم فراهم می‌کند که استفاده از سیستم تحریک پاسخ بالا را امکان‌پذیر می‌سازد. استفاده از سیستم‌های تحریک پاسخ اولیه بالا تکمیل شده با PSS، بمراتب مؤثرترین و مقرون به صرفه‌ترین روش تقویت پایداری کلی سیستم است [۴۰]. به‌عنوان یک نمونه از چنان سیستمی، شکل ۱۷ ـ ۵ نمایش نمودار بلوکی کلی یک تحریک‌کننده تریستوری با



شکل ۱۷ ـ ۵ نمودار بلوکی سیستم تحریک تریستوری با PSS

تنظیم‌کننده ولتاژ خودکار (AVR) ، یک PSS، و یک محدودکننده ولتاژ پایانه را نشان می‌دهد. نقش محدودکننده، جلوگیری از افزایش ولتاژ پایانه از یک مقدار تعیین شده نوعی ۱/۱۵ pu است. میزان تأثیر سیستم تحریک در بهبود پایداری کلی سیستم، به طراحی مناسب کنترل و روشهای تنظیم بستگی دارد. این موضوع در بخش ۱۷ ـ ۲ آورده شده است.

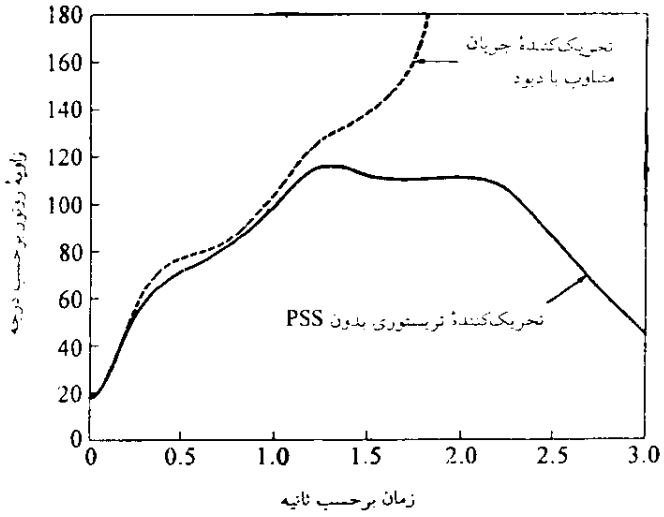
اثر پاسخ سیستم تحریک بر پایداری گذرا در شکل ۱۷ ـ ۶ نمایش داده شده است. شکل ۱۷ ـ ۶، پاسخ نیروگاه با سوخت فسیلی که در بخش ۱۷ ـ ۱ ـ ۸ درنظر گرفته شده است را با دو صورت دیگر از سیستم تحریک: (الف) تحریک‌کننده با یکسوساز دیودی با نسبت پاسخ ۲/۰ و (ب) تحریک‌کننده تریستوری تغذیه ازشین با PSS، مقایسه می‌کند. اغتشاش درنظر گرفته شده یک خطای سه‌فاز بر روی خط انتقال اصلی نزدیک نیروگاه است که در ۶۰ میلی‌ثانیه رفع شده است. سیستم، با تحریک‌کننده چرخان ناپایدار است و با تحریک‌کننده تریستوری پاسخ اولیهٔ بالا پایدار است. زمان رفع خطای بحرانی با تحریک‌کنندهٔ جریان متناوب برابر ۴۷/۵ میلی ثانیه، و با تحریک‌کننده تریستوری برابر ۶۲/۵ میلی ثانیه است.

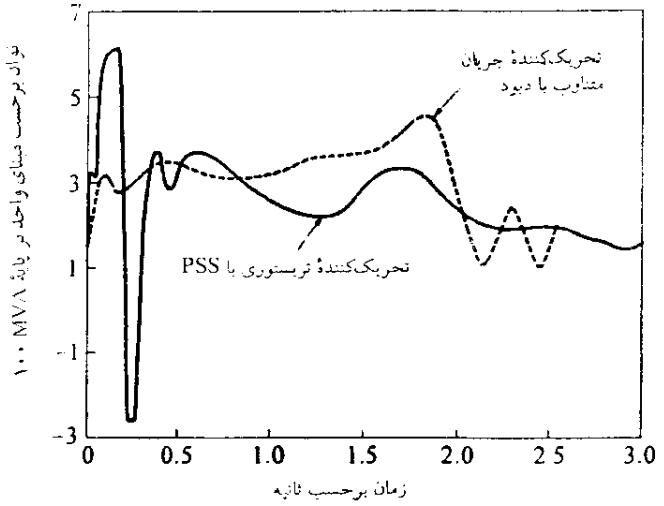
۱۷ ـ ۱ ـ ۱۲ کنترل تحریک ناپیوسته [۴۰]

اگر پایدارساز سیستم قدرت به طور مناسبی اِعمال شود، میرایی لازم را برای هر دو نوسان مُد بین ناحیه‌ای و محلی، فراهم می‌کند. در حالت گذرا یا سیگنال بزرگ، معمولاً پایدارساز سهم مثبتی در پایداری اولین نوسان دارد؛ لیکن در حضور هر دو مُد نوسانیِ بین ناحیه‌ای و محلی، پاسخ عادی پایدارساز می‌تواند بعد از اوج اولین نوسان مُد محلی و قبل از فرا رسیدن بالاترین اوج ترکیبی نوسان، موجب کاهش تحریک شود. می‌توان با نگه داشتن تحریک در مقدار سقف، در داخل قیود ولتاژ پایانه، تا رسیدن به بالاترین نقطهٔ نوسان، به بهبود بیشتری در پایداری گذرا دست یافت.

برای دستیابی به هدف فوق، اونتاریوهایدرو، یک طرح کنترل تحریک ناپیوسته به نام *کنترل تحریک پایداری گذرا* (TSEC)[1] را مطرح کرده است [۴۰]. این کنترل، با کنترل تحریک ژنراتور، به گونه‌ای که ولتاژ پایانه در نزدیکی مقدار مجاز حداکثر در حدود ۱/۱۲ یا ۱/۱۵ pu بر روی تمامی نوسان مثبت زاویهٔ روتور نگه داشته شود، پایداری گذرا را بهبود می‌بخشد. طرح، علاوه بر سیگنالهای ولتاژ پایانه و سرعت روتور، از سیگنالی متناسب با تغییرِ زاویهٔ روتور ژنراتور نیز استفاده می‌کند. لیکن از آنجا که استفاده مستمر از سیگنال زاویه‌ای به ناپایداری نوسانی منجر

1. Transient Stability Excitation Control



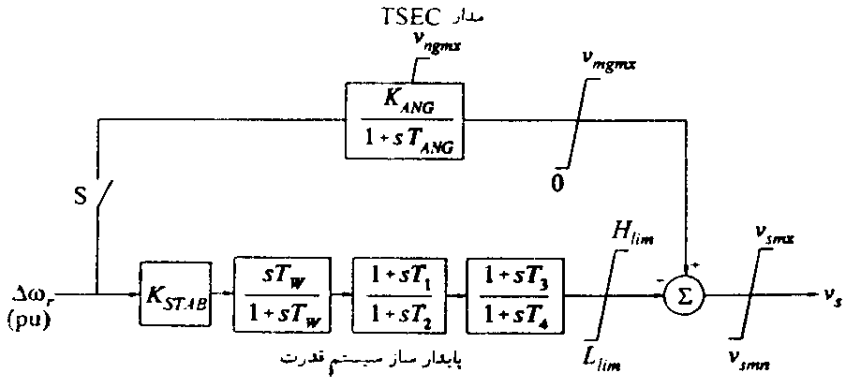


شکل ۱۷ ـ ۶ مقایسهٔ پایداری گذرا همراه با تحریک کنندهٔ جریان متناوب و تحریک کنندهٔ تریستوری تغذیهٔ شین

می‌شود، از آن فقط حین دورهٔ گذرایی در حدود ۲ ثانیه بعد از بروز اغتشاش استفاده می‌شود. سیگنال زاویه از معکوس شدن زودرس ولتاژ تحریک جلوگیری می‌کند و از این‌رو ولتاژ پایانه را حین نوسانِ مثبت زاویهٔ روتور در یک سطح بالا حفظ می‌نماید و به وسیلهٔ محدودکنندهٔ ولتاژ پایانه از بیش از اندازه شدن ولتاژ پایانه جلوگیری به عمل می‌آید.

شکل ۱۷ ـ ۷ نمودار بلوکیِ طرح کنترل تحریک ناپیوسته را نشان می‌دهد. مدار TSEC با مدار PSS جمع شده است. سیگنال سرعت ($\Delta\omega_r$) کنترل پیوسته را برای حفظ پایداری سیگنال کوچک تحت کار معمولی فراهم می‌آورد. سیگنال زاویه، با انتگرالگیری از سیگنال سرعت به دست می‌آید. بلوک TSEC نشان داده شده در شکل، یک انتگرالگیر با پاکساز[1] است. مقدار T_{ANG} به گونه‌ای است که در بازهٔ فرکانسی موردنظر، خروجی، متناسب با تغییر زاویه‌ای است. درواقع TSEC نوعی کنترل حلقه ـ بسته براساس اندازه‌گیریهای محلی است. اگر اُفت ولتاژ پایانه از یک مقدار از پیش تعیین شده بیشتر شود و ولتاژ تحریک در سقفِ مثبت باشد و همچنین افزایش سرعت نیز از مقدار از پیش تعیین شده‌ای بیشتر باشد، اتصال رله (S) بسته می‌شود. اتصال رله درصورت افت سرعت به کمتر از یک مقدار آستانه یا خارج شدن تحریک کننده از اشباع، باز می‌شود، که در این صورت خروجی بلوک TSEC به طور نمایی با ثابت زمانیِ T_{ANG} کاهش پیدا می‌کند.

کنترل تحریک ناپیوسته، بیشترین اثر را در بهبود پایداری گذرای واحدهای تولیدی‌ای دارد که نوسانهای بین ناحیه‌ای با فرکانس پایین از خود نشان می‌دهند.



شکل ۱۷ ـ ۷ نمودار بلوکی طرح TSEC

1. Washout

هنگامی که TSEC به چند نیروگاه واقع در یک ناحیه اعمال می‌شود، سطح ولتاژِ سیستم در کل ناحیه بالا می‌رود. این موضوع، توان معرفیِ بارهای وابسته به ولتاژ را در ناحیه افزایش می‌دهد، و بدین صورت به بهبود بیشتر پایداری گذرا کمک می‌کند.

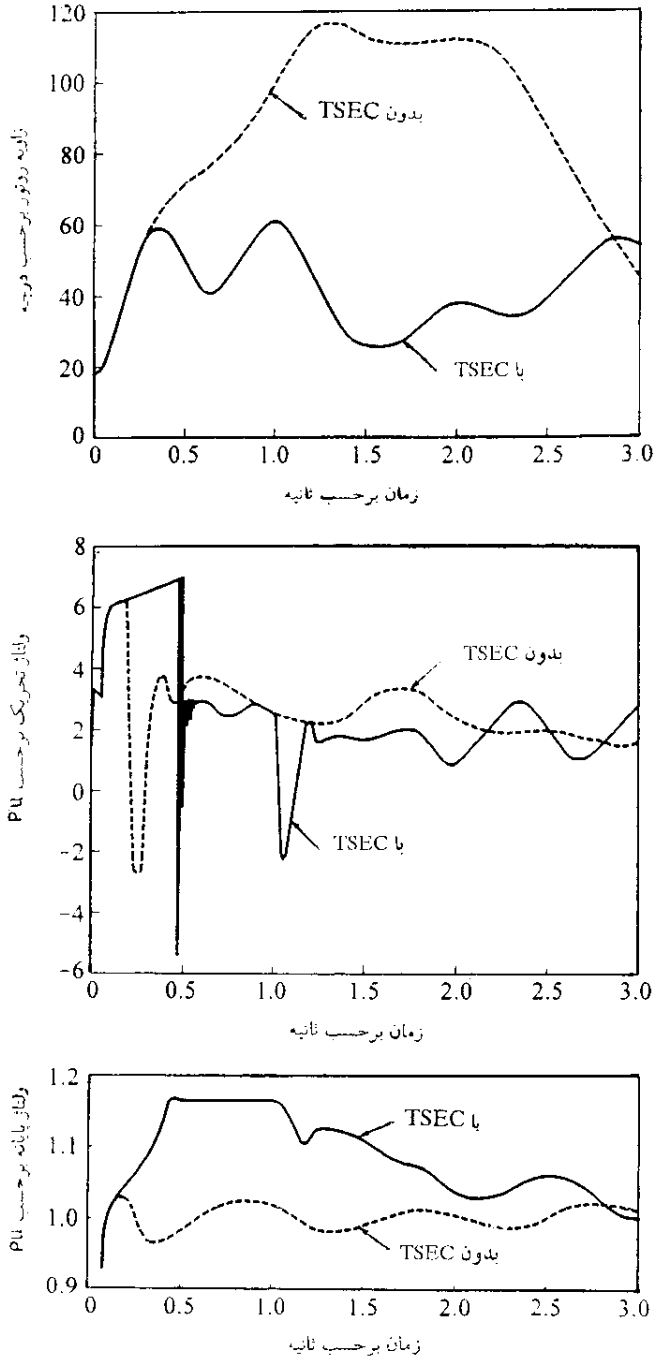
بار دیگر نیروگاه سوخت فسیلی بخشهای ۱۷ ـ ۱ ـ ۸ و ۱۷ ـ ۱ ـ ۱۱ را برای نمایش اثر سیستم تحریک با پاسخ اولیهٔ زیاد و باز و بست سریع شیر و نمایش عملکرد TSEC درنظر می‌گیریم. همان‌طور که از نمودارهای زاویهٔ روتور شکل ۱۷ ـ ۶ مشاهده می‌شود، در این نیروگاه، ژنراتورها یک نوسان بین ناحیه‌ای فرکانس پایین غالب را نشان می‌دهند. شکل ۱۷ ـ ۸ پاسخ ژنراتورها را با و بدون TSEC نشان می‌دهد. بدیهی است که پایداری گذرای سیستم به کمک TSEC، به میزان بسیار زیادی بهبود یافته است. زمان رفع خطای بحرانی، که با تحریک کنندهٔ تریستوری و PSS، در حدود ۶۲/۵ میلی‌ثانیه است، به وسیلهٔ کنترل تحریک ناپیوسته به ۱۱۷/۵ میلی‌ثانیه افزایش یافته است.

شکل ۱۷ ـ ۹ شبیه‌سازی تعمیم داده شدهٔ سیستم را با و بدون TSEC نشان می‌دهد. به منظور مقایسه، پاسخ به دست آمده با باز و بست سریع شیر، شیرهای میان‌راهی نیز که در بخش ۱۱ ـ ۱ ـ ۸ توصیف شد، در شکل ۱۷ ـ ۹ نشان داده شده است. برای این کاربرد خاص، مشاهده می‌شود که کنترل تحریک ناپیوسته به اندازهٔ باز و بست سریع شیر مؤثر است.

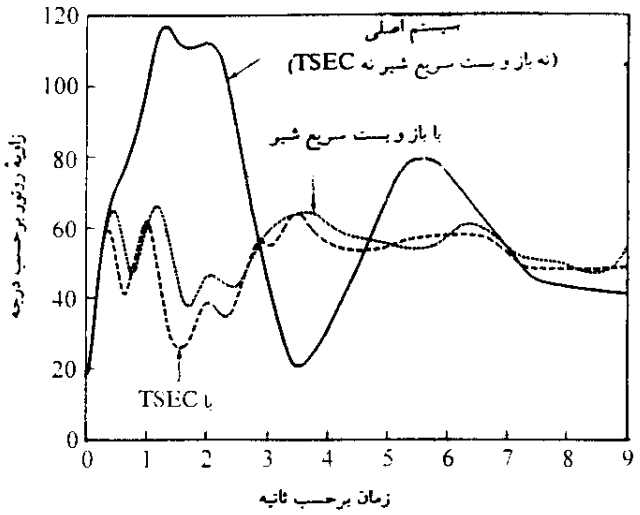
در مقایسه با سایر روشهای بهبود پایداری سیستم، از قبیل باز و بست سریع شیر و از مدار خارج کردن ژنراتور، TSEC بار بسیار کمتری را بر سیستم تغذیهٔ بخار و محور توربین ـ ژنراتور تحمیل می‌کند. البته در مقابل، برخی از قسمتهای سیستم قدرت افزایش ولتاژی تا ۱۵٪ (بسته به تنظیم محدودکنندهٔ ولتاژ پایانه) را برای مدتی بین ۱ تا ۲ ثانیه تجربه خواهند کرد. این طرح کنترلِ تحریک باید با توابع کنترل و حفاظت اضافه ولتاژ دیگر و نیز با حفاظت دیفرانسیلی ترانسفورمر هماهنگ باشد تا تضمین کند که جریان مغناطیس کنندهٔ ناشی از سطح افزایش یافتهٔ ولتاژ، باعث عمل این حفاظت نمی‌شود.

کنترل ناپیوستهٔ توصیف شده در بالا برای تقویت حالت گذرای تحریک از هوش محلی[1] برای آشکارسازی شرایط اغتشاش شدید سیستم استفاده می‌کند. ممکن است در برخی کاربردها، برای آغاز تقویت تحریک گذرا به استفاده از سیگنالهای دور سنجی شده[2] نیاز باشد. مرجع ۴۱ چنان کاربردی را توصیف می‌کند.

1. Local Intelligence
2. Remote Telemetered Signal



شکل ۱۷ ـ ۸ اثر TSEC بر پایداری گذرا



شکل ۱۷ ـ ۹ اثر TSEC و باز و بست سریع شیر بر پاسخ تعمیم یافتهٔ سیستم

۱۷ ـ ۱ ـ ۱۳ کنترل خطوط انتقال HVDC

همان‌طور که در فصل دهم (بخش ۱۰ ـ ۴) توضیح داده شد، خطوط انتقال HVDC به میزان زیادی کنترل پذیرند. می‌توان با بکارگیری این مشخصهٔ منحصر به فرد، پایداری گذرای سیستم جریان متناوب را تقویت کرد.

حین بروز اغتشاش گذرا، می‌توان به منظور کاهش نامتعادل تولید و یا بار سیستمِ جریان متناوب در دو طرف، توان جریان مستقیم را بسرعت کاهش داد. در برخی از مواقع، ممکن است به منظور کمک به پایداری سیستم با استفاده از توانایی اضافه بار کوتاه مدتِ سیستم HVDC، لازم باشد توان جریان مستقیم، افزایش یابد. از نظر عملکرد سیستم جریان متناوب، کنترل سریع توانِ جریان مستقیم همان تأثیر سودمندانهٔ خارج کردن ژنراتور و یا بار را داراست. مراجع ۴۲ و ۴۳ توضیحاتی در خصوص کنترلهای خاص کاربردی در تعدادی از HVDC های نصب شده برای تقویت پایداری گذرا، ارائه کرده‌اند.

همچنین تقویت پایداری گذرا را می‌توان با کنترل کنورتورهای HVDC، برای فراهم آوردن توان راکتیو و پشتیبانی از ولتاژ، به دست آورد [۴۴].

۱۷ ـ ۲ تقویت پایداری سیگنال کوچک

همان‌طور که در فصل دوازدهم توضیح داده شد، معمولاً مشکل پایداری سیگنال کوچک مربوط به میرایی ناکافیِ نوسانهای سیستم است. بکارگیری پایدارسازهای سیستم قدرت به منظور کنترل سیستمهای تحریک ژنراتور، اقتصادی‌ترین روش تقویت پایداری سیگنال کوچکِ سیستمهای قدرت می‌باشد. به علاوه، می‌توان از سیگنالهای پایدارسازِ اضافی برای مدوله کردن کنترلهای کنورتور HVDC و کنترلهای جبرانساز استاتیکی توان راکتیو برای تقویت میراییِ نوسانهای سیستم استفاده کرد.

کنترلهای به کار گرفته شده برای تقویت پایداری سیگنال کوچک، باید به طور رضایتبخشی تحت اغتشاشهای گذرای شدید عمل کنند. بنابراین، گرچه کنترلها با استفاده از روشهای خطی طراحی شده‌اند، لیکن عملکرد کلی آنها با درنظر گرفتن پاسخهای سیگنال کوچک و بزرگ ارزیابی می‌شود.

۱۷ ـ ۲ ـ ۱ پایدارسازهای سیستم قدرت

در بخش ۱۲ ـ ۵ از فصل دوازدهم اصول نظریِ PSS بیان شد. وظیفهٔ PSS افزودن میرایی به نوسانهای روتور ژنراتور است که این کار با مدوله کردن تحریک ژنراتور برای ایجاد یک مؤلفهٔ گشتاور الکتریکیِ همفاز با تغییرات سرعت روتور انجام می‌پذیرد. سرعت محور، انتگرال توان و فرکانس پایانه در میان سیگنالهای متداول به کار گرفته شده به عنوان ورودیِ PSS قرار دارند.

انواع مختلف PSS

الف) پایدارساز مبتنی بر سیگنال سرعت محور (دلتا ـ امگا). پایدارسازهای مبتنی بر سیگنال سرعت محور از اواسط دههٔ ۱۹۶۰ میلادی تاکنون به طور موفقیت‌آمیزی در واحدهای آبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مرجع ۴۵ روشی را توضیح می‌دهد که به کمک آن می‌توان یک سیگنال پایدارکننده را از اندازه‌گیری سرعت محور یک واحد آبی به دست آورد. یکی از ملاحظات مهم در طراحی وسیله‌ای برای اندازه‌گیری انحراف سرعت، حداقل سازی نویز حاصل از بیرون‌رفتگی محور و سایر منابع است [۴۶ و ۴۵]. سطح قابل قبول نویز به فرکانس آن وابسته است. برای فرکانسهای نویز کمتر از ۵ هرتز، سطح باید کمتر از ۰/۰۲٪ باشد، زیرا ممکن است تغییرات فرکانس پایین در ولتاژ تحریک به تغییرات بزرگی در ولتاژ پایانه منجر شود. معمولاً فرکانس متناظر با سرعت پیچشیِ محور، حاصل از بیرون رفتگی محور، مهمترین مؤلفه

نویز در این بازه است. حرکتهای جانبی محور، در نقاطی نزدیک به یاتاقان هدایتگر ژنراتور، دارای مقدار نوعی ۰/۰۷۵ سانتیمتر است. چنین نویز فرکانس پایینی را نمی‌توان با فیلترهای الکتریکی مرسوم حذف کرد و حذف آن باید در ذات روش اندازه‌گیری سیگنال سرعت باشد. این کار با جمع خروجیها از چندین نقطهٔ اندازه‌گیری پیرامون محور صورت می‌پذیرد. در موقعیتهای کمتر از ۷۰٪ دریچه، به منظور جلوگیری از مدولاسیون زیاد ولتاژ تحریک به وسیلهٔ ارتعاشهای تولید شده در توربین در گشایشهای جزئی دریچه، سیگنال پایدار کننده به طور خودکار با یک کلید کمکی قطع می‌شود.

