

بِسْمِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



POWEREN.IR



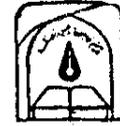
# پایداری و کنترل سیستمهای قدرت

(جلد اول)

مؤلف: پرابها کندور

مترجمان: دکتر حسین سیفی - دکتر علی خاکی صدیق





کندور، پرابها

Kundur, Prabha

پایداری و کنترل سیستمهای قدرت (جلد اول) / مؤلف پرابها کندور؛  
مترجمان حسین سیفی، علی خاکی صدیق. - تهران: دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر، ۱۳۷۶.  
ج ۲: مصور، جدول، نمودار. - (انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۳۶، ۳۷).  
شایک دوره: ۲-۹۶۴-۶۲۱۳-۰۲-۲ (2 Vol. Set) (دوره مجلدی) ISBN 964-6213-02-2  
شایک: ۶-۹۶۴-۶۲۱۳-۰۰-۶ (جلد اول) ISBN 964-6213-00-6 (Vol.1)  
فهرست نویسی براساس اطلاعات فیبا (فهرست نویسی پیش از انتشار)  
عنوان اصلی: Power system stability and control  
ترجمه جلد اول کتاب فوق توسط حسین سیفی و جلد دوم توسط علی خاکی صدیق می باشد.  
واژه نما  
کتابنامه  
۱. برق - سیستمها - پایداری. ۲. برق - سیستمها - کنترل.  
الف. سیفی، حسین، ۱۳۳۶ - مترجم. ب. خاکی صدیق، علی، ۱۳۴۱ - مترجم. ج. دانشگاه  
تربیت مدرس، مرکز نشر، د. عنوان.  
۲ پ ۹/۱۰/۱۰ TK ۶۲۱/۳۱۹  
۱۳۷۶  
کتابخانه ملی ایران ۳۶۰۴ - ۷۶ م

---

عنوان:	پایداری و کنترل سیستمهای قدرت (جلد اول)
مؤلف:	پرابها کندور
مترجم:	دکتر حسین سیفی - دکتر علی خاکی صدیق
ویراستار:	مهندس غلامعلی منتظر
طراح جلد:	محمد حمزه
ناشر:	انتشارات دانشگاه تربیت مدرس
شماره انتشار:	۳۶
شماره مسلسل:	۳۹
تاریخ انتشار:	۱۳۷۶
نوبت چاپ:	اول
تیراژ:	۲۰۰۰
حروفچینی:	ودید
لیتوگرافی:	بابک
چاپ:	منتار
مرکز پخش:	تهران تقاطع بزرگراه دکتر چمران، دانشگاه تربیت مدرس - مرکز نشر - صندوق پستی ۴۸۳۴-۱۴۱۵۵
تلفن:	۸۰۰۶۶۳۲، فاکس ۸۰۰۶۵۴۴
قیمت:	۲۶۵۰۰ ریال

چهار

## فهرست مطالب

پیشگفتار مترجمان

دییاجه مؤلف

پیشگفتار

### بخش ۱: زمینه عمومی

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

### فصل ۲: مقدمه‌ای بر مسأله پایداری سیستمهای قدرت .....

۱-۲ مفاهیم و تعاریف اولیه .....	۲۱
۱-۱-۲ پایداری زاویه‌ای روتور .....	۲۳
۲-۱-۲ پایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ .....	۳۴
۳-۱-۲ پایداری میان‌مدت و بلندمدت .....	۴۳
۲-۲ طبقه بندی پایداری .....	۴۵
۳-۲ مروری بر تاریخچه مسائل پایداری .....	۴۷
منابع .....	۵۳