کاربرد پایدارسازهای مبتنی بر سرعت محور در واحدهای حرارتی به بررسی دقیقی از اثر آنها بر روی نوسانهای پیچشی نیازمند است. پایدارساز، گرچه نوسانهای روتور را میرا می‌کند، اما می‌تواند باعث ناپایداری مُدهای پیچشی شود. این مسأله در فصل پانزدهم (بخش ۱۵ ـ ۲ ـ ۱) بررسی شده است. یکی از روشهایی که به طور موفقیت‌آمیز برای دور زدن مسأله به کار گرفته شده است، اندازه‌گیری سرعت در موقعیتی روی محور و در نزدیکی گره مُدهای پیچشی بحرانی است [۴۷ و ۴۸]. به علاوه برای تضعیف مؤلفه‌های پیچشی در مسیر پایدارسازی از یک فیلتر الکتریکی استفاده می‌شود.

اگرچه پایدارسازهای مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم سرعتِ محور در بسیاری از واحدهای حرارتی به کار گرفته شده است، لیکن این نوع پایدارساز دارای محدودیتهای بسیاری است. یک اشکال عمدهٔ آن نیاز به استفاده از فیلتر پیچشی می‌باشد. همچنین در تضعیف مؤلفه‌های پیچشیِ سیگنال پایدارکننده، فیلتر مقداری پس‌فاز زمانی در فرکانسهای پایین‌تر ایجاد می‌کند. همان‌طور که در مثال ۱۵ ـ ۲ فصل پانزدهم نشان داده شده است، پس فازِ زمانیِ ایجاد شده، اثر تخریبی بر پایداری «مُد تحریک کننده» دارد و از این‌رو بالاترین حد مجاز را بر بهرهٔ پایدارساز تحمیل می‌کند. در بسیاری از موارد، این حد بشدت باز دارنده است و کارآیی کلی پایدارساز را در میرایی نوسانهای سیستم محدود می‌کند. به علاوه، پایدارساز باید بسته به مشخصهٔ پیچشی واحد، برای هر نوع از واحدهای تولید، طراحی خاصی داشته باشد. پایدار ساز دلتا ـ P ـ امگا، که اکنون توضیح داده می‌شود، برای از میان برداشتن این محدودیتها ایجاد شده است.

ب) پایدارساز دلتا ـ P ـ امگا [۴۰، ۴۹ و ۵۰]. اساس این پایدارسازها با معادلهٔ زیر نمایش داده می‌شود که نشان می‌دهد چگونه می‌توان سیگنالی متناسب با انحراف سرعت روتور را از توان شتابدهنده به دست آورد:

$$\Delta\omega_{eq} = \frac{1}{M}\int (\Delta P_m - \Delta P_e)\, dt \qquad (۱ ـ ۱۷)$$

که در آن:

M = ثابت لختی ۲H؛

ΔP_m = تغییر در ورودی توان مکانیکی؛

ΔP_e = تغییر در خروجی توان الکتریکی؛

و $\Delta\omega_{eq}$ = انحراف سرعت معادل یا به دست آمده است.

هدف، به دست آوردن سیگنال سرعت معادل $\Delta\omega_{eq}$ است که مُدهای پیچشی را شامل نشود. همان‌طور که در فصل پانزدهم (مثال ۱۵ ـ ۲) نشان داده شده است، مؤلفه‌های پیچشی در انتگرال سیگنال ΔP_e خود به خود تضعیف می‌شوند. مشکل، اندازه‌گیریِ انتگرالِ ΔP_m بدون مُدهای پیچشی است.

در بسیاری از کاربردها، مؤلفه ΔP_m نادیده گرفته می‌شود. چنین موقعیتی، به جز هنگام تغییر بار بر روی واحد و حالتهایی که در آنها توان مکانیکی تغییر می‌کند، رضایتبخش است. تحت چنین وضعیتی، در صورتی که فقط از ΔP_e به عنوان سیگنال پایدارکننده استفاده شود، یک خروجیِ ساختگی پایدارساز تولید می‌شود که به نوبهٔ خود به نوسانهایی گذرا در ولتاژ و توان راکتیو منجر می‌شود.

انتگرال توان مکانیکی به صورت زیر با سرعت محور و توان الکتریکی رابطه دارد:

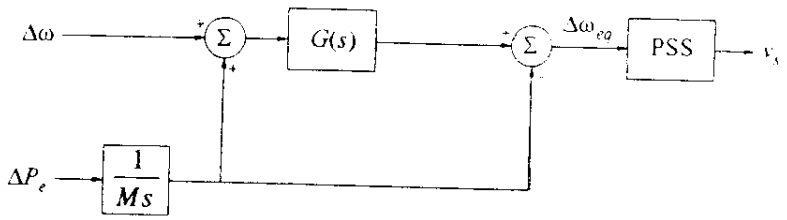
$$\int \Delta P_m \, dt = M \, \Delta\omega + \int \Delta P_e \, dt \qquad (۲ - ۱۷)$$

پایدارساز دلتا ـ P ـ امگا برای شبیه‌سازیِ سیگنالی متناسب با انتگرال تغییر توان مکانیکی با افزودن سیگنالهایی متناسب با تغییر سرعت محور و انتگرال تغییر توان مکانیکی، از رابطهٔ بالا استفاده می‌کند. این سیگنال، نوسانهای پیچشی را در بر خواهد داشت؛ مگر آنکه از فیلتر استفاده شود. از آنجا که تغییرات توان مکانیکی، حتی برای حرکتهای باز و بست سریع شیر نسبتاً کند است، می‌توان انتگرال به دست آمده از سیگنال توان مکانیکی را برای حذف فرکانسهای پیچشی، با یک فیلتر پایین گذر ساده مشروط کرد.

تابع تبدیل کلی برای به دست آوردن سیگنال انحراف معادلِ سرعت روتور از سرعت محور و اندازه‌گیریهای توان الکتریکی به صورت زیر داده می‌شود:

$$\Delta\omega_{eq}(s) = -\frac{\Delta P_e(s)}{Ms} + G(s)\left[\frac{\Delta P_e(s)}{Ms} + \Delta\omega(s)\right] \qquad (۳ - ۱۷)$$

که در آن $G(s)$ تابع تبدیل فیلتر پیچشی است. یکی از تحققهای این تابع تبدیل، در شکل ۱۷ ـ ۱۰ نشان داده شده است:



ω_0 = فرکانس پایه، رادیان بر ثانیه؛

M = ثابت لختی = ۲H؛

s = d/dt؛

شکل ۱۷ ـ ۱۰ تحقق نمودار بلوکی پایدارساز دلتا ـ P ـ امگا

پایدارساز دلتا ـ P ـ امگا دو مزیت عمده بر پایدارساز دلتا ـ امگا دارد:

۱. سیگنال ΔP_e دارای درجهٔ بالایی از تضعیف پیچشی است و از این‌رو معمولاً نیازی به فیلتر پیچشی در مسیر پایدارکنندهٔ اصلی نمی‌باشد. این موضوع، مشکل پایداری مُد تحریک کننده را حذف می‌کند و بدین ترتیب سبب می‌شود تا برای میراییِ بهتر نوسانهای سیستم، پایدارساز، بهرهٔ بیشتری داشته باشد.

۲. می‌توان از یک ترکیب اندازه‌گیری انتهای محور سرعت همراه با فیلتر پیچشیِ ساده و توان الکتریکی برای به دست آوردن سیگنال توان مکانیکی استفاده کرد. بدین ترتیب می‌توان صرفنظر از مشخصه‌های پیچشیِ واحدها، از یک طراحی استاندارد برای کلیهٔ واحدها استفاده کرد.

ج) پایدارسازهای مبتنی بر فرکانس. در این شیوه، از فرکانس پایانه به عنوان سیگنال پایدارساز برای چندین PSS استفاده شده است. به طور طبیعی، سیگنال فرکانس پایانه مستقیماً به عنوان سیگنال ورودی پایداسازی به کار گرفته می‌شود. در برخی از موارد، برای تقریب سرعت روتور ماشین از ولتاژ و جریان پایانه برای به دست آوردن فرکانس ولتاژ متصل به راکتانس ماشین شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود.

هنگامی که از این سیستمها در واحدهای توربین بخار استفاده می‌شود، باید همانند پایدارسازهای مبتنی بر سرعت، در فیلتر کردن مُدهای پیچشی دقت به عمل آورد.

حساسیت سیگنال فرکانس به نوسانهای روتور با ضعیفتر شدن سیستمِ انتقال خارجی، افزایش می‌یابد و موجب جبران کاهش بهره از خروجی پایدار تا گشتاور الکتریکی ناشی از یک سیستم انتقال ضعیفتر می‌شود [۵۱]. از این‌رو، بهرهٔ پایدارساز مبتنی بر فرکانس را می‌توان برای

بدست آوردن بهترین عملکردِ ممکن تحت شرایط سیستم انتقال جریان متناوب ضعیف، که در آن بیشترین نیاز به پایدارساز است، تنظیم کرد.

سیگنال فرکانس، به مُدهای نوسان بین نواحی بزرگ نسبت به مُدهایی که فقط واحدهای منفرد را دربر می‌گیرد و نیز مُدهای بین واحدهای یک نیروگاه حساستر است. بنابراین به نظر می‌رسد می‌توان سهم میراییِ بیشتری برای مُدهای بین ناحیه‌ای نسبت به سهم حاصل از سیگنال ورودی سرعت، به دست آورد.

باید توجه داشت که پایدارساز مبتنی بر فرکانس، علی‌رغم مزایای مذکور، دارای چندین عیب است:

۱. درحین حالت گذرای سریع، سیگنال فرکانسِ پایانه، دچار تغییر فاز ناگهانی خواهد شد. که به جهشی[1] در ولتاژ تحریک منجر می‌شود و درکمیتهای خروجیِ ژنراتور منعکس می‌شود.

۲. معمولاً سیگنال فرکانس دارای نویزِ سیستم قدرت است که به وسیلهٔ بارهای صنعتی بزرگ از قبیل: کوره‌های قوسی به وجود آمده است. در بسیاری از موارد این مسأله، مانع استفاده از فرکانس به عنوان سیگنال ورودی می‌شود.

۳. فیلتر کردن پیچشی لازم است. از این‌رو، یک پایدارساز مبتنی بر فرکانس همان محدودیتهای اساسیِ پایدارساز دلتا ـ امگا را دارد.

د) پایدارساز دیجیتالی. امروزه شکلهای دیجیتالی برخی از پایدارسازهای بالا ساخته شده و به صورت تجاری در دسترس قرار گرفته است [۵۲].

تولیدکنندگان، سیستمهای تحریک را با مدارهای دیجیتالیِ کامل، تولید می‌کنند. در چنین محیطی، اگر ورودیهای مناسب فراهم شود، پایدارساز فقط به شکل برنامهٔ دیگری در پردازشگر کنترل تحریک ظاهر خواهد شد.

طراحی کنترل تحریک [۴۰ و ۵۳]

پارامترهای PSS و سایر عناصر سیستم تحریک به گونه‌ای انتخاب می‌شود که پایداری سیستم کلی را تقویت کند. در زیر، به طور مشخص اهداف طراحیِ کنترل تحریک آورده شده است:

- حداکثرسازی میراییِ مُد نیروگاه محلی به همراه نوسانهای مُد بین ناحیه‌ای بدون وجه المصالحه قرار دادن پایداری سایر مُدها؛
- تقویت پایداری گذرای سیستم؛

1. Spike

● جلوگیری از آثار مخرب بر عملکرد سیستم حین آشفتگیهای عمدهٔ سیستم که موجب تغییرات بزرگ فرکانسی می‌شود؛

● حداقل کردن پیامدهای درست عمل نکردن سیستم تحریک به واسطهٔ نقایص مؤلفه‌ها و اجزاء؛

روش بکارگرفته شده برای برآوردن اهداف بالا، به کمک یک سیستم تحریک تریستوری که نمودار بلوکی آن در شکل ۱۷ ـ ۵ نشان داده شده است، نمایش داده می‌شود. ورودیِ PSS می‌تواند انحراف سرعت محور ($\Delta\omega_r$) یا انحراف سرعت روتور معادل ($\Delta\omega_{eq}$) باشد. مدار مبدل ولتاژ پایانه به وسیلهٔ ثابتهای زمانی لازم برای فیلتر کردن شکل موج ولتاژِ یکسوساز شدهٔ پایانه نمایش داده شده است. معمولاً می‌توان این ثابتهای زمانی را به یک ثابت زمانی (T_R) در بازهٔ ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ ثانیه کاهش داد. سایر ثابتهای زمانی تا خروجی تحریک کننده و از جمله هر ثابت زمانی مرتبط با خود تحریک کننده، قابل چشم‌پوشی می‌باشد و می‌توان مسیر اصلی را بسادگی با بهرهٔ K_A نشان داد.

در زیر توصیفی از ملاحظات و روشهای انتخاب پارامترها آورده شده‌است.

بهرهٔ تحریک کننده. از دیدگاه پایداری گذرا باید K_A زیاد باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت *بدون کاهش گذرای بهره* (TGR) باید بهرهٔ K_A در حدود ۲۰۰ باشد [۴۰ و ۵۳].

یکی از عملهای متداول صنعتی، کاهش بهرهٔ تحریک کننده در فرکانسهای بالا به کمک TGR است [۵۱ و ۵۲]. مقادیر نوعیِ استفاده شدهٔ T_A و T_B برای این منظور به ترتیب یک و ده ثانیه می‌باشد. برای کار رضایتبخش واحد تولید در حالت مدار باز، لازم است سیستمهای تحریک با مقادیر بزرگ T_R به TGR مجهز باشند. اما با T_R حدود ۰/۰۲ ثانیه، استفاده از TGR برای کار مدار بازِ پایدار، غیرضروری است (آخر مرجع ۵۳ را ببینید).

لزوم بکارگیری TGR باید براساس ارزیابی دقیقی از عملکرد کلی سیستم دینامیکی و چگونگی تأثیر TGR بر انتخاب سایر پارامترهای سیستم تحریک، باشد. مراجع ۴۰ و ۵۳ به تفصیل اثر استفاده از TGR را در کاربردهای خاص‌بررسی می‌کنند.

جبرانسازی پیش فاز. برای میرا کردن نوسانهای روتور، PSS باید مؤلفه‌ای از گشتاور الکتریکی همفاز با انحراف سرعت روتور، ایجاد کند. و برای این هدف، لازم است مدارهای پیش فازی داشته باشد تا برای جبران پس فاز بین ورودی تحریک کننده (یعنی، خروجیِ PSS) و گشتاور الکتریکی حاصل به کار گرفته شود (بخش ۱۲ ـ ۵ را ببینید). دو بلوک جبرانسازی فاز مرتبهٔ اول در شکل ۱۷ ـ ۵ نشان داده شده است. اگر درجهٔ جبرانسازی لازم کوچک باشد، می‌توان از یک بلوک مرتبهٔ اول استفاده کرد. برای ژنراتورهای نیروگاههای آبی با مقادیر کم ثابت

زمانیِ مدار بازِ محور d (T'_{do})، جبرانسازی لازمِ فاز، کوچک است و در واقع می‌توان از مدارهای پیش فاز استفاده نکرد.

در اکثر مواقع PSS برای تقویت پایداری نیروگاه مُد یا مُد بین ناحیه‌ای، لازم است اما باید توجه داشت گرچه این مُد، مورد توجه خاص است، لیکن باید جبرانسازی فاز به‌گونه‌ای طراحی شود که PSS در میرایی بر روی بازهٔ وسیعی از فرکانس، در برگیرندهٔ هر دو مُد محلی و بین ناحیه‌ای، نقش داشته باشد.

نخستین گام در تعیین جبرانسازی فاز، محاسبهٔ پاسخ فرکانسی بین ورودی تحریک کننده و گشتاور الکتریکی ژنراتور، با استفاده از ابزاری از قبیل برنامه MASS می‌باشد، که در فصل ۱۲ توضیح داده شده است. در محاسبهٔ این پاسخ، سرعت ژنراتور و زاویهٔ روتور باید ثابت نگه داشته شود. این، بدان دلیل است که هرگاه تحریک ژنراتور مدوله شود، تغییر حاصل در گشتاور الکتریکی موجب تغییراتی در سرعت و زاویهٔ روتور می‌گردد، که به نوبهٔ خود بر گشتاور الکتریکی تأثیر می‌گذارد. از آنجا که تنها مشخصهٔ فاز بین ورودی تحریک کننده و گشتاور الکتریکی موردنظر است، باید اثر فیدبک از طریق تغییر زاویهٔ روتور با ثابت نگه داشتن سرعت، حذف شود. (نمودار بلوکی شکل ۱۲ ـ ۱۳ را در فصل ۱۲ ببینید.) بنابراین، مشخصهٔ فاز به عنوان تابعی از فرکانس، با فرض بزرگ بودن لختی (به عنوان مثال ۱۰۰ برابر لختی واقعی) برای ماشین مورد مطالعه، به دست می‌آید. این روش، تضمین می‌کند سرعت و زاویه بر روی بازهٔ فرکانسی مهم برای طراحیِ پایدارساز (۰/۱ تا ۳Hz)، تغییر نمی‌کنند.

پاسخ فرکانسی موردنظر هر ماشین، به امپدانس مدار معادل تونِ پایانه‌های آن حساس ولی تقریباً از دینامیک سایر ماشینها مستقل است. بنابراین می‌توان فرض کرد کلیهٔ ماشینهای دیگر به‌صورت شین‌های بینهایت عمل می‌کنند. بدین ترتیب دینامیک آنها از محاسبهٔ پاسخ حذف می‌شود. در حالی که امپدانس صحیح تونن در پایانه‌های ماشین تحت مطالعه باقی نگه داشته می‌شود. بنابراین مشخصهٔ فاز حاصل، شکل تقریباً ساده‌ای عاری از اثر فرکانسهای طبیعی ماشینهای خارجی دارد.

مشخصهٔ فازی که باید جبران شود تا اندازه‌ای با شرایط سیستم تغییر می‌کند. بنابراین، مشخصه‌ای انتخاب می‌شود که برای حالتهای گوناگون سیستم مورد قبول باشد. عموماً اندکی حالت زیر جبرانسازی به فوق جبرانسازی ترجیح داده می‌شود تا PSS در مؤلفهٔ منفی گشتاور سنکرون کننده نقشی نداشته باشد (بخش ۱۲ ـ ۵ را ببینید). زیر جبرانسازی در حدود 10° بر روی تمامی بازهٔ فرکانسی مورد علاقه، درجهٔ لازمی از انعطاف را فراهم می‌آورد تا نامعینی‌های موجود در ماشین و مدلسازی سیستم را نیز در نظر گیرد.

پاکسازی سیگنال پایدارساز. سیگنال پاکساز، فیلتری بالاگذر است که از تغییرات ماندگار ناشی از تغییر ولتاژ تحریک در سرعت، جلوگیری می‌کند. مقدار ثابت زمانی پاکساز، T_W، باید به اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا به سیگنالهای مرتبط با نوسانهای سرعتِ روتور اجازه دهد بدون تغییر، عبور کنند.

از نظر «تابع پاکساز»، مقدار T_W حساس نیست و می‌تواند در هر کجای بازهٔ ۱ تا ۲۰ ثانیه قرار گیرد. ملاحظات اصلی آن است که T_W باید به اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا سیگنالهای پایدارکننده را بدون تغییر در فرکانسهای مورد علاقه عبور دهد، لیکن نباید آنقدر بزرگ باشد که به تغییر نامطلوبی در ولتاژ ژنراتور و در نتیجه در عمل پایدارساز، حین وضعیت پارگی سیستم، منجر شود. در حالت ایده‌ال، پایدارساز نباید به تغییرات فرکانس سیستمی پاسخ دهد.

برای نوسانهای مُد محلی در بازهٔ ۰/۸ تا ۲/۰ Hz، یک پاکساز ۱/۵ ثانیه‌ای رضایتبخش است. از دید نوسانهای بین ناحیه‌ایِ فرکانس پایین، پاکساز با ثابت زمانی ۱۰ ثانیه یا بالاتر مطلوب است، زیرا ثابتهای زمانی کمتر موجب بروز پیش فاز زیادی در فرکانسهای پایین می‌شود. و در صورتی که این پیش فاز در جای دیگری جبران نشود، مؤلفهٔ گشتاور سنکرون کننده را در فرکانسهای بین ناحیه‌ای کاهش خواهد داد. و از آنجا که این اثرِ سنکرون‌زدایی، باعث می‌شود تا نواحی، به دنبال بروز اغتشاش، پرت‌تر از هم نوسان کنند، لذا برای پایداری گذرای بین ناحیه‌ای زیان‌آور است.

بهرهٔ پایدارساز. بهرهٔ پایدارساز، K_{STAB}، اثر مهمی بر میرایی نوسانهای روتور دارد. مقدار بهره با بررسی اثر آن در بازهٔ وسیعی از مقادیر انتخاب می‌شود. با افزایش بهرهٔ پایدارساز تا یک بهرهٔ خاص، میرایی افزایش می‌یابد و برای بهره‌های بالاتر از آن، میرایی کاهش پیدا می‌کند. بهرهٔ پایدارساز باید به‌طور ایده‌ال در مقداری متناظر با میراییِ حداکثر، تنظیم شود. لیکن، غالباً با ملاحظات دیگری محدود می‌شود. با یک پایدارساز دلتا ـ امگا به عنوان نتیجه‌ای از فیلتر پیچشی، پایداری «مُد تحریک کننده» مورد غیر قابل توجهی است. با یک پایدارساز دلتا ـ P ـ امگا، پایداریِ مُد تحریک کننده مسألهٔ مهمی نیست و بهره‌های با مقدارهای به مراتب بیشتر نیز قابل قبول می‌باشد، مشروط به اینکه جبرانسازی پیش فاز به گونه‌ای انتخاب شده باشد که مشخصه‌های فازِ رضایتبخشی را بر روی بازه‌ای از فرکانس، که تمامی مُدهای غالب را نیز شامل می‌شود، فراهم آورد. در چنین مواردی، احتمالاً حداکثر مقدار بهرهٔ پایدارساز با ملاحظات عملی از قبیل، تأثیر بر سیگنال نویز محدود می‌شود.

حدود پایدارساز. حد مثبت خروجیِ پایدارساز در مقدار نسبتاً بزرگی در بازهٔ ۰/۱ تا ۲/۰ pu، قرار داده می‌شود. با این حد، PSS مجاز خواهد بود تا به هنگام بروز نوسانهای بزرگ

نقش زیادی داشته باشد. با چنین مقدار بالایی، داشتن وسیله‌ای برای محدود کردن ولتاژ پایانهٔ ژنراتور به حداکثر مقدار مجاز خود، (به طور نوعی در بازهٔ ۱/۱۲ تا pu ۱/۱۵)، ضروری است. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۱۷ ـ ۵ نشان داده شده است، از یک محدود کنندهٔ ولتاژ پایانه استفاده می‌شود که برای آنکه مؤثر باشد، باید بهرهٔ محدود کننده K_L، بسیار زیاد باشد. لیکن سیگنال ولتاژ پایانه، مؤلفه‌های کوچکی از مؤلفه‌های پیچشی را نیز دارا می‌باشد. از این رو، فیدبک این سیگنال به سیستم تحریک از طریق یک بهرهٔ زیاد، ممکن است به ناپایداری مُد پیچشی منجر شود. بنابراین T_c و T_D چنان انتخاب می‌شوند تا علاوه بر تضمین درجهٔ کافی از پایداری حلقهٔ محدود کننده، تضعیف زیادی در فرکانسهای پیچشی فراهم آورند.

در طرف منفی، حدی به اندازهٔ ۰/۰۵ − تا pu ۰/۱ −، مناسب است. این حد در حالی که پاسخ گذرای رضایتبخشی فراهم می‌کند، بازهٔ کنترل کافی را نیز مجاز می‌دارد. در این صورت در مواقع نادری که به دلیل نقص پایدارساز، مجبور شویم خروجیِ PSS را در حد منفی نگه داریم، این پیشامد به خروجیِ واحد منجر نمی‌شود.

بررسی تنظیمهای انتخاب شده. آخرین مرحله در طراحی پایدارساز، ارزیابی اثر آن بر عملکرد کلی سیستم است. نخست با استفاده از یک برنامهٔ پایداری سیگنال کوچک اثر پایدارساز بر مُدهای مختلفِ نوسانِ سیستم و بر بازهٔ وسیعی از وضعیتهای سیستم بررسی می‌شود. این بررسی شامل تحلیل اثر PSS بر مُدهای محلی نیروگاه، مُدهای بین ناحیه‌ای، و مُدهای کنترل می‌شود. بویژه، تضمین این مسأله که تداخل زیان‌آوری با کنترلهای سایر واحدهای تولید و وسایلی از قبیل کنورتورهای HVDC و SVCها وجود ندارد، مهم است.

بعد از بررسی عملکرد PSS تحت انحرافهای کوچک، بررسی اثر آن بر پایداری گذرا و پایداری بلند مدت نیز مهم است.

در سیستمهای با مسائل ولتاژ، باید پذیرش حدود انتخاب شدهٔ خروجی PSS بدقت ارزیابی شود. زیرا امکان دارد در برخی موارد، ولتاژ پایانهٔ ماشین زیر سطح مرجع تحریک کننده بیفتد، در حالی که سرعت نیز در حال افت است که این موضوع می‌تواند به خنثی کردن اثر سیگنال ولتاژ به تحریک کننده به وسیلهٔ پایدار ساز و در نتیجه کاهش بازیافت حالت گذرا منتهی شود. لذا لازم است برای پیشگیری از این مشکل، خروجی پایدارساز محدود شود.

علاوه بر این هماهنگ کردن عملکرد PSS با سایر حفاظتها و کنترلها، از قبیل محدود کننده‌های ولت بر هرتز و حفاظت فوق تخریک یا زیر تحریک، مهم است.

مرجع ۵۳ بررسی تفصیلیِ مراحل بالا را برای طراحی PSS یک نیروگاه بزرگ هسته‌ای ارائه می‌کند.

نظریات کلی دربارهٔ طراحی کنترل تحریک. سیستمهای کنترل تحریک که به صورت بالا طراحی می‌شوند، کنترل‌کننده‌های غیر متمرکز مؤثری را برای میرایی نوسانهای الکترومکانیکی در سیستمهای قدرت، فراهم می‌آورند. به طور کلی، طراحی حاصل بسیار مقاومتر از طراحیهایی است که از سایر روشها، از قبیل روشهای جایابی قطب و روشهای چند متغیرهٔ فضای حالت به دست می‌آید. روند کلی، بر اطلاع از جنبه‌های فیزیکی مسألهٔ پایدارسازی سیستم قدرت بنا شده است. روش بکارگرفته شده برای محقق کردن مشخصه‌های فاز PSS ساده است و فقط به مدلسازی تفصیلیِ مشخصهٔ ماشینهای موردنظر نیاز دارد. برای به دست آوردن سایر پارامترها و تضمین کفایت عملکرد کلیِ کنترل تحریک، از تحلیل تفصیلی عملکرد سیستم قدرت استفاده می‌شود. در نتیجه، کنترلی به دست می‌آید که پایداری کلی سیستم را تحت حالتهای کار مختلف تقویت می‌کند. از آنجا که به منظور افزایش مؤلفهٔ میرایی گشتاور، PSS در بازهٔ وسیعی از فرکانسها تنظیم می‌شود، به میرایی تمامی مُدهای سیستم که در آنها ژنراتور مربوطه مشارکت زیادی دارد، کمک می‌کند. این موضوع شامل هر مُد جدیدی می‌شود که ممکن است به واسطهٔ تغییرات وضعیت سیستم پدید آید. با پارامترهای ثابت، برآوردن بسیاری از نیازها در بازهٔ وسیعی از حالتهای کاری سیستم امکان‌پذیر است؛ از این رو تاکنون انگیزهٔ چندانی برای در نظر گرفتن سیستم کنترل تطبیقی وجود نداشته است.

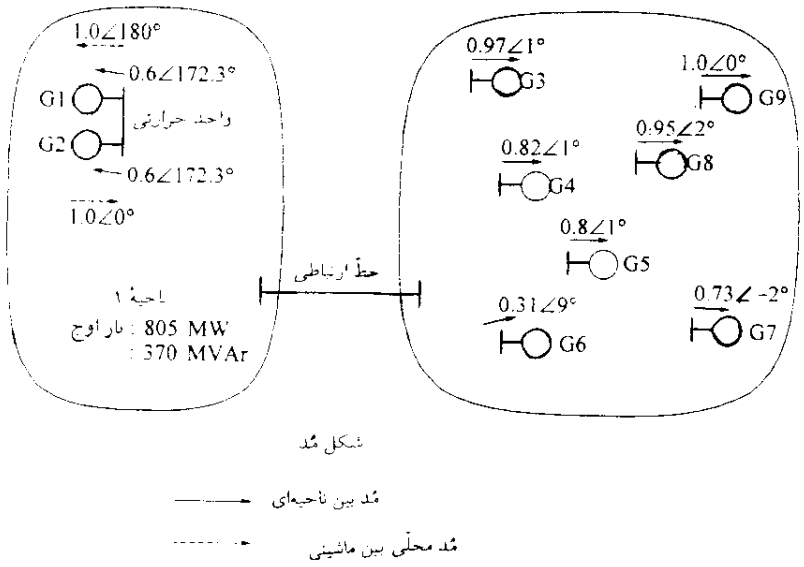
مثالی از طراحی کنترل تحریک

این مثال اِعمال پایدارسازهای سیستم قدرت را به یک نیروگاه حرارتی دو واحده نمایش می‌دهد. هر واحد دارای ظرفیت MVA ۴۸۸ است و به یک سیستم تحریک تریستوری مجهز شده است. مشخصه‌های سیستم قدرت چنان است که این واحدها دو مُد نوسانی روتوری غالب را از خود نشان می‌دهند: یک مُد بین ناحیه‌ای در حدود Hz ۰/۵ و یک مُد بین ماشینی محلی در حدود Hz ۲/۰. هدف طراحیِ کنترل تحریک، تقویت پایداری گذرا و سیگنال کوچکِ سیستم قدرت است.

همچنین به منظور مقایسه، عملکرد دو واحد حرارتی را که به تحریک کننده‌های کُند چرخ[1] مجهز شده‌اند، بررسی می‌کنیم.

سیستم قدرت. همان‌طور که در شکل ۱۷ ـ ۱۱ نشان داده شده است. سیستم قدرت از دو ناحیه تشکیل شده است: ناحیهٔ ۱ بار اوج MW ۸۰۵ دارد و به وسیلهٔ نیروگاه حرارتی دو واحده

1. Slow-Rotating Exciter



شکل ۱۷ ـ ۱۱ سیستم دو ناحیه‌ای

(G_1 و G_2)، که برای آنها کنترل تحریک را طراحی می‌کنیم، تغذیه می‌شود. ناحیهٔ ۲ بار اوج ۳۶۰ MW دارد و به وسیلهٔ هفت نیروگاه قدرت کوچکتر تغذیه می‌شود.

پارامترهای هر یک از دو واحد ۴۸۸ MVA مربوط به ناحیهٔ ۱ در مبنای واحد بر پایهٔ ظرفیت خودشان عبارت است از:

X_d = ۱/۸۱ X_d = ۱/۷۶ X_l = ۰/۱۶ X'_d = ۰/۳ X'_q = ۰/۶۱

X''_d = ۰/۲۱۷ X''_q = ۰/۲۱۷ R_a = ۰/۰۰۲ X'_{d0} = ۷/۸۰ (ثانیه) X'_{q0} = ۰/۹۰ (ثانیه)

T''_{d0} = ۰/۰۲۲ (ثانیه) T''_{q0} = ۰/۰۷۴ (ثانیه) H = ۳/۵۳ K_D = ۰

سیستم تحریک تریستوری. نمودار بلوکی سیستم تحریک تریستوری در شکل ۱۷ ـ ۵ نشان داده شده است. پارامترهای تحریک کننده و AVR عبارت است از:

K_A = ۲۱۲ T_R = ۰/۰۱ E_{fmax} = ۷/۷۷ E_{fmin} = − ۶/۸۶

برای تضمین عملکرد خوب پایداری گذرا از تحریک کننده‌ای با بهرهٔ ۲۱۲ (بدون کاهش گذرای بهره) استفاده شده است.

سیستم تحریک کُندچرخ. سیستم تحریک دیگری که درنظر گرفته شده‌است، یک تحریک‌کنندهٔ جریان مستقیم خود تحریک با پارامترهای زیر است (نمودار بلوکی شکل ۸ ـ ۴۰، فصل ۸ را ببینید):

$K_A = ۱۹/۲$ $T_A = ۰/۱$ $T_E = ۰/۶۵$ $T_C = ۰$ $X_B = ۰$

$A_{ex} = ۰/۴۶$ $B_{ex} = ۰/۱۹$ $K_F = ۰/۰۵$ $T_F = ۰/۷$ $T_R = ۰/۰۲$

$V_{R\,MAX} = ۱/۱۵$ $V_{RMIN} = -۱/۱۵$ $R_C = ۰$ $X_C = ۰$

عملکرد پایداری سیگنال کوچک. فرکانسها و نسبتهای میرایی (ζ) مُدهای زاویهٔ روتور مربوط به واحدهای G۱ و G۲ در جدول ۱۷ ـ ۲ آورده شده است. این نتایج به کمک برنامهٔ MASS و با نمایش تفصیلیِ کلیهٔ واحدهای تولیدی محاسبه شده است. ضمناً حالت اوج بار سیستم در نظر گرفته شده و یکی از مدارهای انتقال اصلی در ناحیهٔ ۱ نزدیک پُست خارج از خط فرض شده بود. شبکه با ۸۳ شین نمایش داده شده است. مؤلفهٔ حقیقی بارها به صورت ۵۰٪ جریان ثابت و ۵۰٪ امپدانس ثابت و مؤلفهٔ راکتیو بارها به صورت امپدانس ثابت مدل شده است.

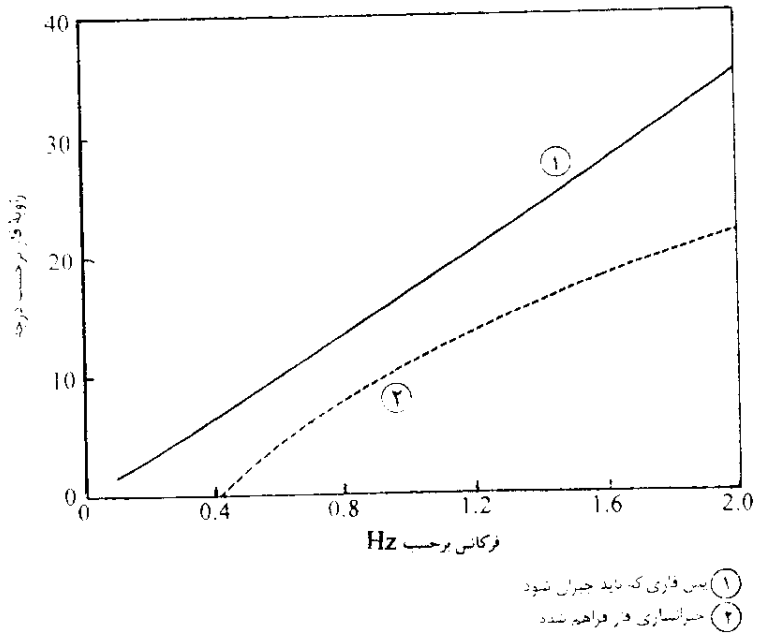
با تحریک کننده‌های تریستوری (بدون PSS)، فرکانس مُد بین ناحیه‌ای، برابر با ۰/۵۵ Hz است و با نسبت میرایی ۰/۰۰۶ کاملاً پایدار است. مُد محلی بین ماشینی، دارای فرکانس ۱/۸۲۳ Hz و نسبت میرایی ۰/۰۴۹ است. صورت مُدها در شکل ۱۷ ـ ۱۱ نشان داده شده است.

با تحریک کننده‌های چرخان، از فرکانس هر دو مُد اندکی کم می‌شود و در مقابل نسبت میرایی اندکی افزایش می‌یابد. اما صورت مُدها، به طور عمده مشابه صورت مُدها در حالت تحریک کننده‌های تریستوری است.

انتخاب پارامترهای PSS برای تحریک کنندهٔ تریستوری. اساس انتخاب جبرانساز پیش فاز در شکل ۱۷ ـ ۱۲ نمایش داده شده است. منحنی ۱ در شکل، پس فاز بین ورودی تحریک کننده و گشتاور الکتریکی ژنراتور را به صورت تابعی از فرکانس نشان می‌دهد. این مشخصه با استفاده از برنامه MASS محاسبه شده که در آن G۱ و G۲ به تفصیل به صورت یک ژنراتور معادل همراه با

جدول ۱۷ ـ ۲ مُدهای زاویهٔ روتور واحدهای G۱ و G۲

نوع تحریک کننده	مُد محلی بین ماشینی		مُد بین ناحیه‌ای	
	فرکانس	ζ	فرکانس	ζ
(الف) تریستوری (بدون PSS)	۱/۸۲۳ Hz	۰/۰۴۹	۰/۵۵۰ Hz	۰/۰۰۶
(ب) تحریک کنندهٔ چرخان	۱/۷۹۳ Hz	۰/۰۷۵	۰/۴۹۸ Hz	۰/۰۴۶



شکل ۱۷ ـ ۱۲ تعیین جبرانسازی پیش فاز

لختی زیاد، و ژنراتورهای بقیهٔ نیروگاهها به صورت شینهای بینهایت نمایش داده شده است. منحنی ۲ شکل جبرانسازی پیش فازی را که با انتخاب پارامترهای PSS زیر به دست آمده، نشان می‌دهد (شکل ۱۷ ـ ۵ را ببینید):

$$T_۱ = ۰/۰۶ \quad T_۲ = ۰/۰۲ \quad T_۳ = ۱/۵ \quad T_۴ = ۴/۰ \quad T_W = ۷/۵$$

در جدول ۱۷ ـ ۳ اثر تکمیل سیستم تحریک تریستوری واحدهای $G_۱$ و $G_۲$ با PSS، بر پایداری سیگنال کوچک برای مقادیر مختلف بهرهٔ پایدارساز K_{STAB} نشان داده شده است. میرایی هر دو مُد نوسان روتور، با افزایش K_{STAB} افزایش می‌یابد؛ از این رو بهره‌ای در حدود ۳۰، رضایتبخش است.

سایر پارامترهای PSS (شامل محدود کنندهٔ ولتاژ پایانه) که بر عملکرد سیگنال کوچک اثر می‌گذارند به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$V_{s\,max} = ۰/۲ \quad V_{s\,min} = -۰/۰۵ \quad V_{LS} = ۱/۱۵ \quad K_L = ۱۷$$

$$T_C = ۰/۰۲۵ \quad T_D = ۱/۲۱۲ \quad T_{RL} = ۰/۰۱$$

جدول ۱۷ ـ ۳ اثر بهرهٔ PSS بر مُدهای زاویهٔ روتور

K_{STAB}	مُد محلی بین ماشینی		مُد بین ناحیه‌ای	
	فرکانس	ζ	فرکانس	ζ
۰	۱/۸۲۳ Hz	۰/۰۴۹	۰/۵۵۰ Hz	۰/۰۰۶
۲۰	۲/۰۷۹ Hz	۰/۱۵۶	۰/۵۴۷ Hz	۰/۰۸۷
۳۰	۲/۲۱۸ Hz	۰/۱۹۷	۰/۵۴۸ Hz	۰/۱۲۴
۴۰	۲/۳۶۶ Hz	۰/۲۲۷	۰/۵۳۳ Hz	۰/۱۵۶

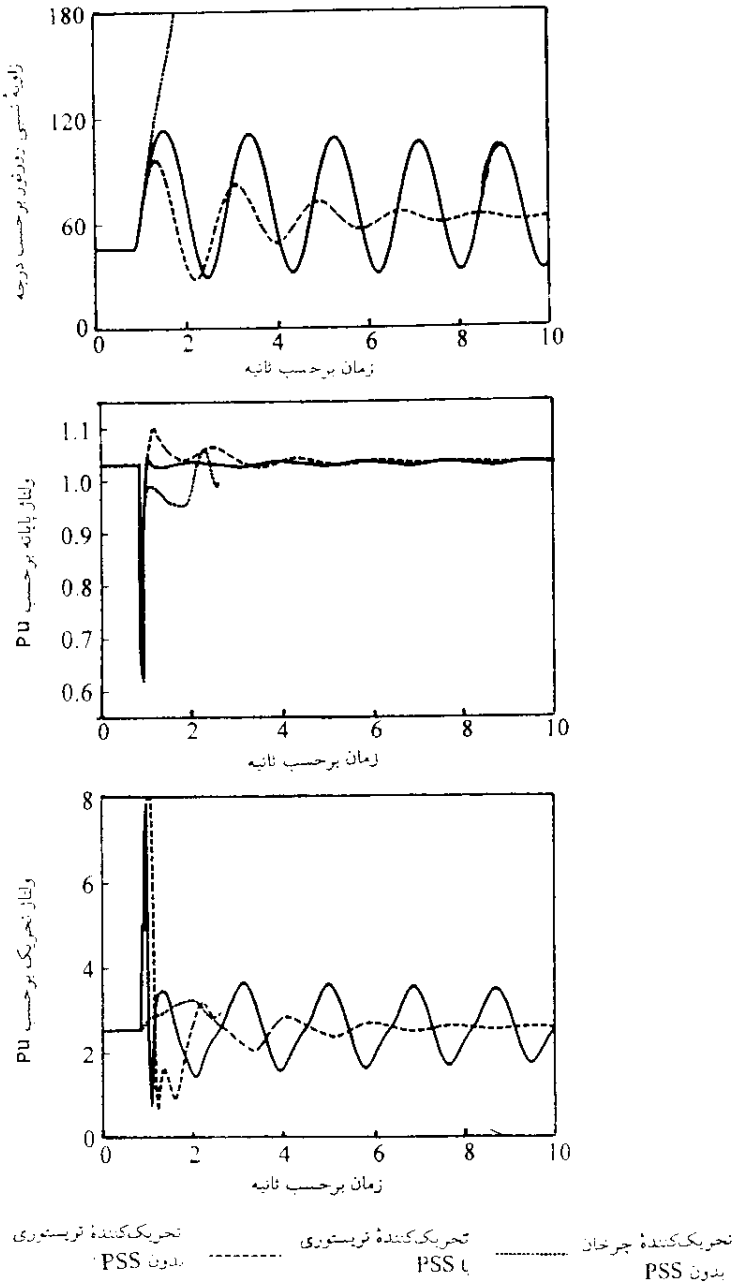
عملکرد پایداری گذرا. نتایج شبیه‌سازیهای پایداری گذرا در پیشامدی شامل یک خطای سه فاز بر روی مداری در نزدیکی نیروگاه حرارتی در ناحیهٔ ۱، در شکلهای ۱۷ ـ ۱۳ و ۱۷ ـ ۱۴ نشان داده شده است. خطا، هنگامی اعمال شده که زمان مساوی ۵۰ سیکل است و بعد از ۵ سیکل با باز کردن همزمان هر دو طرفِ مدار معیوب، برطرف شده است. سه نوع کنترل تحریک برای واحدهای G۱ و G۲ در نظر گرفته شده است: تحریک کنندهٔ تریستوری با و بدون PSS (K_{STAB} = ۳۰) و تحریک کنندهٔ جریان مستقیم کند.

نتایج نشان داده شده در شکل ۱۷ ـ ۱۳ برای موقعیتهای اوج بار سیستم است. سیستم با تحریک کنندهٔ چرخان، ناپایدار گذراست. با تحریک کنندهٔ تریستوری (بدون PSS) پایدار ولی با میرایی ضعیف است. علاوه بر افزایش مناسب میراییِ نوسانهای سیستم، PSS عملکرد پایداری گذرا را با کاهش اولین نوسان روتور، بهبود می‌بخشد.