### بخش ۲: مشخصه‌ها و مدلسازی تجهیزات

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

پنج

۶۰	ماشینهای سنکرون با چند زوج قطب	۲-۱-۳
۶۱	شکل امواج نیروی محرکه مغناطیسی	۳-۱-۳
۶۶	محورهای طولی و عرضی	۴-۱-۳
۶۶	توصیف ریاضی ماشین سنکرون	۲-۳
۶۹	مروری بر معادلات مدارهای مغناطیسی	۱-۲-۳
۷۳	معادلات اصلی حاکم بر ماشین سنکرون	۲-۲-۳
۸۳	تبدیل $dq^0$	۳-۳
۹۲	نمایش در مبنای واحد	۴-۳
۹۳	سیستم مبنای واحد برای کمیت‌های استاتور	۱-۴-۳
۹۴	معادلات در مبنای واحد ولتاژهای استاتور	۲-۴-۳
۹۵	معادلات در مبنای واحد ولتاژهای روتور	۳-۴-۳
۹۶	معادلات شاررور استاتور	۴-۴-۳
۹۶	معادلات شاررور روتور	۵-۴-۳
۹۷	سیستم مبنای واحد برای روتور	۶-۴-۳
۱۰۱	توان و گشتاور مبنای واحد	۷-۴-۳
۱۰۱	سیستم‌های جایگزین مبنای واحد و تبدیلات	۸-۴-۳
۱۰۳	خلاصه‌ای از معادلات در مبنای واحد	۹-۴-۳
۱۰۷	مدارهای معادل محورهای طولی و عرضی	۵-۳
۱۱۳	تحلیل حالت ماندگار	۶-۳
۱۱۴	روابط ولتاژ، جریان و شاررور	۱-۶-۳
۱۱۵	نمودار فازوری	۲-۶-۳
۱۱۹	زاویه روتور	۳-۶-۳
۱۲۰	مدار معادل حالت ماندگار	۴-۶-۳
۱۲۲	روش محاسبه مقادیر حالت ماندگار	۵-۶-۳
۱۲۸	مشخصه‌های گذرای الکتریکی ماشین سنکرون	۷-۳
۱۲۸	جریان اتصال کوتاه در یک مدار ساده RL	۱-۷-۳
۱۲۹	اتصال کوتاه سه فاز در پایانه‌های یک ماشین سنکرون	۲-۷-۳

۱۳۱	حذف آفست جریان مستقیم در جریان اتصال کوتاه.....	۳-۷-۳
۱۳۳	اشباع مغناطیسی.....	۸-۳
۱۳۴	مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه.....	۱-۸-۳
۱۳۶	نمایش اشباع در مطالعات پایداری.....	۲-۸-۳
۱۴۱	مدلسازی اصلاح شده اشباع.....	۳-۸-۳
۱۵۴	معادلات حرکت.....	۹-۳
۱۵۵	مروری بر مکانیزم حرکت.....	۱-۹-۳
۱۵۵	معادله نوسان (تاب).....	۲-۹-۳
۱۵۹	زمان شروع حرکت مکانیکی.....	۳-۹-۳
۱۵۹	محاسبه ثابت لختی.....	۴-۹-۳
۱۶۳	نمایش اجزا در مطالعات پایداری.....	۵-۹-۳
۱۶۴	منابع.....	
۱۶۷	پارامترهای ماشین سنکرون.....	فصل ۴:
۱۶۷	پارامترهای عملیاتی.....	۱-۴
۱۷۲	پارامترهای استاندارد.....	۲-۴
۱۹۰	مشخصه‌های پاسخ فرکانسی.....	۳-۴
۱۹۲	تعیین پارامترهای ماشین سنکرون.....	۴-۴
۲۰۰	منابع.....	
۲۰۳	نمایش ماشین سنکرون در مطالعات پایداری.....	فصل ۵:
۲۰۳	ساده‌سازیهای ضروری در مطالعات سیستمهای بزرگ.....	۱-۵
۲۰۳	چشمپوشی از عبارات ولتاژ ترانسفورمری استاتور.....	۱-۱-۵
۲۰۸	چشمپوشی از تأثیر تغییرات سرعت بر ولتاژهای استاتور.....	۲-۱-۵
۲۱۳	مدل ساده شده با چشمپوشی از سیم‌پیچهای میراکننده.....	۲-۵
۲۱۷	مدل با شار دور ثابت.....	۳-۵
۲۱۷	مدل کلاسیک.....	۱-۳-۵