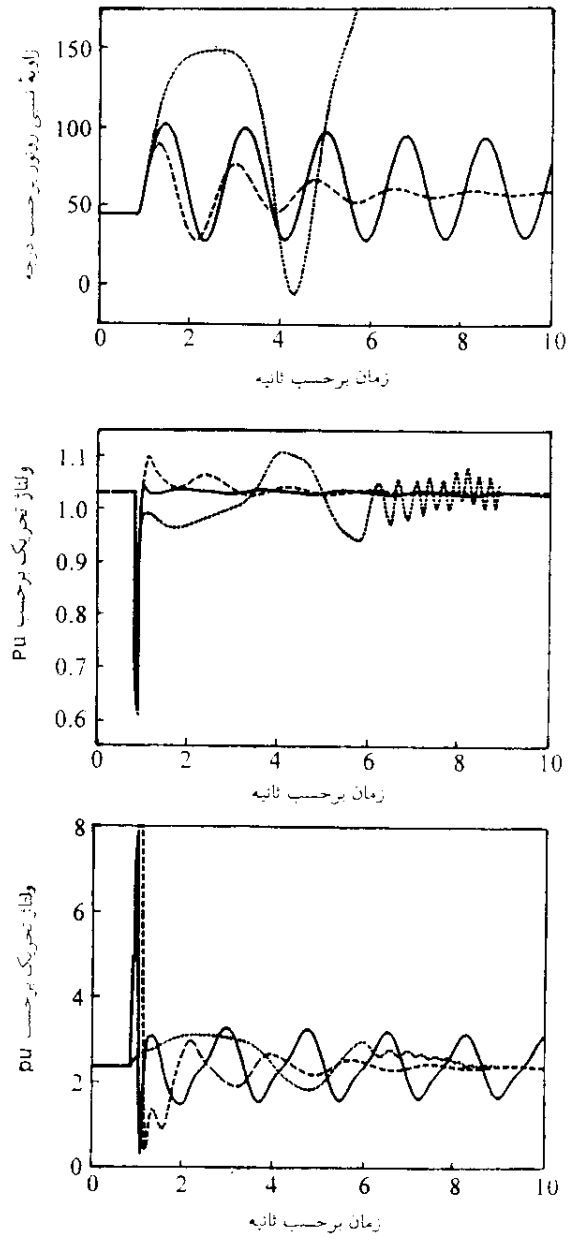
نتایج نشان داده شده در شکل ۱۷ ـ ۱۴ برای سیستمی در وضعیت ۹۴/۵٪ اوج بار و خروجی کاهش یافتهٔ نیروگاه حرارتی به مقدار متناسب در ناحیهٔ ۱ است. با تحریک کننده‌های چرخان، واحدهای G۱ و G۲ در این حالت در اولین نوسان پایدار هستند ولی در دومین نوسان ناپایدار می‌شوند. با تحریک کنندهٔ تریستوری، عملکردِ پایداری، مشابه حالت اوج بار است. بدیهی است که تحریک‌کنندهٔ تریستوری با PSS به عملکرد پایداری کلی بهتری منجر می‌شوند.

انتخاب موقعیت PSS

در سیستمهای بزرگ، ممکن است انتخاب واحدهایی که باید برای میراکردن نوسانهای بین ناحیه‌ای، روی آنها PSS نصب شود، چندان واضح نباشد. اگرچه اصول طراحی PSS، برای میراکردن مُدهای محلی و بین ناحیه‌ای مشابه است، لیکن مکانیزمهایی که به وسیلهٔ آنها PSS در میرایی دو نوع نوسان نقش دارد، متفاوت است. به طور عمده PSS با مدوله‌کردن بارهای سیستم به میرایی مُد بین ناحیه‌ای می‌افزاید، در حالی که عملکرد PSS در خصوص مُد محلی فقط به میزان اندکی تحت تأثیر مشخصه‌های بار قرار دارد [۵۴، ۵۵]. درک این مکانیزمها برای اِعمال مؤثر PSS بسیار مهم است.



شکل ۱۷ ـ ۱۳ پاسخ واحد G۱ به خطای سه فاز پنج سیکله؛ وضعیت بار اوج



تحریک‌کنندهٔ چرخان بدون PSS ..... تحریک‌کنندهٔ تریستوری با PSS ---------- تحریک‌کنندهٔ تریستوری بدون PSS ———

شکل ۱۷ ـ ۱۴ پاسخ واحد ۵۱ برای خطای سه فاز پنج سیکله؛
در وضعیت ۹۴/۵٪ بار اوج

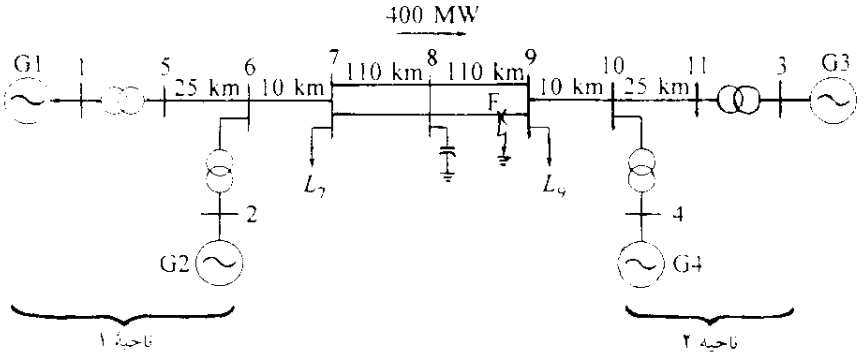
ضرایب مشارکت متناظر با انحرافهای سرعت نیروگاهها، برای جداکردن اولیهٔ واحدهای تولید به منظور نصب پایدارسازها بسیار سودمند است. لیکن، ضریب مشارکت زیاد، شرطی لازم ولی ناکافی برای PSS واحد است تا به طور مؤثری نوسانهای بین ناحیه‌ای را میرا کند و باید به دنبال جدا کردن اولیه براساس ضرایب مشارکت، با استفاده از مانده‌ها و پاسخهای فرکانسی، ارزیابی دقیقتری انجام پذیرد تا مکانهای مناسب برای پایدارسازها تعیین شود [۵۴].

۱۷ ـ ۲ ـ ۲ کنترل تکمیلی جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو

در فصل یازدهم، مشخصه‌ها و مدلسازی جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو (SVCها)، به همراه اصول اولیه و کاربردهای آنها توضیح داده شد. با کنترل سریع ولتاژ و توان راکتیو، SVC می‌تواند در تقویت عملکرد دینامیکی سیستمِ قدرت نقش داشته باشد. معمولاً، تنظیم ولتاژ مُد اولیهٔ کنترل است، که این موضوع پایداری ولتاژ و پایداری گذرا را بهبود می‌بخشد. لیکن، اغلب نقش SVC در میرایی نوسانهایی از سیستم، که فقط از تنظیم ولتاژ ناشی شده باشد، کوچک است. بنابراین استفاده از کنترل تکمیلی برای بدست آوردن میرایی کافی، الزامی است. اثر SVC در تقویت پایداری سیگنال کوچک، به موقعیت SVC، سیگنالهای ورودی بکار گرفته شده و طراحی کنترل‌کننده بستگی دارد.

مثالی از کاربرد SVC

سیستم دو ناحیه‌ایِ سادهٔ شکل ۱۷ ـ ۱۵، برای نمایش کاربرد SVC در تقویت پایداری سیستم به‌کار گرفته شده است. این سیستم مشابه سیستم استفاده شده در مثال ۱۲ ـ ۶ در فصل دوازدهم است و فقط تفاوتهای جزئی در شرایط پخش بار به‌علت جبرانسازی اضافی خازن شنت در شین



شکل ۱۷ ـ ۱۵ یک سیستم ساده دوناحیه‌ای

۸ دارد. ضمناً فرض شده است که هر چهار ژنراتور دارای تحریک‌کننده‌های جریان‌مستقیم خود تحریک هستند.

عملکرد سیستم بدون SVC. شکل ۱۷ ـ ۱۶ پاسخ سیستم را به خطایی سه فاز در نزدیکی شین ۹ و بر روی یکی از خطوط بین شینهای ۸ و ۹ نشان می‌دهد. فرض شده است که با جداسازی خط‌خطادار در زمان ۷۴ میلی‌ثانیه، خطا رفع شده است. از نتایج، مشاهده می‌کنیم که سیستم در نتیجهٔ رشد نوسانهایی با فرکانسی در حدود ۰/۴ Hz، ناپایدار می‌شود.

تقویت پایداری با SVC. اولین گام، انتخاب جای مناسبی برای SVC است. برای این سیستم ساده، یک انتخاب واضح، بین دو ناحیهٔ به هم پیوسته و در وسط آنها خواهد بود، یعنی جایی که در آن نوسانهای ولتاژ بدون SVC حداکثر است [۵۶، ۵۷].

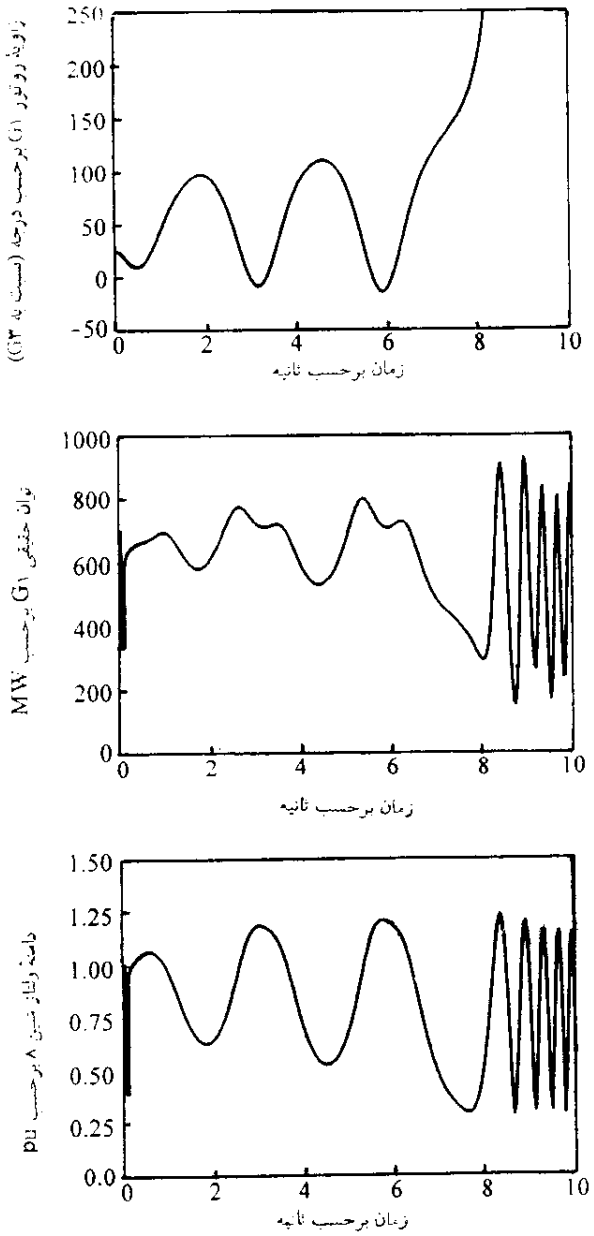
البته در سیستمهای پیچیدهٔ بزرگ، بهترین موقعیت SVC معلوم نیست. در چنین مواردی، می‌توان از برنامه‌های PEALS (توضیح داده شده در فصل ۱۲) یا VSTAB (توضیح داده شده در فصل ۱۴)، برای شناسایی مکانهای SVC استفاده کرد. مشارکتهای شین که از طریق برنامهٔ VSTAB محاسبه می‌شوند و نیز ضرایب مشارکت ولتاژ حاصل از برنامهٔ PEALS، می‌توانند به عنوان اندیسهای حساسیت سودمندی برای شناسایی مکانهای SVC استفاده شوند. جدولهای ۱۷ ـ ۴ و ۱۷ ـ ۵ این اندیسها را برای وضعیت پیش از خطای سیستم به دست می‌دهند. نتایج VSTAB نشان می‌دهد که شین ۸، بهترین مکان است. نتایج PEALS نشان می‌دهد که شین ۹، بالاترین ضریب مشارکت ولتاژ (حساسیت به تغییر سوسپتانس) را دارد، ضمن اینکه شینهای ۱۰، ۴، ۸ و ۱۱ نیز ضرایب بزرگی دارند. با در نظر گرفتن اینکه انتقال توان می‌تواند در هر جهتی بین دو ناحیه باشد. بدیهی است که شین ۸ بهترین انتخاب، خواهد بود.

جدول ۱۷ ـ ۴ مشارکت شین محاسبه شده با VSTAB

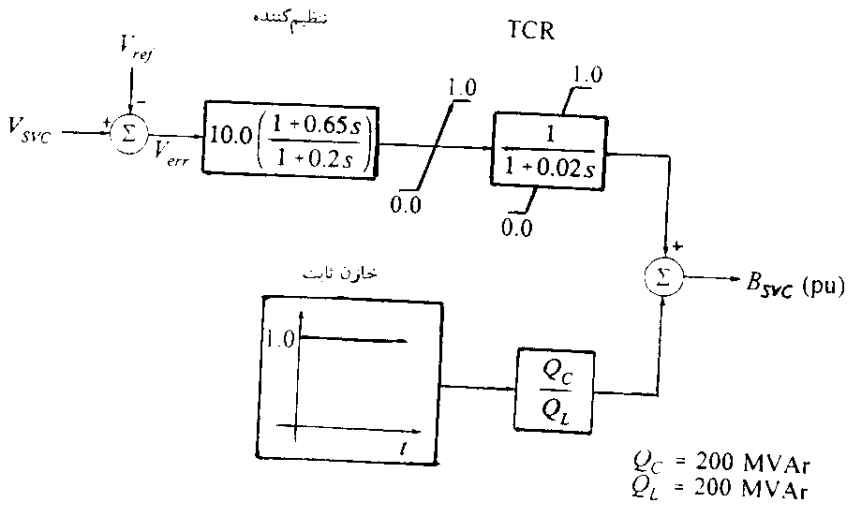
شین	مشارکت
۸	۰/۵۱۰۰
۹	۰/۱۷۱۱
۷	۰/۱۶۱۳
۱۰	۰/۰۶۶۸
۶	۰/۰۶۱۷
۱۱	۰/۰۱۵۳
۵	۰/۰۱۳۸

جدول ۱۷ ـ ۵ دامنهٔ بردار ویژهٔ ولتاژ شین برای مُد بین ناحیه‌ای محاسبه شده با PEALS

شین	ضریب دامنهٔ بردار ولتاژ
۹	۱/۰۰۰
۱۰	۰/۸۸۵۲
۴	۰/۷۲۹۴
۸	۰/۶۵۴۷
۱۱	۰/۶۱۴۷
۳	۰/۳۶۴۵



شکل ۱۷ ـ ۱۶ پاسخ سیستم به یک اغتشاش شدید بدون SVC



شکل ۱۷ ـ ۱۷ نمودار بلوکی SVC و تنظیم کنندهٔ ولتاژ

از یک SVC متشکل از یک خازن ثابت و یک راکتور قابل کنترل تریستوری (TCR) برای تقویت پایداری سیستم استفاده شده است. ظرفیت SVC از ۰ تا MVAr ۲۰۰ فرض شده است (خازنی). شکل ۱۷ ـ ۱۷ نمودار بلوکی SVC، شامل تنظیم کنندهٔ ولتاژ را نشان می‌دهد. بهرهٔ تنظیم‌کنندهٔ ولتاژ روی مقدار ۱۰ قرار داده شده است تا ۱۰٪ شیب را در بازهٔ کنترل به دست دهد. پارامترهای بلوک پس ـ پیش فاز چنان انتخاب شده‌اند تا تنظیم کنندهٔ ولتاژ پایداری گذرای سیستم (یعنی، پاسخ اولیهٔ بالا)، را تقویت کند.

عملکرد پایداری سیگنال کوچک. جدول ۱۷ ـ ۶ فرکانسهای میرایی مُد بین ناحیه‌ای را با و بدون SVC، در وضعیتهای قبل و پس از خطای سیستم خلاصه کرده است. اگرچه SVC مُد بین ناحیه‌ای را پایدار کرده است، لیکن میرایی هنوز بسیار کم است.

جدول ۱۷ ـ ۶ اثر SVC بر مُد بین ناحیه‌ای (فرکانس و نسبت میرایی)

وضعیت سیستم	بدون SVC		با SVC	
	فرکانس	ζ	فرکانس	ζ
پیش از خطا	۰/۵۴۰ Hz	۰/۰۰۶۴	۰/۵۴۷ Hz	۰/۰۰۹۶
پس از خطا	۰/۴۱۷ Hz	− ۰/۰۲۲۸	۰/۴۷۶ Hz	۰/۰۱۵۴

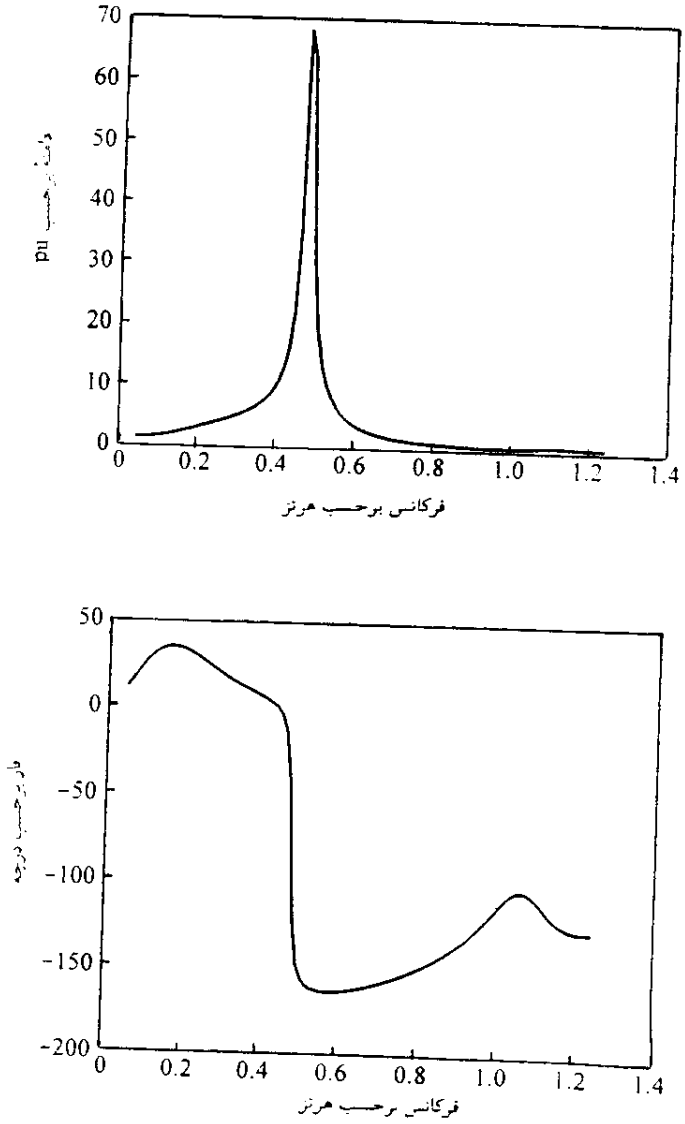
کنترل تکمیلی برای بهبود میرایی. سیگنال ورودی استفاده شده برای کنترل تکمیلیِ SVC، بایستی به مُدهای نوسانی که باید میرا شوند حساس باشد. این موضوع را می‌توان با مانده‌ها و رؤیت‌پذیری و با استفاده از برنامهٔ MASS توضیح داده شده در فصل دوازدهم، تعیین کرد. جدول ۱۷ ـ ۷ مانده‌ها و عوامل رؤیت‌پذیری را برای سیگنالهای ورودی مختلف برای هر دو وضعیت قبل و پس از خطا نشان می‌دهد. بدیهی است که یک انتخاب خوب برای سیگنال ورودی، دامنهٔ جریان در خط بین شینهای ۹ و ۱۰ است. شکل ۱۷ ـ ۱۸ مشخصه‌های پاسخ فرکانسی تابع تبدیل بین ورودی SVC و این جریان را نشان می‌دهد. این مشخصه، بهره‌ای زیاد در فرکانس مُد بین ناحیه‌ای دارد که نشانه‌ای از انتخاب مناسب این سیگنال است.

طراحی کنترل. می‌توان از چندین روش طراحیِ کنترل دیگر نیز برای تعیین پارامترهای کنترل SVCها استفاده کرد [۵۵]:

- روش جایابی قطب؛
- روش حاشیهٔ بهره و فاز؛
- روش H ـ بینهایت (H_∞).

جدول ۱۷ ـ ۷ مانده‌ها و عوامل رؤیت‌پذیری

سیگنال	پیش از خطا		پس از خطا	
	مانده	رؤیت‌پذیری	مانده	رؤیت‌پذیری
$\Delta\omega$ از G۱	−۰/۲۶۸۰−j۰/۱۱۵۶	۰/۸۷۳۸	−۰/۹۵۲۲−j۰/۳۶۵۱	۰/۵۴۷۱
$\Delta\omega$ از G۲	−۰/۲۱۲۱−j۰/۱۰۰۴	۰/۷۰۱۵	−۰/۷۷۳۳−j۰/۳۳۴۷	۰/۴۵۱۰
$\Delta\omega$ از G۳	۰/۴۵۸۸+j۰/۱۱۲۱	۱/۴۱۴۰	۲/۶۲۰۰+j۰/۲۹۴۵	۱/۴۱۴۰
$\Delta\omega$ از G۴	۰/۴۰۶۴+j۰/۰۹۴۷	۱/۲۵۱۰	۲/۴۳۸۰+j۰/۲۴۶۹	۱/۳۱۴۰
ΔP, ۶ـ۷ خط	−۰/۲۲۸۶+j۰/۴۹۱۴	۱/۶۲۳۰	−۰/۶۵۵۱+j۱/۵۱۶۰	۰/۸۸۶۱
ΔP, ۹ـ۱۰ خط	۰/۲۱۲۲−j۰/۸۵۶۰	۲/۶۴۰۰	۰/۵۳۰۵−j۴/۳۵۷۰	۲/۳۵۵۰
ΔQ, ۶ـ۷ خط	−۰/۰۳۱۰+j۰/۲۱۰۷	۰/۶۳۷۵	۰/۱۲۸۹+j۱/۲۰۲۰	۰/۶۸۴۷
ΔQ, ۹ـ۱۰ خط	−۰/۰۴۰۰+j۰/۲۳۴۶	۰/۷۱۲۶	−۰/۰۹۲۴+j۱/۶۲۹۰	۰/۸۷۵۲
ΔI, ۶ـ۷ خط	−۰/۳۱۵۷+j۰/۸۶۱۸	۲/۷۹۸۰	−۰/۸۹۱۹+j۳/۴۶۴۰	۱/۹۱۲۰
ΔI, ۹ـ۱۰ خط	۰/۲۶۱۵−j۰/۸۷۳۲	۲/۷۲۹۰	۰/۶۴۸۴−j۳/۸۸۱۰	۲/۱۱۱۰

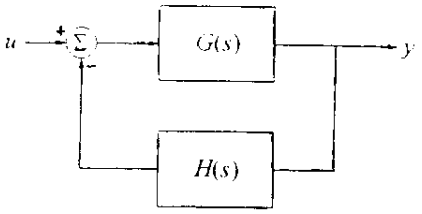


شکل ۱۷ ـ ۱۸ پاسخ فرکانسی تابع تبدیل بین ورودی SVC و جریان در خط بین شین‌های ۹ و ۱۰

در اینجا استفاده از روش جایابی قطب را تشریح می‌کنیم و نخست، توضیح مختصری از روش را ارائه می‌کنیم.

روش جایابی قطب از مکان ریشه برای انتقال یک جفت از قطبهای غالب به مکان تعیین شدهٔ جدید در صفحهٔ s، استفاده می‌کند. پس از طراحی اولیه، مقاومت کنترل‌کننده، مورد آزمون قرار می‌گیرد و در صورت لزوم، اصلاحات مناسبی روی آن انجام می‌شود. در این مرحله، عناصر غیر خطی نیز در نظر گرفته شده و به عنوان حدهای جبرانساز قرار داده می‌شوند.

فرض کنید تابع تبدیل حلقه ـ باز سیستم و کنترل‌کننده (جبرانساز)، همان‌طور که در شکل ۱۷ ـ ۱۹ نشان داده شده است، به ترتیب $G(s)$ و $H(s)$ باشند.



شکل ۱۷ ـ ۱۹ تابع تبدیل سیستم با فیدبک

در این صورت، تابع تبدیل حلقه ـ بستهٔ سیستم جبران شده عبارت است از:

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

صفرهای $1 + G(s)H(s)$ قطبهای سیستم حلقه ـ بسته هستند.

اینک فرض کنید مقدار ویژهٔ سیستم، λ، به مکان جدیدی در صفحهٔ s (نشان داده شده با λ_0)، انتقال یابد. از آنجا که λ_0 باید معادلهٔ مشخصهٔ سیستم حلقه ـ بسته را برآورده سازد، داریم:

$$H(\lambda_0) = -\frac{1}{G(\lambda_0)}$$

که می‌توان آن را به صورت زیر، برحسب دامنه و فاز بیان کرد:

$$|H(\lambda_0)| = \frac{1}{|G(\lambda_0)|}$$

$$\arg(H(\lambda_0)) = 180^\circ - \arg(G(\lambda_0))$$

از این رو، دامنه و فاز جبرانساز در λ_0 را می‌توان از دامنه و صفر تابع تبدیل حلقه ـ باز در λ_0، یعنی از پاسخ فرکانسی مختلط سیستم در مکان قطب جدید، محاسبه کرد. مکان قطب جدید براساس برآورده ساختن نسبت میرایی تعیین شده، انتخاب می‌شود و معمولاً قسمت موهومی آن اندکی بزرگتر از قسمت موهومی λ انتخاب می‌شود.

جبرانساز عموماً از یک پاکساز و یک سری توابع پیش یا پس فاز برای برآورده ساختن معادلهٔ آرگومان[1]، به صورت نشان داده شدهٔ زیر، تشکل می‌شود:

$$K\frac{sT_W}{1+sT_W}\frac{1+sT_1}{1+sT_2}\cdots\frac{1+sT_{2n-1}}{1+sT_{2n}}$$

از پاکساز، برای حذف مؤلفهٔ جریان مستقیم یا کاهش مؤلفهٔ نزدیک به جریان مستقیم سیگنالِ اندازه‌گیری شده، استفاده شده است و دارای ثابت زمانی بزرگی است. به دلایل عملی هر بلوک جبرانسازی پیش یا پس فاز به حداکثر 60°، محدود شده است. حداکثر زاویه‌ای که iاُمین بلوک می‌تواند فراهم آورد (θ_m)، در زیر داده شده است:

$$\sin\theta_m = \frac{1-a_i}{1+a_i}$$

که در آن $a_i = T_{2i}/T_{2i-1}$ است.

فرکانسی متناظر با این زاویهٔ حداکثر برابر است با:

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{a_i}\,T_{2i-1}}$$

که معمولاً نزدیکِ فرکانس λ_0 انتخاب می‌شود و سرانجام نیز بهرهٔ K، برای برآورده ساختن معادلهٔ دامنه انتخاب می‌شود.

برای سیستم شکل ۱۷ ـ ۱۵، دامنه و فاز تابع تبدیل بین ورودی SVC و جریان در خط از شین

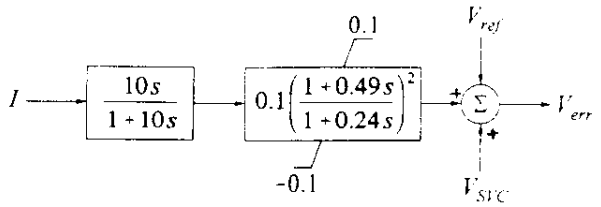
1. Argument

۱۰ به شین ۹ برای تعدادی از مقادیر λ_0 و برای موقعیتهای قبل و پس از خطای سیستم محاسبه شده است. هدف، پیدا کردن مقادیر رضایتبخشی از λ_0 است که تقریباً به دامنه و فاز یکسان برای هر دو وضعیت کاری منجر شوند. این مقادیر λ_0 در جدول ۱۷ ـ ۸ داده شده است.

جدول ۱۷ ـ ۸ موقعیت مطلوب مقادیر ویژه و مقدار تابع تبدیل سیستم

سیستم پیش از خطا		سیستم پس از خطا	
موقعیت جدید مقدار ویژه	مقدار تابع تبدیل	موقعیت جدید مقدار ویژه	مقدار تابع تبدیل
$-۰/۱۲۷ \pm j۳/۵۴۴$	$۴/۲۶۲ \angle ۱۳۷/۸^\circ$	$-۰/۵۷۶ \pm j۳/۴۹۸$	$۴/۱۷۷ \angle ۱۳۲/۳^\circ$

شکل ۱۷ ـ ۲۰، نمودار بلوکی کنترل تکمیلی را نشان می‌دهد. حدهای خروجیِ کنترل‌کننده برای فراهم آوردن پاسخ مطلوب سیگنال بزرگ تنظیم شده است.



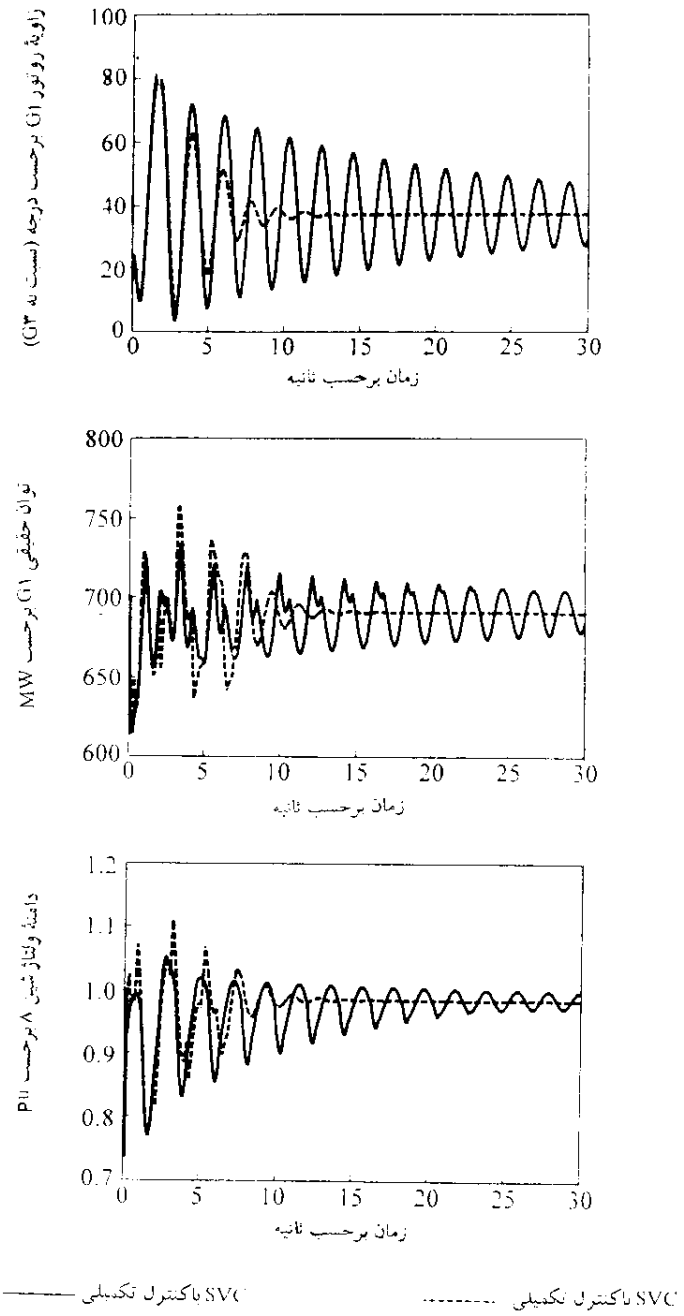
شکل ۱۷ ـ ۲۰ نمودار بلوکی کنترل تکمیلی

فرکانس و نسبت میرایی مُد بین ناحیه‌ای با کنترل تکمیلی SVC عبارتند از

پیش از خطا $\zeta = ۰/۰۳۶$ $f = ۰/۵۶۴$ Hz

پیش از خطا $\zeta = ۰/۱۶۳$ $f = ۰/۵۵۷$ Hz

عملکرد پایداری گذرای سیستم با و بدون کنترل تکمیلی SVC در شکل ۱۷ ـ ۲۱ نشان داده شده است. همانند قبل، اغتشاشِ در نظر گرفته شده یک خطای سه فاز ۷۴ میلی‌ثانیه‌ای بر یکی از خطوط بین شین‌های ۸ و ۹ است. SVC با تنظیم ولتاژ، سیستم را پایدار می‌کند ولی میرایی ضعیف است. با کنترل تکمیلی SVC، نوسانها نیز بخوبی میرا می‌شوند.



شکل ۱۷ ـ ۲۱ پاسخ سیستم به اغتشاش شدید با و بدون کنترل تکمیلی SVC در شین ۸

۱۷ ـ ۲ ـ ۳ کنترل تکمیلیِ خطوط انتقال HVDC

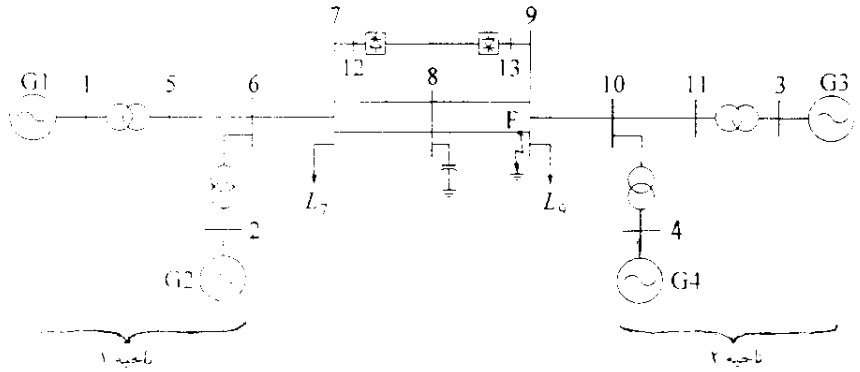
همان‌طور که در فصل دهم توضیح داده شد، کمیت کنترل شدهٔ اصلی در خط انتقال HVDC، جریان مستقیم است. معمولاً جریان مستقیم به وسیلهٔ یکسوساز، کنترل و ولتاژ خط به وسیلهٔ اینورتور در نزدیکی مقدار نامی حفظ می‌شود. میرایی نوسانهای الکترومکانیکی سیستم جریان متناوب را می‌توان با مدوله کردن فرمان جریان در یکسوساز افزایش داد. روش دیگر آن است که فرمان جریان در یکسوساز و فرمان ولتاژ در اینورتور مدوله شوند.

می‌توان خط HVDC را در یک سیستم جریان متناوب قرار داد یا یک ارتباط ناهماهنگ بین دو سیستم جریان متناوب تشکیل داد. کاربرد کنترل تکمیلی در هر کدام از این دو نوع خط HVDC، برای میراییِ نوسانهای سیستم جریان متناوب مؤثر است. مراجع ۴۲ و ۴۳ طرحهای مدولاسیون جریان مستقیم کاربردی در چندین خطوط انتقال HVDC را توضیح می‌دهند.

مثال زیر استفاده از کنترل تکمیلی خطوط HVDC را برای تقویت پایداری سیستم نمایش می‌دهد.

مثالی از کنترل تکمیلی خط HVDC

سیستم به کار گرفته شده برای نمایش اِعمال کنترل تکمیلی HVDC، در شکل ۱۷ ـ ۲۲ نشان داده شده است. این سیستم بر مبنای سیستم دو ناحیه‌ای در نظر گرفته شده در مثال بخش قبل (شکل ۱۷ ـ ۱۵) و در مثال ۱۲ ـ ۶ بنا شده است. یک خط ارتباطی جریان مستقیم دو قطبی MW ۲۰۰، بین شینهای ۷ و ۹ موازی با دو خط ارتباطی جریان متناوب اضافه شده است. خط جریان

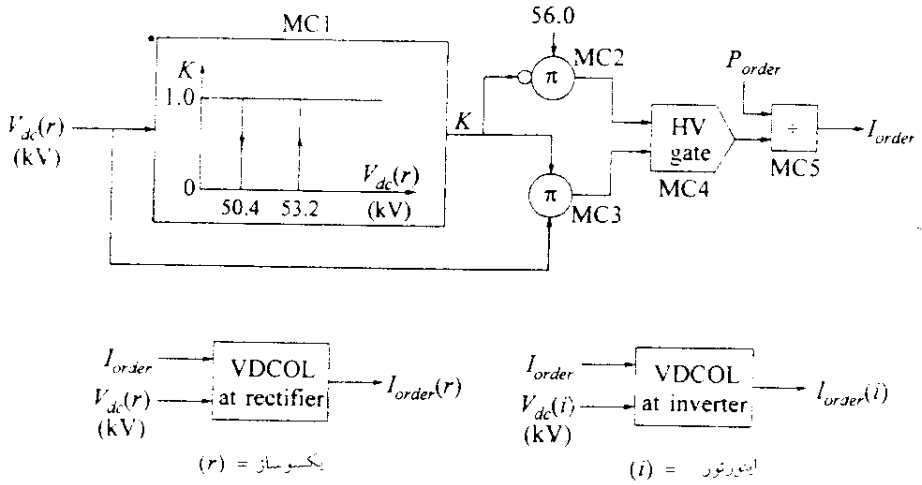


شکل ۱۷ ـ ۲۲ سیستم دو ناحیه‌ای با خطوط موازی جریان مستقیم و جریان متناوب

مستقیم به صورت یک خط تک قطبی با ولتاژ نامیِ KV ۵۶ و جریان نامیِ A ۳۶۰۰ نمایش داده شده است. مقاومت خط جریان مستقیم، Ω ۱/۵ و اندوکتانس آن mH ۱۰۰ است. راکتانس کموتاسیون (X_c) مربوط به هر کنورتور، Ω ۰/۷۵ است. از یک راکتور هموارساز mH ۵۰ در هر انتهای خط استفاده شده است.

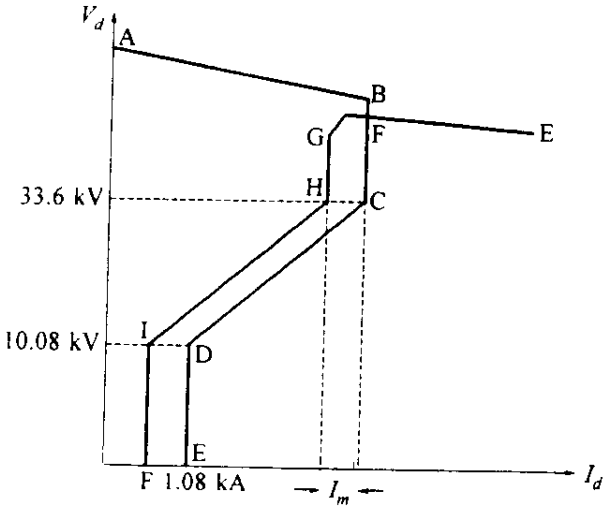
بخش جریان متناوبِ سیستم، بسیار شبیه به قسمت جریان متناوب مثال ۱۲ ـ ۶ می‌باشد. تفاوت اصلی آنها منبع توان راکتیو MVAr ۱۲۵ است که در شین‌های یکسوساز و اینورتور به‌کار رفته است.

مدلسازی کنترلهای کنورتور. شکلهای ۱۷ ـ ۲۳ تا ۱۷ ـ ۲۸ مدلهای استفاده شده برای نمایش کنترلهای خط جریان مستقیم را نمایش می‌دهند. کنترل مرکزی، نشان داده شده در شکل ۱۷ ـ ۲۳، فرمان جریان را برای یکسوساز و اینورتور تعیین می‌کند. اگر ولتاژ جریان مستقیم نهاییِ یکسوساز کمتر از ۹۰٪ مقدار نامی باشد، کنترل به مُد جریان ثابت تغییر وضعیت می‌دهد. مشخصهٔ پسماند نشان داده شده با بلوک MC۱ از کشاکش[1] بین مُدهای کنترل توان ثابت و جریان ثابت جلوگیری می‌کند. فرمان جریان با حد وابسته به ولتاژ فرمان جریان (VDCOL) نشان داده شده در شکل ۱۷ ـ ۲۴ محدود شده است.



شکل ۱۷ ـ ۲۳ کنترل مرکزی

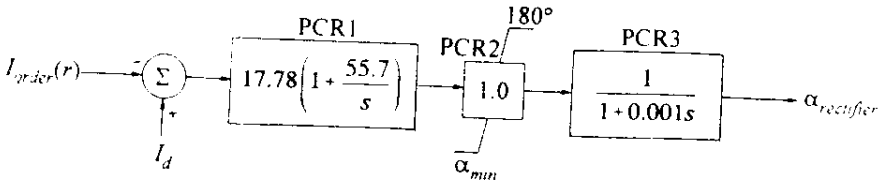
1. Hunting



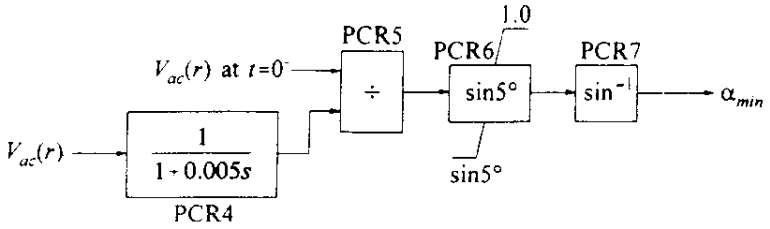
I_m = 0.36 kA
ثابت زمان توقف، ۵ میلی ثانیه است
ثابت زمان فعالیت، ۱۰۰ میلی ثانیه است

شکل ۱۷ ـ ۲۴ حدها وابسته به ولتاژ فرمان جریان

نمایش کنترل قطبی یکسوساز، در شکل ۱۷ ـ ۲۵ آورده شده است. مُد عادی کار یکسوساز، کنترلِ جریان است، از یک کنترل‌کننده تناسبی به علاوهٔ انتگرالی (بلوک PCR۱) برای کنترل جریان خط مستقیم استفاده شده است. زاویهٔ تأخیر روشن شدن α بین α_{min} و ۱۸۰° محدود شده است. حد پایین α_{min} تضمین می‌کند که ولتاژ پیشرو کافی در دو سر تریستور برای روشن کردنِ موفقیت‌آمیز، وجود داشته باشد. همان‌طور که در شکل ۱۷ ـ ۲۶ نشان داده شده، این حد با ولتاژ خط جریان متناوب در یکسوساز (بلوکهای PCR۴ تا PCR۷) تغییر می‌کند تا همواره حداقل‌مقداری از ولتاژ پیشرو در دو سر تریستور وجود داشته باشد.



شکل ۱۷ ـ ۲۵ کنترل قطبی یکسوساز



شکل ۱۷ ـ ۲۶ محاسبهٔ α_{min}

شکل ۱۷ ـ ۲۷ نمایشِ کنترل قطبی اینورتور را نشان می‌دهد. در وضعیت عادی، اینورتور در حالت کنترل زاویهٔ ثابت خاموش شدن (**CEA**ی) نمایش داده شده به صورت زیر قرار دارد:

$$\cos\alpha = \frac{6X_c I_d}{\pi V_{d0}} - \cos\gamma$$

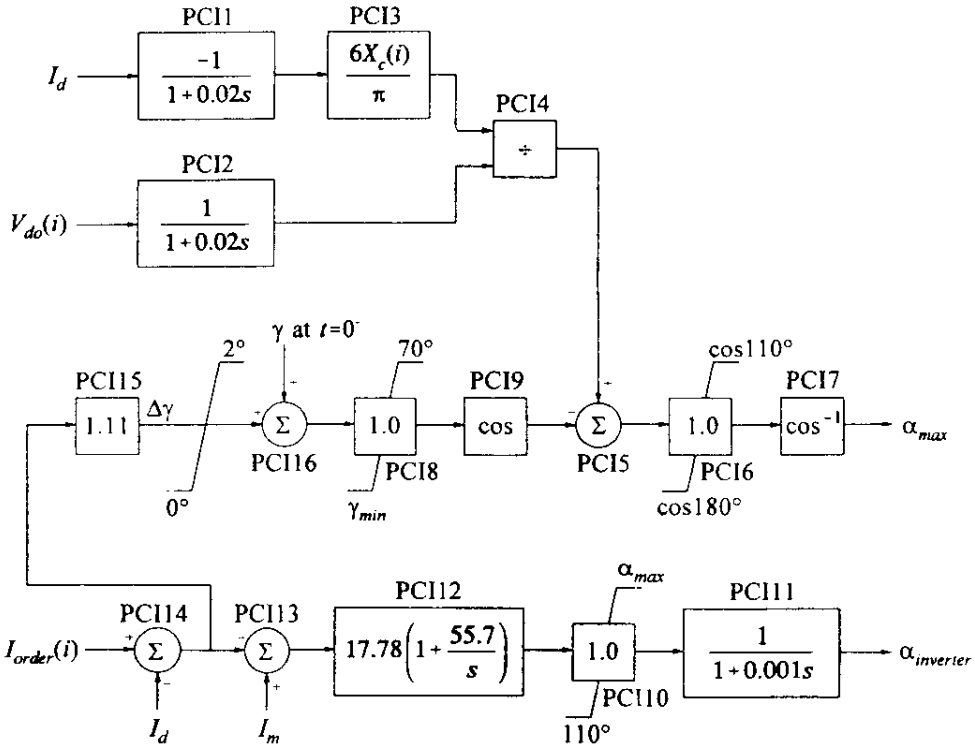
کنترل، تضمین می‌کند که $\cos\alpha$ متناظر با وضعیت γی ثابت است (فصل ۱۰، بخش ۱۰ ـ ۹ ـ ۳ را ببینید).