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

## فصل ۶: انتقال به صورت جریان متناوب

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

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

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

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

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

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

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

## دوازده

۶۷۰	۹-۱۰ مدل‌سازی سیستم‌های HVDC
۶۷۱	۱-۹-۱۰ نمایش برای حل پخش بار
۶۹۴	۲-۹-۱۰ سیستم مبنای واحد برای کمیتهای جریان مستقیم
۶۹۶	۳-۹-۱۰ نمایش در مطالعات پایداری
۷۱۰	منابع
۷۱۵	فصل ۱۱: کنترل توان حقیقی و توان راکتیو
۷۱۵	۱-۱۱ توان حقیقی و کنترل فرکانس
۷۱۶	۱-۱-۱۱ اصول اساسی کنترل سرعت
۷۲۸	۲-۱-۱۱ کنترل خروجی توان واحد تولیدی
۷۳۲	۳-۱-۱۱ مشخصه ترکیبی تنظیم سیستمهای قدرت
۷۳۵	۴-۱-۱۱ آهنگ پاسخ سیستمهای گاورنر توربین
۷۳۹	۵-۱-۱۱ اصول کنترل خودکار تولید (AGC)
۷۵۸	۶-۱-۱۱ پیاده‌سازی AGC
۷۶۶	۷-۱-۱۱ بارزدایی کمبود فرکانس
۷۷۱	۲-۱۱ کنترل توان راکتیو و ولتاژ
۷۷۲	۱-۲-۱۱ تولید و جذب توان راکتیو
۷۷۳	۲-۲-۱۱ روشهای کنترل ولتاژ
۷۷۴	۳-۲-۱۱ راکتورهای شنت
۷۷۷	۴-۲-۱۱ خازنهای شنت
۷۸۰	۵-۲-۱۱ خازنهای سری
۷۸۶	۶-۲-۱۱ کندانسورهای سنکرون
۷۸۷	۷-۲-۱۱ سیستمهای استاتیکی توان راکتیو
۸۰۷	۸-۲-۱۱ اصول جبران‌سازی سیستم انتقال
۸۲۷	۹-۲-۱۱ مدل‌سازی وسایل جبران‌سازی راکتیو
۸۳۵	۱۰-۲-۱۱ کاربرد ترانسفورمرهای تغییردهندهٔ تپ به سیستمهای انتقال
۸۳۸	۱۱-۲-۱۱ تنظیم ولتاژ سیستم توزیع

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

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

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

### چهارده

۹۲۷.....	۱۲-۳-۲ اثر دینامیکهای مدار تحریک ماشین سنکرون.....
۹۴۸.....	۱۲-۴ اثر سیستم تحریک.....
۹۵۷.....	۱۲-۵ پایدارساز سیستم قدرت.....
۹۷۳.....	۱۲-۶ ماتریس حالت سیستم با سیم پیچ میراکننده.....
۹۸۳.....	۱۲-۷ پایداری سیگنال کوچک سیستمهای چندماشینه.....
۹۹۱.....	۱۲-۸ روشهای خاص در تحلیل سیستمهای بسیار بزرگ.....
۱۰۱.....	۱۲-۹ مشخصه‌های مسائل پایداری سیگنال کوچک.....
۱۰۱۷.....	منابع.....
۱۰۲۱.....	فصل ۱۳: پایداری گذرا.....
۱۰۲۱.....	۱۳-۱ دیدی مقدماتی از پایداری گذرا [۱-۳].....
۱۰۳۱.....	۱۳-۲ روشهای انتگرالگیری عددی [۴-۶].....
۱۰۳۱.....	۱۳-۲-۱ روش اویلر.....
۱۰۳۳.....	۱۳-۲-۲ روش اویلر اصلاح شده.....
۱۰۳۴.....	۱۳-۲-۳ روشهای رانگ-کوتا (R-K) [۴ و ۵].....
۱۰۳۷.....	۱۳-۲-۴ پایداری عددی روشهای انتگرالگیری صریح.....
۱۰۳۷.....	۱۳-۲-۵ روشهای انتگرالگیری ضمنی.....
۱۰۴۴.....	۱۳-۳ شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سیستم قدرت.....
۱۰۴۴.....	۱۳-۳-۱ ساختار مدل سیستم قدرت.....
۱۰۴۶.....	۱۳-۳-۲ نمایش ماشین سنکرون.....
۱۰۵۲.....	۱۳-۳-۳ نمایش سیستم تحریک.....
۱۰۵۴.....	۱۳-۳-۴ نمایش شبکه انتقال و بار.....
۱۰۵۶.....	۱۳-۳-۵ معادلات کلی سیستم.....
۱۰۵۸.....	۱۳-۳-۶ پاسخ معادلات کلی سیستم.....
۱۰۷۰.....	۱۳-۴ تحلیل خطاهای نامتعادل.....
۱۰۷۰.....	۱۳-۴-۱ مقدمه‌ای بر مؤلفه‌های متقارن [۱۵-۱۸].....
۱۰۷۵.....	۱۳-۴-۲ امیدانسه‌های توالی ماشینهای سنکرون [۱۵].....