همچنین اینورتور به یک کنترل‌کننده جریان مجهز است که فقط هنگامی فعال می‌شود که زاویهٔ روشن شدن حاصل از کنترل جریان، کوچکتر از زاویهٔ روشن شدن حاصل از کنترل‌کننده **CEA** باشد. هرگاه یکسوساز به α_{min} برسد و قادر به حفظ جریان مستقیم مطلوب نباشد، اینورتور به مُد کنترل جریان تغییر وضعیت می‌کند.

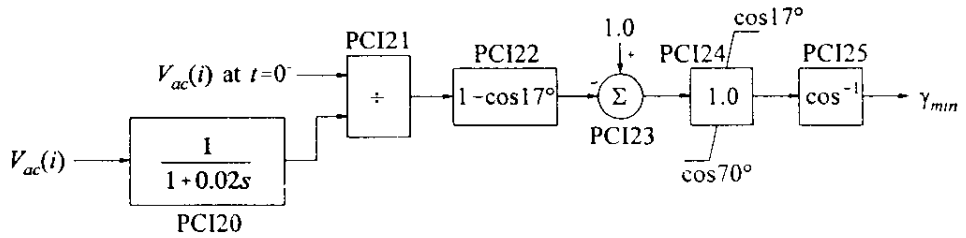
حد پایینی زاویهٔ خاموش شدن (γ_{min}) با ولتاژ شین جریان متناوب اینورتور تغییر داده می‌شود تا یک ناحیهٔ حداقل را برای حاشیهٔ کموتاسیون حفظ کند. شکل ۱۷ ـ ۲۸ منطقی را برای محاسبهٔ γ_{min} نشان می‌دهد.

اگر ولتاژ شین جریان متناوب اینورتور کمتر از pu ۰/۵ باشد، فرض می‌شود که نقص کموتاسیون رخ داده است. یکسوساز و اینورتور در صورتی که اینورتور بیش از دو بار نقص کموتاسیون داشته باشد، بسته می‌شوند. به دنبال بروز نقص کموتاسیون، هنگامی که ولتاژ شین جریان متناوب بیش از pu ۰/۷ باشد، اینورتور بازیافت می‌شود.

عملکرد سیستم بدون کنترل تکمیلی. شکلهای ۱۷ ـ ۲۹ و ۱۷ ـ ۳۰ پاسخ سیستم به خطای سه فاز را نزدیک شین ۹ و بر روی یکی از مدارهای بین شینهای ۸ و ۹ نشان می‌دهند. خطا در ۸۳ میلی‌ثانیه با جداسازی مدار خطادار، برطرف می‌شود. از نتایج مشاهده می‌کنیم که سیستم

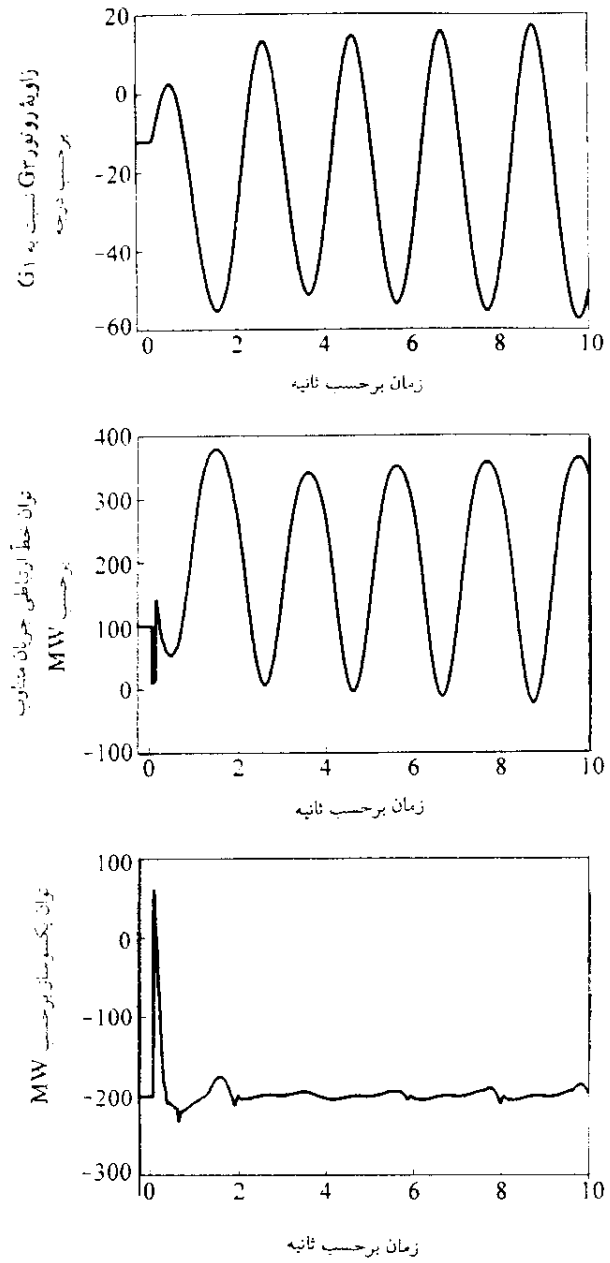


شکل ۱۷ ـ ۲۷ کنترل قطبی اینورتور

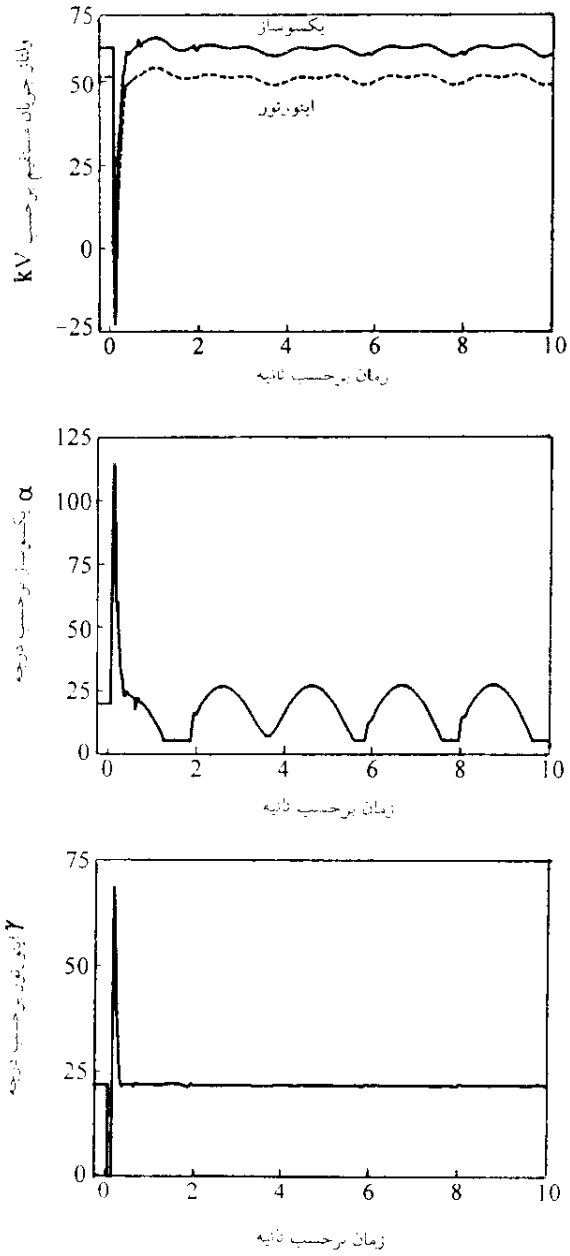


شکل ۱۷ ـ ۲۸ محاسبهٔ γ_{min}

پایدار گذراست. لیکن، نوسانهای بین ژنراتورهای ناحیهٔ ۱ و ۲ دارای میرایی صفر یا کمی منفی است.



شکل ۱۷ ـ ۲۹ پاسخ سیستم به یک خطای سیستم جریان متناوب نزدیک اینورتور، بدون کنترل تکمیلی



شکل ۱۷ ـ ۳۰ پاسخ خط HVDC به یک خطای سیستم جریان متناوب نزدیک اینورتور با کنترل تکمیلی

جدول ۱۷ ـ ۹ نتایج تحلیل پایداری سیگنال کوچک را جمعبندی می‌کند. فرکانس و نسبت میرایی مُد بین ناحیه‌ای برای وضعیتهای مختلف سیستم آورده شده است. مُد بین ناحیه‌ای در تمامی مواردِ در نظر گرفته شده، میرای ضعیف یا منفی است.

جدول ۱۷ ـ ۹ فرکانس و نسبت میرایی مُد بین ناحیه‌ای بدون کنترل تکمیلی

شمارهٔ مورد	انتقال MW از ناحیهٔ ۱ به ناحیهٔ ۲		مدارهای خارج از سرویس	مُد بین ناحیه‌ای	
	خط ارتباطی DC	خط ارتباطی AC		فرکانس (Hz)	ξ
(الف)۱	۲۰۰	۲۰۰	هیچکدام	۰/۵۷۵	۰/۰۰۷۶
(ب)۱	۲۰۰	۲۰۰	(۱cct) ۸ به ۹	۰/۴۹۵	−۰/۰۰۵۴
(ج)۱	۲۰۰	۲۰۰	(۱cct) ۷ به ۸ (۱cct) ۸ به ۹	۰/۴۴۰	−۰/۰۱۶۷
(الف)۲	۵۰	۳۵۲	هیچکدام	۰/۵۶۰	۰/۰۰۵۲
(ب)۲	۵۰	۳۵۲	(۱cct) ۸ به ۹	۰/۴۶۶	−۰/۰۱۱۰
(ج)۲	۵۰	۳۵۲	(۱cct) ۸ به ۷ (۱cct) ۹ به ۸	۰/۳۹۷	−۰/۰۲۵۴

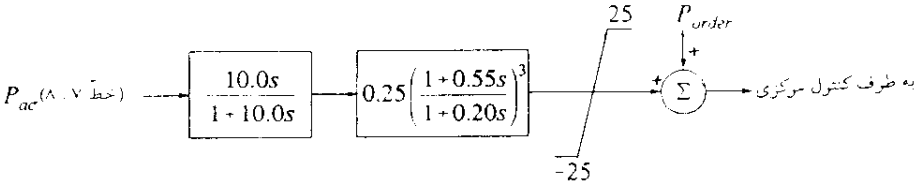
کنترل تکمیلی برای بهبود میرایی. روش کلی برای طراحی کنترل تکمیلی همانند روشی است که برای SVC با استفاده از جایابی قطب در بخش ۱۷ ـ ۲ ـ ۲ توضیح داده شده است.

براساس ملاحظات رؤیت‌پذیری، توان حقیقی از طریق خط بین شینهای ۷ و ۸ به عنوان سیگنال فیدبک انتخاب شده است. مکان اولیه برای جایابیِ مقادیر ویژهٔ مربوط به مُد بین ناحیه‌ای در ۳/۱ j ± ۰/۶۴ − انتخاب شده است. که متناظر با فرکانس ۰/۵ Hz و نسبت میرایی ۰/۲ است. دامنه و فاز تابع تبدیل حلقه ـ باز بین سیگنال فرمان توان کنترل مرکزیِ HVDC و توان انتقالی در خط بین شین‌های ۷ و ۸ در فرکانس مختلط ۳/۱ j ± ۰/۶۴ − s = ، برای حالتهای کاری مختلف در جدول ۱۷ ـ ۱۰ آورده شده است. نتایج، نشان می‌دهد که جبرانسازی لازم فاز بین °۸۵ و °۱۵۰ می‌باشد. جبرانسازی فاز به صورت مصالحهٔ °۱۰۰ انتخاب شده است. شکل ۱۷ ـ ۳۱، نمودار بلوکی کنترل تکمیلی را نشان می‌دهد.

ثابت‌زمانی پاکساز، ۱۰ ثانیه است. پارامترهای بلوک پیش‌فاز برای فراهم‌آوردن °۱۰۰، در فرکانس مختلط ۳/۱ j ± ۰/۶۴ − انتخاب شده‌اند. به منظور تضمین میرایی کافی برای کلیهٔ مودهای سیستم، بهره به مقدار ۰/۲۵ محدود شده است. از حدهای خروجی نسبتاً بزرگی (MW ۲۵ ±)

جدول ۱۷ ـ ۱۰ دامنه و فاز تابع تبدیل حلقه ـ باز در $s = -0/64 \pm j\,3/1$

شمارهٔ مورد	تابع تبدیل حلقه ـ باز
(الف)۱	$0/815 \angle -146/92^\circ$
(ج)۱	$0/773 \angle -86/84^\circ$
(الف)۲	$0/716 \angle -142/20^\circ$
(ج)۲	$0/237 \angle -112/90^\circ$



شکل ۱۷ ـ ۳۱ نمودار بلوکی کنترل تکمیلی

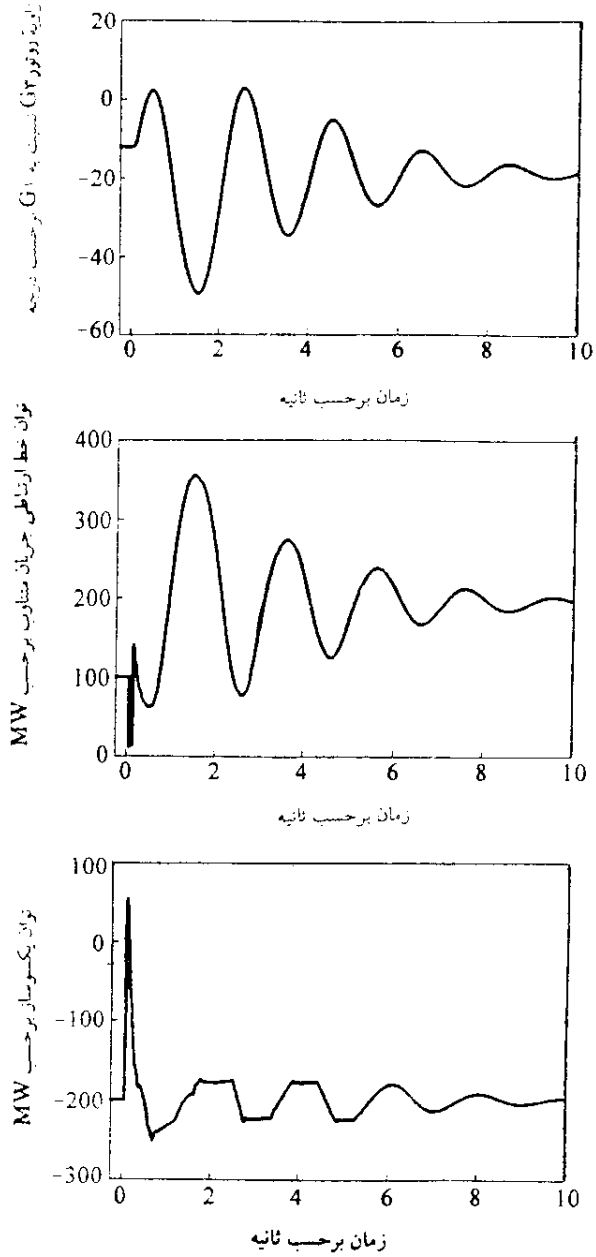
استفاده شده تا حین نوسانهای بزرگ، کنترل‌کننده‌های تکمیلی بتوانند نقش خود را بخوبی اجرا کنند.

فرکانس و نسبت میرایی مُد بین ناحیه‌ای با کنترل تکمیلی در جدول ۱۷ ـ ۱۱ برای وضعیتهای کاری مختلف در نظر گرفته شده در جدول ۱۷ ـ ۹، جمع‌آوری شده است. مُد بین ناحیه‌ای در تمامی موارد، با کنترل تکمیلی بخوبی میرا شده است.

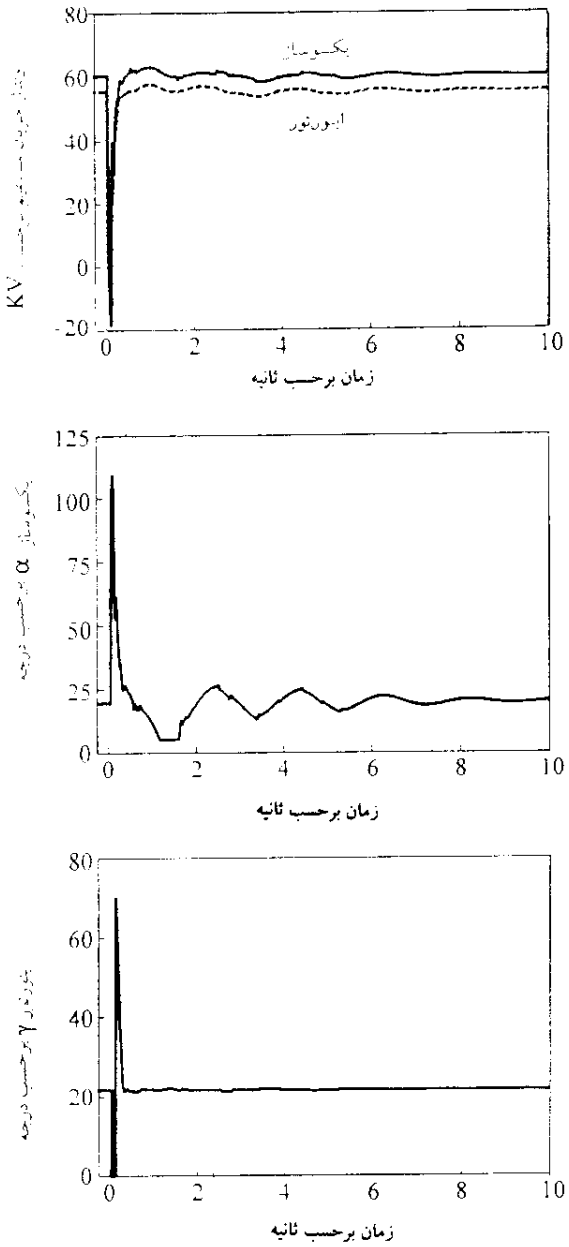
جدول ۱۷ ـ ۱۱

شمارهٔ مورد	مود بین ناحیه‌ای	
	فرکانس (Hz)	ζ
(الف)۱	۰/۶۰۷	۰/۱۷۳۰
(ب)۱	۰/۵۰۶	۰/۱۵۷۲
(ج)۱	۰/۴۶۷	۰/۲۵۱۲
(الف)۲	۰/۵۸۸	۰/۱۴۷۴
(ب)۲	۰/۴۷۵	۰/۱۰۰۷
(ج)۲	۰/۴۲۲	۰/۱۰۳۱

شکلهای ۱۷ ـ ۳۲ و ۱۷ ـ ۳۳ پاسخ گذرای سیستم با کنترل تکمیلی را برای یک خطای سه فاز نزدیک شین ۹ و بر روی مداری بین شینهای ۸ و ۹ نشان می‌دهند. و ملاحظه می‌شود که در این حالت، نوسانها بخوبی میرا شده‌اند.



شکل ۱۷ ـ ۳۲ پاسخ به خطای سیستم جریان متناوب نزدیک اینورتور با کنترل تکمیلی



شکل ۱۷ ـ ۳۳ پاسخ خط HVDC به خطای سیستم جریان متناوب نزدیک اینورتور با کنترل تکمیلی

منابع

[1] R.O. Berglund, W.A. Mittelstadt, M.L. Shelton, P. Barkan, C.G. Dewey, and K.M. Skreiner, "One-Cycle Fault Interruption at 500 kV: System Benefits and Breaker Design," *IEEE Trans.* Vol. PAS-93, pp. 1240-1251, September/October, 1974.

[2] J. Esztergalyos, M.T. Yee, M. Chamia, and S. Liberman, "The Development and Operation of an Ultra High Speed Relaying System for EHV Lines," CIGRE 34-04, 1978.

[3] C. Lindsay and V. Shenoy, "Reliability and Selection of Characteristics for EHV Transformers," CIGRE 12-08, 1978.

[4] G.D. Breuer, H.M. Rustebakke, R.A. Gibley, and H.O. Simmons, "The Use of Series Capacitors to Obtain Maximum EHV Transmission Capability," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-83, pp. 1090-1101, November 1964.

[5] E.W. Kimbark, "Improvement of System Stability by Switched Series Capacitors," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-85, pp. 180-188, February 1966.

[6] IEEE Task Force Report, "A Description of Discrete Supplementary Controls for Stability," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-97, pp. 149-165, January/February 1978.

[7] H.M. Ellis, J.E. Hardy, A.L. Blythe, and J.W. Skooglund, "Dynamic Stability of the Peace River Transmission System," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-85, pp. 586-600, June 1966.

[8] M.L. Shelton, R.F. Winkleman, W.A. Mittelstadt, and W.L. Bellerby, "Bonneville Power Administration 1400 MW Braking Resistor," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-94, pp. 602-611, March/April 1975.

[9] CIGRE SC38-WG02 Report, "State of the Art in Non-Classical Means to Improve Power System Stability," *Electra*, No. 118, pp. 88-113, May 1988.

[10] EPRI Report EL-5859, "Technical Limits to Transmission System Operation," Final Report of Project 5005-2, prepared by Power Technologies Inc., June 1988.

[11] IEEE Working Group, "Single Pole Switching for Stability and Reliability," Report of a panel discussion held at the 1984 PES Summer Meeting, *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-1, No. 2, pp. 25-36, May 1986.

[12] R.D. Dunlop, R.M. Maliszewski, and B.M. Pasternack, "Application of Single Phase Switching on the AEP 765-kV System," *Proceedings of the American Power Conference*, Vol. 42, pp. 461-462, 1980.

[13] A.J. Fakheri et al., "The Use of Reactor Switches in Single Phase Switching," CIGRE 13-06, 1980.

[14] N. Knudsen, "Single-Phase Switching of Transmission Lines Using Reactors for Extinction of the Secondary Arc," CIGRE 310, 1962.

[15] E.W. Kimbark, "Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole Switched Lines by Shunt Reactors," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-83, pp. 285-290, March 1964.

[16] R.M. Hasibar, A.C. Legate, J.H. Brunke, and W.G. Peterson, "The Application of High-Speed Grounding Switches for Single-Pole Reclosing on 500-kV Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 1512-1515, April 1981.

[17] A.J. Gonzales, G.C. Kung, C. Raczkowski, C.W. Taylor, and D. Thonn, "Effects of Single-and-Three Pole Switching and High-Speed Reclosing on Turbine-Generator Shafts and Blades," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-103, pp. 3218-3228, November 1984.

[18] ANSI Standard C50.13-1989.

[19] R.C. Buell, R.J. Caughey, E.M. Hunter, and V.M. Marquis, "Governor Performance during System Disturbances," *AIEE Trans.*, Vol. 50, pp. 354-369, March 1931.

[20] F.P. deMello, D.N. Ewart, M. Temoshok, and M.A. Eggenberger, "Turbine Energy Controls Aid in Power System Performance," *Proceedings of the American Power Conference*, Vol. 28, pp. 438-445, 1966.

[21] R.H. Park, "Improved Reliability of Bulk Power Supply by Fast Load Control," *Proceedings of the American Power Conference*, Vol. 30, pp. 1128-1141, 1968.

[22] R.H. Park, "Fast Turbine Valving," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-92, pp. 1065-1073, May/June 1973.

[23] E.W. Cushing, G.E. Drechsler, W.P. Killgoar, H.G. Marshall and H.R. Stewart, "Fast Valving as an Aid to Power System Transient Stability and Prompt Resynchronization and Rapid Reload after Full Load Rejection," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-91, pp. 1624-1636, July/August 1972.

[24] H.F. Martin, D.N. Tapper and T.M. Alston, "Sustained Fast Valving Applied to TVA's Watts Bar Nuclear Units," Paper 76-JPGC-PWR-5, presented at the 1976 Joint Power Generation Conference, Buffalo, N.Y., September 1976, *ASME Trans.*, Series A, Vol. 99, No. 1, 1977.

[25] P.L. McGaha and T.L. Dresner, "A Nuclear Steam Turbine Intercept Valve and Control System for Fast Valving," Paper presented at the 1977 Joint Power Generation Conference, Long Beach, Calif., September 1977.

[26] L. Edwards, R.J. Thomas, D.C. Hogue, P. Hughes, W. Novak, G. Weiss and J.E. Welsh, "Sustained Fast Valving at TVA's Cumberland Steam Plant: Background and Test Results," *Proceeding of the American Power Conference*, Vol. 43, pp. 142-152, April 1981.

[27] IEEE Working Group Report of panel discussion, "Turbine Fast Valving to Aid System Stability: Benefits and Other Considerations," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-1, pp. 143-153, February 1986.

[28] W.A. Morgan, H.B. Peck, D.R. Holland, F.A. Cullen, and J.B. Ruzek, "Modern Stability Aids for Calvert Cliffs Units," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-90, pp. 1-10, January/February 1971.

[29] P. Kundur and J.P. Bayne, "A Study of Early Valve Actuation Using Detailed Prime Mover and Power System Simulation," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-94, pp. 1275-1287, July/August 1975.

[30] D.L. Osborn, "Fast Valving and Neutral Resistor Application on a 600 MW Fossil Unit," Paper A76608-0, presented at the 1976 Joint Power Generation Conference, Buffalo, N.Y., September 1976.

[31] N.J. Balu, "Fast Turbine Valving and Independent Pole Tripping Breaker Applications for Plant Stability," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, pp. 1330-1342, July/August 1980.

[32] R.M. Maliszewski, B.M. Pasternack, and R.D. Rana, "Temporary Fast Turbine Valving on the AEP System," *Proceedings of the American Power Conference*, Vol. 44, pp. 118-125, 1982.

[33] T.D. Younkins, J.H. Chow, A.S. Brower, J. Kure-Jensen, and J.B. Wagner, "Fast Valving with Reheat and Straight Condensing Steam Turbines," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-2, pp. 397-405, May 1987.

[34] P. Kundur, R.E. Beaulieu, C. Munro, and P.A. Starbuck, "Steam Turbine Fast Valving: Benefits and Technical Considerations," ST267 position paper,

presented at the Canadian Electrical Association, spring meeting, March 1986.

[35] R.H. Hillery and E.D. Holdup, "Load Rejection Testing of Large Thermal Electric Generating Units," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-87, pp. 1440-1453, June 1968.

[36] V.F. Carvalho, "Use of Generator and Customer Load Rejection to increase Power Transfer Limits," CIGRE Paper 32-79-00-56, presented at the Study Committee 32 Meeting, Minneapolis, Minn., 1979.

[37] P. Kundur and W.G.T. Hogg, "Use of Generation Rejection in Ontario Hydro to Increase Power Transfer Capability," Paper presented at panel session on generator tripping, IEEE PES winter meeting, New York, January/February 1982.

[38] R.G. Farmer, "Independent Detection Scheme to Initiate Western System Islanding for Pacific AC Intertie Outages," Paper presented at the panel session on controlled separation and load shedding, IEEE PES summer meeting, July 1985.

[39] C.W. Taylor, F.R. Nassief, and R.L. Cresap, "Northwest Power Pool Transient Stability and Load Shedding Controls for Generation-Load Imbalances," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 3486-3495, July 1981.

[40] D.C. Lee and P. Kundur, "Advanced Excitation Control for Power System Stability Enhancement," CIGRE 38-01, 1986.

[41] C.W. Taylor, J.R. Mechenbier, and C.E. Matthews, "Transient Excitation Boosting at Grand Coulee Third Power Plant: Power System Application and Field Test," Paper 92 SM 533-0 PWRS, presented at the IEEE PES summer meeting, Seattle, July 12-16, 1992.

[42] IEEE Committee Report, "Dynamic Performance Characteristics of North American HVDC Systems for Transient and Dynamic Stability Evaluations," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 3356-3364, July 1981.

[43] IEEE Committee Report, "HVDC Controls for System Dynamic Performance," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-6, No. 2, pp. 743-752, May 1991.

[44] C.E. Grund, G.D. Breuer, and R.P. Peterson, "AC/DC System Dynamic Performance - Transient Stability Augmentation with Dynamic Reactive Power Compensation," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, pp. 1493-1502, July/August 1980.

[45] P.L. Dandeno, A.N. Karas, K.R. McClymont, and W. Watson, "Effect of High-

Speed Rectifier Excitation Systems on Generator Stability Limits," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-87, pp. 190-201, January 1968.

[46] W. Watson and G. Manchur, "Experience with Supplementary Damping Signals for Generator Static Excitation Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-92, pp. 199-203, January/February 1973.

[47] W. Watson and M.E. Coultes, "Static Exciter Stabilizing Signals on Large Generators - Mechanical Problems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-92, pp. 204-211, January/February 1973.

[48] P. Kundur, D.C. Lee, and H.M. Zein El-Din, "Power System Stabilizers for Thermal Units: Analytical Techniques and On-Site Validation," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 81-95, January 1981.

[49] F.P. deMello, L.N. Hannett, and J.M. Undrill, "Practical Approaches to Supplementary Stabilizing from Accelerating Power," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-97, pp.1515-1522, September/October 1978.

[50] D.C. Lee, R.E. Beaulieu, and J.R.R. Service, "A Power System Stabilizer Using Speed and Electrical Power Inputs - Design and Field Experience," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 4151-4167, September 1981.

[51] E.V. Larsen and D.A. Swan, "Applying Power System Stabilizers, Parts I, II, and III," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 3017-3046, June 1981.

[52] F.P. deMello, J.S. Czuba, P.A. Ruche, and J. Willis, "Developments in Application of Stabilizing Measures through Excitation Control," CIGRE Paper 38-05, 1986.

[53] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers, and M.S. Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, pp. 614-626, May 1989.

[54] M. Klein, G.J. Rogers, S. Moorty, and P. Kundur, "Analytical Investigation of Factors Influencing Power System Stabilizer Performance," *IEEE Trans.*, Vol. EC-7, pp. 382-388, September 1992.

[55] Canadian Electrical Association Report, "Investigation of Low Frequency Inter-Area Oscillation Problems in Large Interconnected Power Systems," Report of Project 294 T 622, prepared by Ontario Hydro, 1993.

[56] E.V. Larsen and J.H. Chow, "SVC Control Design for System Dynamic Performance," IEEE Special Symposium on Application of SVS for System

Dynamic Performance, Publication 87TH0187-5-PWR, 1987.

[57] N. Martins and L.T.G. Lima, "Determination of Suitable Locations of PSS and SVC for Damping Electromechanical Oscillations in Large Power System," *Proceedings of the 1989 Power Industry Computer Application Conference*, pp. 74-82, May 1989.

واژه‌نامه

A

Absolute	مطلق
Actual Frequency	فرکانس واقعی
Adams - Bushforth	آدامز ـ باشفورث
Alternator	آلترناتور
Amplitude modulation	مدولاسیون‌دامنه
Anti - phase modes	مدهای خلاف فاز
Argument	آرگومان
Arithmetic mean	میانگین حسابی
Arnoldi methods	روشهای آرنولدی
A - Stable	پایدار ـ A
Asymptotically stable	پایدار مجانبی
Autonomous	خودگردان

B

Backswing	نوسان به عقب
Back - up protection	حفاظت پشتیبان
Blow - up	ترکیدن
Breaking torque	گشتاور ترمزکننده
Bus participation factor	ضریب مشارکت شین

C

Centre of inertia	مرکز لختی
Characteristic equation	معادله مشخصه
Circuit breaker	کلید زن
Communication medium	واسطهٔ مخابراتی
Complementary	مکمل
Complex frequency	فرکانس مختلط
Component	مؤلفه
Comulative process	فرایند تجمعی
Contingency	پیشامد
Continuation parameter	پارامتر تداومی
Continuum model	مدل پیوستار
Coordination	هماهنگی
Copper loss	تلفات مسی
Correcter step	مرحلهٔ تصحیح کننده

Critical بحرانی
Cross - coupling تزویج متقابل
Cross term عبارت تقاطعی
Crowbar اهرم

D

Damped frequency فرکانس میراکننده
Damping ratio نسبت میرایی
Decoupled غیرتزویجی
Delayed reclosing بازبست تأخیردار
Directional جهت‌دار
Distance relaying رلهٔ دیستانس
Double flow دو جریانه
Drift رانش

E

Early - valving باز و بست زود شیر
Eigenproperties خواص ویژه
Eigenvalues مقادیر ویژه
Elastic strain کشش الاستیک
Electrical centre مرکز الکتریکی
Electrical island پارهٔ الکتریکی
Electromagnetic transients program (EMTP)
برنامهٔ گذراهای الکترومغناطیسی
Equilibrium point نقطه تعادل
Euler method روش اویلر
Excitation تحریک
Exit point نقطهٔ خروج
Explicit صریح

F

Fast - acting عمل کننده سریع
Fast - valving باز و بست سریع شیر
Fatigue فرسودگی
Fault خطا
Fault clearing رفع خطا
Fiber optics فیبر نوری
Field shorting اتصال کوتاه کنندهٔ تحریک
Finite stability پایداری محدود
Firing system سیستم آتش
Fortescue فورتسکیو
Frequency sensitive power contoller
کنترل کنندهٔ توان اضافی حساس به فرکانس
Full load بار کامل

G

Gear type نوع چرخدنده‌ای
Generalized phasor فازور تعمیم یافته
Generation deficient کمبود تولید
Globally stable پایدار جامع

H

Hamming method روش همینگ
High - cycle fatigue limit
حد خستگی سیکل بالا
House load بار خانگی
Hunting کشاکش

Hypersurface فوق سطح
Hysteresis پسماند

I

Implicit ضمنی
Impedance امپدانس
Incremental saturation اشباع نموّی
Inductive القایی
Infinite bus شین بینهایت
Inphase modes مدهای همفاز
Instantaneous overcurrent relay
رلهٔ اضافه جریان لحظه‌ای
Insulator flashover جرقه‌زنی عایق
Interarea mode oscillation
نوسان مد بین ناحیه‌ای
Intercept valve شیر میان‌راهی
Interface واسط
Intermachine بین ماشینی
Interplant بین واحدی
Interpolation درونیابی

L

Left eigenvector بردار ویژه چپ
Line outage وقفه خط
Lightning صاعقه
Load بار
Load rejection باربرداری جزئی
Locally stable پایدار محلی
Locus مکان
Loss of excitation relay رله بی‌تحریکی
Loss of synchronism
از دست رفتن سنکرونیزم
Lumped - Mass model مدل فشردهٔ جرم

M

Manifold خمینه
Matching تطابق
Mason میسن
Metallic wires سیم‌های فلزی
Mho relay رلهٔ مهو
Micro processes ریز فرایندها
Microwave مایکروویو
Milne میلن
Mode controllability کنترل‌پذیری مُد
Mode observability رؤیت‌پذیری مُد
Mode shape شکل مُد
Modified Euler method
روش اصلاح شدهٔ اویلر
Momentary Fast - valving
باز و بست سریع آنی شیر
Montonically unstable
به طور یکنوا ناپایدار
Multi - area چندناحیه‌ای
Multi - shot چند تیر

N

Negative sequence توالی منفی
Net participation مشارکت خالص

Phase - lead پیش فاز
Phase variables متغیرهای فاز
Pilot relaying رلهٔ پیلوت
Pilot wire relaying رلهٔ سیمی پیلوت
Plastic strain کشش پلاستیک
Polarity reversal تغییر پلاریته
Pole قطب
Positive sequence توالی مثبت
Potential energy surface
سطح انرژی پتانسیل
Potential energy boundary surface
سطح مرزی انرژی پتانسیل
Power system stabilizer
پایدارساز سیستم قدرت
Predictor step مرحلهٔ پیشگو
Primary protection حفاظت اولیه
Priming پریمینگ
Propogation of error انتشار خطا
Protective relay رلهٔ حفاظتی
Protective zone ناحیهٔ حفاظتی
Pulsating torques گشتاورهای تپشی

R

Radial distribution system
سیستم توزیع شعاعی
Reclose بازبست
Recovery voltage ولتاژ بازیافت
Relevant وابسته
Reliability قابلیّت اعتماد

Node گره
Non - wind up limits حدود روی بلوک
Normalize نرمالیزه کردن
Normally cleared fault
خطای معمولی رفع شده
Notch شیار
Numerical stability پایداری عددی

O

Off - nominal غیراسمی
Offset افست
Ontario Hydro اونتاریوهایدرو
Orthogonal متعامد
Overcurrent relaying رلهٔ اضافه جریان
Overexcitation limiter
محدودکنندهٔ فوق تحریک
Overspeed اضافه سرعت

P

Participation matrix ماتریس مشارکت
Partitioned تفکیک شده
Path - following دنبال کنندهٔ مسیر
Permissive overreaching
اضافه پوشانی اجازه دهنده
Phase - comparison relaylling
رلهٔ مقایسه فاز
Phase - fault protection
حفاظت خطای فاز
Phase - lag پس‌فاز

Remote backup پشتیبان راه دور
Remote telemetered signal سیگنال دورسنجی شده
Reorientation بازجهت‌یابی
Residental خانگی
Residue مانده
Restoration بازیابی
Relay رله
Richardson's formula فرمول ریچاردسون
Right eigenvector بردار ویژه راست
Round - off errors خطای گرد کردن

S

Scanning مرور
Secondary arc قوس ثانویه
Selective modal analysis تحلیل مُدال انتخابی
Selective reclosing بازبست انتخابی
Selectivity حُسن انتخاب
Sequential relcosing بازبست ترتیبی
Sequence network شبکهٔ توالی
Shift point نقطه شیفت
Shunt - compensated جبران شدهٔ موازی
Similar همانند
Simultaneous iterations تکرارهای همزمان
Single - shot تک‌تیر
Sing pc' نقطه منفرد (ویژه)

Slot شکاف
Solenoid dump تخلیه سلونوییدی
Sparsity پراکندگی
Spike جهش
State matrix ماتریس حالت
State space فضای حالت
State trajectory مسیر حالت
State variables متغیرهای حالت
State vector بردار حالت
Steady increase افزایش ماندگار
Steam flashing فلاش بخار
Stiffness سختی
Stiff system سیستم سخت
Straisht - distance relaying رلهٔ دیستانس مستقیم
Strong transmission system سیستم انتقال قوی
Stuck breaker fault خطای کلید معیوب
Subsynchronous damping control کنترل میرایی زیر سنکرون
Subsynchronous resonance تشدید زیر سنکرون
Subtransmission System سیستم زیر انتقال
Supersynchronous فوق سنکرون
Supplementary Control کنترل تکمیلی
Sustained fast - valving باز و بست سریع مداوم شیر
Sustained fault خطای مداوم

Synchrocheck سینکروچک

T

Tandem compound reheat
باز حرارتی ترکیبی پشت سر هم

Taylor series سری تیلور

Thermal plant نیروگاه حرارتی

Time overcurrent relaying
رله اضافه جریان زمانی

Timer زمان‌بند

Torsional mode oscillation
نوسان مد پیچشی

Total saturation اشباع کلی

Transient energy margin
حاشیهٔ انرژی گذرا

Transient stability پایداری گذرا

Trapezoidal rule قاعده ذوزنقه‌ای

Triggering راه‌اندازی

Trip جدا کردن

U

Uncontrollable کنترل ناپذیر

Uncouple بدون تزویج

Unit interaction factor
ضریب تداخل واحد

Unit rejection واحد برداری

Unobservable رؤیت ناپذیر

Upper Hessenberg matrix
ماتریس هِسِنبرگ فوقانی

Valve control sequence
ترتیب کنترل شیر

Varistor وریستور

Voltage avalanche شکست بهمنی ولتاژ

W

Washout پاکساز

Water induction القای آب

Weak transmission system
سیستم انتقال ضعیف

Winding stresses تنشهای سیم‌پیچی

Wind up limits حدود خارج از بلوک

Z

Zero صفر

Zero sequence توالی صفر

واژه‌نما

آ

آشفتگیهای شدید، ۱۲۹۵، ۱۲۹۷، ۱۳۰۰، ۱۳۰۱، ۱۳۰۲، ۱۳۰۹، ۱۳۱۱
- مطالعات موردی، ۱۳۱۱
- پاسخ نیروگاههای حرارتی، ۱۲۹۴
- پاسخ نیروگاههای آبی، ۱۲۹۶
- ماهیت پاسخ سیستم، ۹۱۲، ۱۲۹۵

ا

اشباع، ۹۲۹، ۹۳۱، ۹۳۴، ۹۳۶، ۹۳۹، ۹۴۰، ۹۴۲، ۹۴۳، ۹۴۶، ۹۴۷، ۹۴۸، ۹۶۶، ۱۰۴۸، ۱۰۵۰، ۱۰۶۲، ۱۳۰۰
اشباع کلی، ۹۳۴، ۹۳۵، ۹۴۸
- اشباع نموی، ۹۳۴، ۹۳۵، ۹۳۶، ۹۴۸
اغتشاشهای کلیدزنی شبکه (اثر بر محورهای توربین)، ۱۲۷۵
امپدانس توالی صفر، ۱۰۷۵، ۱۰۸۱، ۱۰۸۴
امپدانس توالی مثبت، ۱۰۷۵، ۱۰۸۴
امپدانس توالی منفی، ۱۰۷۵، ۱۰۷۶
امپدانسهای توالی، ۱۰۷۴، ۱۰۷۵، ۱۰۸۳، ۱۰۸۴، ۱۰۹۴، ۱۱۰۲
انتگرال‌گیری عددی (روشهای صریح)، ۱۰۳۰، ۱۰۳۱، ۱۰۳۲، ۱۰۳۹، ۱۰۴۰، ۱۰۴۱، ۱۰۴۲، ۱۱۴۱، ۱۱۸۹، ۱۳۱۰
- روش اویلر، ۱۰۳۱، ۱۰۳۲
- روش اویلر اصلاح شده، ۱۰۳۳
- روشهای رانگ ـ کوتا، ۱۰۳۴
انتگرال‌گیری عددی (روشهای ضمنی)، ۱۰۳۷

ب

باربرداری جزئی، ۱۲۹۸، ۱۳۰۲، ۱۳۰۳، ۱۳۰۴

بارزدایی کمبود فرکانس، ۱۲۳۵، ۱۳۱۰، ۱۳۱۶، ۱۳۱۸، ۱۳۲۱
بارزدایی کمبود ولتاژ، ۱۱۸۸، ۱۲۳۵
بازبست، ۱۱۲۵، ۱۱۲۶، ۱۲۸۲، ۱۲۸۴، ۱۲۸۵، ۱۲۸۶، ۱۳۳۶، ۱۳۳۷، ۱۳۴۵
بازبست انتخابی، ۱۲۸۶
بازبست تاخیردار، ۱۲۸۵، ۱۲۸۶
بازبست ترتیبی، ۱۱۸۶
بازبست خودکار خط، ۱۱۲۵، ۱۲۸۵
بازدارندهٔ دینامیکی، ۱۳۳۲، ۱۳۳۳
باز و بست، ۱۳۳۴، ۱۳۳۹، ۱۳۴۰، ۱۳۴۲، ۱۳۴۳، ۱۳۴۵، ۱۳۴۶، ۱۳۴۷
ـ باز و بست زود شیر، ۱۳۳۸
ـ باز و بست سریع شیر، ۱۱۴۵، ۱۳۳۸، ۱۳۴۰، ۱۳۴۱، ۱۳۴۲، ۱۳۴۳، ۱۳۴۴، ۱۳۴۵، ۱۳۴۷، ۱۳۵۶، ۱۳۵۸، ۱۳۶۱
ـ باز و بست آنی شیر، ۱۳۲۹
ـ باز و بست مداوم شیر، ۱۳۳۰
بازیابی سیستم، ۱۲۹۱
بردار حالت، ۸۸۶، ۸۸۸، ۸۸۹، ۸۹۱، ۸۹۷، ۸۹۸، ۹۰۸، ۹۱۴، ۹۸۶، ۱۰۳۱، ۱۰۵۷، ۱۰۶۲، ۱۱۸۹، ۱۲۲۱
بردارهای ویژه (چپ و راست)، ۸۹۵
ـ محاسبه بردارهای ویژه، ۱۰۰۴
برنامه گذراهای الکترومغناطیسی، ۱۰۵۵، ۱۲۷۴
بلوکه کردن عدم همگامی، ۱۱۲۵
بهرهٔ تحریک کننده، ۹۸۰، ۱۳۶۴

پ

پارامتر تداومی، ۱۲۲۹، ۱۲۳۰، ۱۲۳۱
پاره کم تولید، ۱۲۹۰، ۱۳۰۸
پارهٔ الکتریکی، ۱۲۹۶
پارهٔ پر تولید، ۱۳۱۲
پاکساز، ۱۲۶۰، ۱۳۵۵، ۱۳۶۶، ۱۳۸۲، ۱۳۹۲
پایدارساز سیستم قدرت، ۹۵۷، ۱۰۱۵، ۱۰۵۲، ۱۲۵۷، ۱۳۲۴، ۱۳۵۲، ۱۳۵۳
ـ ماتریس حالت سیستم با پایدارساز سیستم قدرت، ۹۶۱
ـ پایدارساز دلتا ـ امگا، ۱۲۶۰، ۱۲۶۱، ۱۳۶۲، ۱۲۶۳، ۱۳۶۳، ۱۳۶۶
ـ پایدارساز دلتا ـ P ـ امگا، ۱۳۵۰
ـ پایدارساز مبتنی بر فرکانس، ۱۳۶۲، ۱۳۶۳
ـ بهره پایدارساز، ۹۸۰، ۹۸۳، ۱۲۶۱، ۱۲۶۳، ۱۳۶۰، ۱۳۶۶، ۱۳۷۱
ـ حدود پایدارساز، ۱۳۵۶
ـ انتخاب موقعیت، ۱۳۶۲
پایداری بلند مدت، ۱۲۹۵، ۱۳۰۰، ۱۳۰۱، ۱۳۰۲، ۱۳۰۹، ۱۳۱۰، ۱۳۶۷
پایداری جامع، ۸۸۹
پایداری سیگنال کوچک، ۹۰۷، ۹۱۵، ۹۱۶، ۹۱۷

- سیستم‌های چند ماشینه، ۹۸۳
- سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت، ۹۱۶
پایداری گذرا، ۱۰۲۱، ۱۰۳۰، ۱۱۳۸، ۱۱۴۶، ۱۱۵۳، ۱۳۲۰
پایداری محدود، ۸۸۹، ۱۱۸۶
پایداری محلی، ۸۸۸، ۸۸۹، ۹۰۰، ۹۸۷
پایداری میان مدت، ۱۲۹۵، ۱۳۰۰، ۱۳۰۱
پایداری ولتاژ، ۱۱۶۱، ۱۱۶۲، ۱۱۷۳، ۱۱۸۰، ۱۱۸۲، ۱۱۹۵
پراکندگی، ۹۸۷، ۹۹۱، ۹۹۷، ۹۹۸، ۱۰۰۳، ۱۰۵۹، ۱۲۱۶، ۱۳۰۱
پریمینگ، ۱۳۱۶

ت

تبدیل چارچوب مرجع، ۹۸۵، ۱۰۴۹
تجهیزات جنبی نیروگاه (اثر پارگی بر آنها)، ۱۲۹۹
تحلیل پایداری ولتاژ، ۱۱۶۸، ۱۱۷۳، ۱۱۷۴، ۱۱۸۶، ۱۱۸۷، ۱۱۸۸، ۱۲۰۲، ۱۲۱۹، ۱۲۳۲
- تحلیل دینامیکی، ۱۱۸۷، ۱۱۸۸، ۱۱۹۰، ۱۳۰۲، ۱۳۰۹
- الگوریتم IILSI، ۱۲۱۵، ۱۲۱۶
- الگوریتم LOPSI، ۱۲۱۳، ۱۲۱۵، ۱۲۱۶
- ملاحظات مدلسازی، ۱۰۲۱، ۱۱۸۷، ۱۲۹۵، ۱۳۰۱، ۱۳۰۹
- تحلیل مُدال Q - V، ۱۲۰۴
- تحلیل استاتیکی، ۱۱۸۷، ۱۲۰۱
- تقریب حالت گذرا
- تحلیل حساسیت Q - V
تحلیل پخش بار تداومی، ۱۲۲۶، ۱۲۲۸، ۱۲۳۰، ۱۲۳۱، ۱۲۳۲
تحلیل مُدال انتخابی، ۹۹۱
تداخل پیچشی، ۱۲۴۱، ۱۲۵۷، ۱۲۶۸، ۱۲۶۹، ۱۲۷۰، ۱۲۷۳، ۱۲۷۴، ۱۲۸۶، ۱۲۸۹
ترتیب کنترل شیر، ۱۳۴۱
تزویج متقابل، ۸۹۷
تشدید زیر سنکرون، ۱۲۴۱، ۱۲۷۰، ۱۲۷۳، ۱۳۳۱
تکرارهای همزمانی، ۹۹۱
تلفات مسی روتور، ۱۰۸۰

ث

ثابت لختی، ۹۲۰، ۹۲۱، ۱۰۲۴، ۱۲۴۳، ۱۲۴۸، ۱۳۶۲
ثابتهای K، ۹۳۸، ۹۴۰، ۹۴۷، ۹۷۹

ج

جایابی قطب، ۱۳۶۸، ۱۳۷۹، ۱۳۸۱، ۱۳۹۲
جبرانساز استاتیکی توان راکتیو، ۱۳۵۹

جبرانسازی پیش فاز، ۱۳۶۶، ۱۳۷۱
جبرانسازی راکتیو (تاثیر بر پایداری ولتاژ)، ۱۱۶۸، ۱۱۷۴، ۱۱۷۹، ۱۱۸۰، ۱۱۸۶

ح

حاشیهٔ انرژی گذرا، ۱۱۴۹
حالتهای عمل سیستم قدرت، ۱۲۹۶
- حالت اضطراری، ۱۲۸۹، ۱۲۹۹
- حالت بازیابی، ۱۲۸۹
- حالت عادی، ۱۱۷۴، ۱۲۹۷
- حالت فوق بحرانی، ۱۲۹۵، ۱۲۹۷، ۱۲۹۸
حد خستگی سیکل بالا، ۱۲۸۲، ۱۲۸۴
حرکت آزاد سیستم دینامیکی، ۸۹۶
حفاظت خط انتقال، ۱۱۰۳، ۱۱۲۹
- رلهٔ دیستانس، ۱۱۰۳، ۱۱۰۴، ۱۱۰۵، ۱۱۰۶، ۱۱۱۹، ۱۱۲۱، ۱۱۳۰
- طرحهای رله‌ای پیلوت، ۱۱۰۷
- طرح اضافه پوشانی اجازه دهنده، ۱۱۰۸
- طرح مقایسه جهتدار، ۱۱۱۰
حفاظت فقدان تحریک، ۱۱۳۱، ۱۱۳۲

خ

خارج کردن ژنراتور، ۱۱۲۷، ۱۳۴۰، ۱۳۴۱، ۱۳۴۷، ۱۳۴۹، ۱۳۵۶، ۱۳۵۸
خازنهای سری، ۱۱۷۹، ۱۲۸۰، ۱۳۳۱
خستگی، ۱۲۴۱، ۱۲۷۳، ۱۲۸۱، ۱۲۸۲، ۱۲۸۳، ۱۲۸۴، ۱۲۸۶، ۱۳۳۳، ۱۳۳۴، ۱۳۳۷، ۱۳۵۰
خطاهای نامتعادل، ۱۰۵۵، ۱۰۷۰، ۱۰۷۴، ۱۰۷۵، ۱۰۹۱، ۱۲۷۰، ۱۳۳۳
خطای اتصال کوتاه، ۱۰۲۷
خطای مداوم، ۱۱۵۶، ۱۱۵۷
خطوط انتقال HVDC (کنترل)، ۹۸۵، ۹۸۷، ۱۳۵۸، ۱۳۸۵
خطی‌سازی سیستم‌های غیر خطی، ۸۸۹
خواص ویژه ماتریس حالت، ۸۹۴

ر

راکتانس توالی صفر، ۱۰۸۱، ۱۰۸۳
- اضافه جریان، ۱۱۰۳، ۱۱۰۴، ۱۱۲۹، ۱۱۸۸، ۱۳۳۰
- دیستانس، ۱۱۰۳، ۱۱۰۴، ۱۱۰۵، ۱۱۰۶، ۱۱۰۷، ۱۱۰۸، ۱۱۱۹، ۱۱۲۱
- پیلوت، ۱۱۰۳، ۱۱۰۴، ۱۱۰۷، ۱۱۰۸، ۱۱۱۰، ۱۱۲۲
رله‌های حفاظتی، ۱۰۴۴، ۱۱۰۳، ۱۱۱۰، ۱۱۱۶، ۱۱۳۸، ۱۲۸۰، ۱۲۹۸، ۱۲۹۹
رلهٔ سینکروچک، ۱۱۲۶
رلهٔ عدم همگامی، ۱۱۲۴، ۱۱۲۷
روش تبدیل QR، ۹۴۴، ۹۸۷، ۹۹۸، ۱۰۰۳، ۱۰۰۴

روشهای اصلاح شده آرنولدی، ۹۹۱
رؤیت‌پذیری، ۹۰۴، ۹۰۵، ۱۳۷۹، ۱۳۹۲

ز

زمان رفع خطا، ۱۰۲۷، ۱۰۲۹، ۱۰۳۰، ۱۰۴۲، ۱۰۴۳، ۱۱۱۳، ۱۱۵۳، ۱۳۵۳، ۱۳۵۶

س

سختی سیستمهای قدرت
سختی معادلات دیفرانسیل، ۱۱۸۹، ۱۳۱۱
سطح مرزی انرژی پتانسیل، ۱۱۴۷، ۱۱۵۰، ۱۱۵۷
سفتی پیچشی، ۱۲۳۸
سنکرونیزم (از دست رفتن)، ۸۸۵، ۱۰۲۱، ۱۰۳۰، ۱۰۶۴، ۱۰۶۷، ۱۱۰۳، ۱۱۲۶، ۱۱۲۷، ۱۱۳۲، ۱۱۴۱، ۱۱۴۵، ۱۱۴۹، ۱۱۵۵
سیستم انتقال ضعیف، ۱۱۱۸
سیستم انتقال قوی، ۱۱۱۸، ۱۱۲۷
سیستم تحریک، ۹۱۷، ۹۴۲، ۹۴۸، ۹۴۹، ۹۵۰، ۹۵۱، ۹۵۸
سیستم خودگردان، ۸۸۶
- شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی، ۱۰۴۴، ۱۲۹۵، ۱۳۰۹
- ساختار مدل، ۹۸۴، ۱۰۴۴، ۱۰۴۵
سیستم‌های استاتیکی توان راکتیو، ۱۱۷۳، ۱۱۸۲
سیستمهای انتقال جبران شدهٔ موازی، ۱۲۷۲
سیم‌پیچ میراکننده، ۹۵۸، ۹۷۳، ۹۸۰، ۹۸۱، ۹۸۲، ۱۰۴۶، ۱۰۵۱
- ماتریس حالت سیستم، ۹۰۷، ۹۰۹، ۹۴۷، ۹۶۷، ۹۷۳، ۹۸۱، ۹۸۷، ۱۰۰۷، ۱۰۰۸

ش

شبکه‌های توالی، ۱۰۷۵، ۱۰۸۰، ۱۰۸۴، ۱۰۸۶، ۱۰۸۷، ۱۰۸۹، ۱۰۹۰، ۱۰۹۴، ۱۰۹۵، ۱۰۹۷، ۱۰۹۸، ۱۰۹۹، ۱۱۰۰، ۱۱۰۱، ۱۱۰۲
شرایط هادی - باز، ۱۰۹۸
شکست بهمنی ولتاژ، ۱۱۶۸، ۱۱۸۴
شکل مُد، ۹۰۰، ۹۰۲، ۱۰۰۷، ۱۰۰۸، ۱۰۰۹، ۱۰۱۴، ۱۳۴۰
شین بینهایت، ۹۱۶، ۹۱۷، ۹۲۰، ۹۳۰

ض

ضرایب مشارکت ژنراتور، ۱۲۱۲
ضرایب مشارکت شاخه، ۱۲۱۱، ۱۲۱۲
ضرایب مشارکت شین، ۱۲۱۰، ۱۲۳۳
ضریب تداخل واحد، ۱۲۶۸

ع

عامل مشارکت، ۹۰۰، ۹۰۳، ۹۰۴

ف

فازور تعمیم یافته، ۹۰۶
فرکانس مختلط، ۹۰۵، ۹۰۶، ۹۴۵، ۹۶۹، ۹۷۰، ۹۹۵، ۹۹۷، ۹۹۸، ۱۳۹۲
فروپاشی ولتاژ، ۱۱۶۷، ۱۱۶۸، ۱۱۷۶، ۱۱۷۸، ۱۱۷۹، ۱۱۸۳، ۱۱۸۴، ۱۱۸۵، ۱۱۸۶، ۱۱۸۷، ۱۱۸۹، ۱۱۹۵، ۱۲۰۶، ۱۲۲۰، ۱۲۳۳، ۱۲۳۴، ۱۲۳۵، ۱۲۳۶
فضای حالت، ۸۸۶، ۸۸۷، ۸۸۸، ۸۹۱، ۸۹۲، ۸۹۳، ۹۰۷، ۹۱۰، ۹۱۱، ۹۱۷، ۹۲۷، ۹۲۸، ۹۳۴، ۹۴۸، ۹۵۱، ۹۶۳، ۹۶۶، ۱۲۵۱، ۱۳۶۸
فقدان تحریک (بی تحریکی)، ۱۱۳۲، ۱۲۹۱
فوق سنکرون، ۱۲۷۲

ق

قطب، ۹۰۷، ۹۰۸، ۹۴۸، ۹۶۴، ۹۹۳، ۱۰۵۰، ۱۰۷۶، ۱۰۷۹، ۱۰۹۱، ۱۱۱۹، ۱۱۳۳، ۱۲۴۸، ۱۲۵۷، ۱۲۷۲، ۱۲۷۳، ۱۳۳۳، ۱۳۳۴، ۱۳۳۷، ۱۳۴۰، ۱۳۶۸، ۱۳۷۹، ۱۳۸۱، ۱۳۸۲، ۱۳۹۲
قوس ثانویه، ۱۳۳۴، ۱۳۳۵، ۱۳۳۶

ک

کار مستقل از قطب کلیدها، ۱۳۳۳
کشش الاستیک، ۱۲۴۴، ۱۲۸۴
کشش پلاستیک، ۱۲۸۴
کلیدزنی، ۱۰۵۶، ۱۰۵۹، ۱۰۶۱، ۱۱۰۰، ۱۱۰۳، ۱۱۳۹، ۱۱۸۲، ۱۲۳۶
کلیدزنی تک قطبی، ۱۳۳۴، ۱۳۳۶، ۱۳۳۷، ۱۳۳۸
کلیدزنی حالت ماندگار، ۱۲۸۲
کنارگذر میراکننده مکانیکی، ۱۳۰۸
کنترل‌پذیری، ۹۰۴، ۹۰۵
کنترل تحریک پایداری گذرا، ۱۳۵۳
کنترل تحریک (طراحی)، ۹۱۷، ۹۲۷، ۹۶۶، ۹۶۷، ۹۷۲، ۱۰۰۷، ۱۰۰۸، ۱۰۰۹، ۱۰۱۰، ۱۰۱۵، ۱۰۶۲، ۱۰۶۳، ۱۰۶۴، ۱۰۶۷، ۱۱۳۶، ۱۲۵۷، ۱۲۵۸، ۱۲۸۰، ۱۳۵۳، ۱۳۵۶، ۱۳۶۳، ۱۳۶۸، ۱۳۶۹، ۱۳۷۲
کنترل تحریک ناپیوسته، ۱۳۵۳، ۱۳۵۵، ۱۳۵۶
کنترل تکمیلی، ۱۳۵۲، ۱۳۷۵، ۱۳۷۹، ۱۳۸۳، ۱۳۸۴، ۱۳۸۵، ۱۳۸۸، ۱۳۹۰، ۱۳۹۱، ۱۳۹۲، ۱۳۹۳، ۱۳۹۴، ۱۳۹۵
کنترل کنندهٔ توان اضافی حساس به فرکانس، ۱۲۶۷
کنترل میرایی زیر سنکرون، ۱۲۶۹
کنترل ولتاژ، ۱۱۳۴، ۱۱۶۸، ۱۱۷۴، ۱۱۷۶، ۱۱۷۹، ۱۱۸۶، ۱۱۸۸، ۱۱۹۵، ۱۲۵۷، ۱۰۱۶
کنترلهای کنورتور، ۱۳۵۹، ۱۳۸۶

کورکننده، ۱۱۲۳، ۱۱۲۹

گ

گاورنرهای سرعت، ۱۰۰۸، ۱۱۸۴، ۱۲۶۶، ۱۳۲۴
گره پایدار، ۹۱۴
گشتاور ترمزکنندهٔ توالیِ صفر، ۱۰۹۱

ل

لیاپانوف، ۸۹۳، ۱۱۴۶
- روش اول، ۸۹۳
- روش مستقیم، ۸۹۳، ۱۱۴۶، ۱۱۴۹، ۱۱۵۱

م

ماتریس دستگاه (حالت)، ۸۹۴
ماتریس رؤیت پذیری، ۹۰۵
ماتریس ژاکوبی، ۸۹۴
ماتریس کنترل‌پذیری، ۹۰۵
ماتریس مُدال، ۸۹۷، ۹۰۳، ۹۲۵
ماتریس مشارکت، ۹۰۳، ۹۲۲، ۹۴۲، ۹۴۴، ۹۶۷، ۹۶۸
ماتریس‌های همانند، ۸۹۵
ماتریس هِسِنبرگ فوقانی، ۱۰۰۰، ۱۰۰۱
ماشین سنکرون، ۹۱۷، ۹۲۷، ۹۲۸، ۹۷۳، ۹۸۷، ۱۰۴۶، ۱۰۵۰، ۱۰۷۶، ۱۰۸۰، ۱۰۸۱، ۱۰۸۲، ۱۱۳۱، ۱۱۴۹
مانده یک تابع تبدیل، ۹۰۸
متعامد، ۸۹۵، ۹۹۹، ۱۰۰۰، ۱۰۰۱
متغیرهای حالت، ۸۸۶، ۸۸۷، ۸۹۷، ۹۰۲، ۹۰۳، ۹۰۷، ۹۰۸، ۹۱۰، ۹۲۸
- متغیرهای حالت اضافی، ۱۰۰۸
متغیرهای فاز، ۹۶۶
محدودکنندهٔ زیر تحریک، ۱۳۰۱
محدودکنندهٔ فوق تحریک، ۱۱۷۶، ۱۱۹۰
مدل سیستم محور، ۱۲۴۲
- مدل پیوستار، ۱۲۴۲
- مدل فشردهٔ جرم، ۱۲۴۲
مدولاسیون دامنه، ۱۰۵۵، ۱۲۶۷، ۱۲۶۸
مُدهای خلاف فاز، ۱۲۸۸
مُدهای همفاز، ۱۲۸۷
مرکز الکتریکی، ۱۱۱۸، ۱۱۱۹، ۱۱۲۶، ۱۱۲۷، ۱۱۳۰، ۱۱۳۴، ۱۱۴۴، ۱۳۳۲
مسیر حالت، ۸۸۸
مشارکت خالص، ۹۰۴
مشخصه‌های پیچشی توربین ژنراتور، ۱۲۳۶
مشخصه‌های پیچشی ژنراتور آبی، ۱۲۸۳
مشخصه‌های V - P، ۱۱۶۲
مشخصه‌های Q - V، ۱۱۸۰، ۱۱۸۱، ۱۱۸۲، ۱۲۱۷
معادله حرکت (نوسان)، ۸۹۷، ۱۰۲۴

معادله مشخصه، ۸۹۲، ۸۹۳، ۸۹۴، ۹۱۵، ۹۲۰، ۱۳۸۱
معیار سطوح مساوی، ۱۰۲۷، ۱۰۲۹، ۱۰۳۹، ۱۰۴۰، ۱۰۴۳، ۱۱۴۸، ۱۱۴۹
مقادیر ویژه، ۸۹۲، ۸۹۳، ۸۹۴، ۸۹۵، ۸۹۶، ۸۹۹، ۹۰۰، ۹۰۲، ۹۰۸، ۹۰۹
ـ محاسبه مقدار ویژه، ۹۶۹، ۹۹۱، ۱۲۱۱
ـ تحلیل مقدار ویژه سیستمهای بزرگ، ۹۹۲
ـ حساسیت مقدار ویژه، ۹۰۲، ۹۰۳، ۹۰۴
مقاومت توالی صفر، ۱۰۸۱، ۱۰۸۲
مقاومت توالی منفی، ۱۰۸۰، ۱۰۹۱
میرایی، ۸۸۵، ۹۰۰، ۹۰۵، ۹۱۰، ۹۱۲، ۹۲۱، ۹۲۲، ۹۲۴، ۹۲۶، ۹۴۲، ۹۴۶
ـ فرکانس میراشده
ـ نسبت میرایی، ۹۰۰، ۹۱۰، ۹۱۲، ۹۲۱، ۹۲۲، ۹۲۶، ۹۴۲، ۹۴۶، ۹۶۷
مؤلفه‌های توالی صفر، ۱۰۷۱، ۱۰۷۵
مؤلفه‌های توالی مثبت، ۱۰۷۱
مؤلفه‌های توالی منفی، ۱۰۷۱، ۱۰۹۵
مؤلفه‌های متقارن، ۱۰۵۵، ۱۰۷۰، ۱۰۷۱، ۱۰۷۴، ۱۰۸۶، ۱۰۸۷، ۱۰۸۸، ۱۰۸۹، ۱۰۹۹

ن

ناپایداری ولتاژ، ۱۱۶۷، ۱۱۶۸، ۱۱۷۱، ۱۱۷۴، ۱۱۸۳، ۱۱۸۴، ۱۱۸۵، ۱۱۸۷، ۱۲۰۵، ۱۲۰۶، ۱۲۱۰، ۱۲۱۷، ۱۲۱۹، ۱۲۲۰، ۱۲۲۳، ۱۲۳۳، ۱۲۳۵
ناحیه حفاظتی، ۱۱۰۶
نرمالیزه کردن بردارها، ۸۹۶
نقاط تعادل (منفرد)، ۸۸۸
ـ انواع نقاط تعادل، ۹۰۰
نوسان به عقب، ۱۳۳۳، ۱۳۴۳
نوسانهای زیر سنکرون، ۱۲۷۲، ۱۲۷۴، ۱۲۸۱
نوسانهای مُد، ۱۰۱۱، ۱۲۶۷، ۱۳۵۲، ۱۳۶۳، ۱۳۶۶
ـ بین ماشینی، ۱۰۰۹، ۱۰۱۰، ۱۰۱۱، ۱۲۸۷، ۱۳۰۰، ۱۳۰۱، ۱۳۰۲، ۱۳۶۸، ۱۳۷۰، ۱۳۷۲
ـ بین واحدی، ۱۰۱۱
ـ محلی واحد، ۱۰۱۱، ۱۰۱۴، ۱۰۱۶
ـ بین ناحیه‌ای، ۹۹۱، ۱۰۰۵، ۱۰۰۹، ۱۰۱۰، ۱۰۱۱، ۱۰۱۲، ۱۰۱۴
نیروگاههای آبی، ۱۳۰۴، ۱۳۳۲، ۱۳۴۷، ۱۳۶۴
نیروگاههای حرارتی، ۱۲۶۹، ۱۳۰۲

و

وریستور، ۱۰۵۴

POWEREN.IR