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

۱۱۶۱	فصل ۱۴: پایداری ولتاژ
۱۱۶۲	۱-۱۴ مفاهیم اساسی مربوط به پایداری ولتاژ
۱۱۶۲	۱-۱-۱۴ مشخصه‌های سیستم انتقال
۱۱۶۸	۲-۱-۱۴ مشخصه‌های ژنراتور
۱۱۷۱	۳-۱-۱۴ مشخصه‌های بار [۱، ۵]
۱۱۷۳	۴-۱-۱۴ مشخصه‌های وسایل جبران‌سازی راکتیو
۱۱۷۷	۲-۱۴ فروپاشی ولتاژ

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

۱۲۴۱	فصل ۱۵ : نوسانهای زیر سنکرون.....
۱۲۴۲	۱-۱۵ مشخصه های پیچشی توربین-ژنراتور.....
۱۲۴۲	۱-۱-۱۵ مدل سیستم محور [۱-۶].....
۱۲۵۰	۲-۱-۱۵ فرکانسهای طبیعی پیچشی و صورتهای مُد.....
۱۲۵۷	۲-۱۵ تداخل پیچشی با کنترلهای سیستم قدرت.....
۱۲۵۷	۱-۲-۱۵ تداخل با کنترلهای تحریک ژنراتور.....
۱۲۶۶	۲-۲-۱۵ تداخل با گاورنرهای سرعت.....
۱۲۶۶	۳-۲-۱۵ تداخل با کنورتورهای جریان مستقیم نزدیک.....
۱۲۷۰	۳-۱۵ تشدید زیر سنکرون.....
۱۲۷۰	۱-۳-۱۵ مشخصه های سیستمهای انتقال جبران شده.....

با خازن سری [ ۱۶ و ۱۵ ]

۱۲۷۲	۲-۳-۱۵ خود تحریکی ناشی از اثر ژنراتور القایی
۱۲۷۳	۳-۳-۱۵ تداخل پیچشی منجر به SSR
۱۲۷۴	۴-۳-۱۵ روشهای تحلیلی
۱۲۸۰	۵-۳-۱۵ روشهای مواجهه با مسائل SSR
۱۲۸۱	۴-۱۵ اثر اغتشاشهای حاصل از کلیدزنی شبکه
۱۲۸۶	۵-۱۵ تداخل پیچشی بین واحدهایی که به طور تنگاتنگ به هم تزویج شده‌اند
۱۲۸۹	۶-۱۵ مشخصه‌های پیچشی ژنراتور آبی
۱۲۸۹	منابع

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

۱۳۲۹	فصل ۱۷: روشهای بهبود پایداری
۱۳۳۰	۱-۱۷ تقویت پایداری گذرا
۱۳۳۰	۱-۱-۱۷ رفع خطا با سرعت زیاد
۱۳۳۰	۲-۱-۱۷ کاهش راکتانس سیستم انتقال
۱۳۳۲	۳-۱-۱۷ جبرانسازی قابل تنظیم شنت
۱۳۳۲	۴-۱-۱۷ بازدارنده دینامیکی [۶-۱۰]
۱۳۳۳	۵-۱-۱۷ کلیدزنی راکتورا
۱۳۳۳	۶-۱-۱۷ کار مستقل از قطب کلیدها
۱۳۳۴	۷-۱-۱۷ کلیدزنی تک قطبی
۱۳۳۸	۸-۱-۱۷ باز و بست سریع شیر توربین بخار
۱۳۴۷	۹-۱-۱۷ خارج کردن ژنراتور
۱۳۵۰	۱۰-۱-۱۷ جداسازی کنترل شده سیستم و بارزدایی
۱۳۵۲	۱۱-۱-۱۷ سیستمهای تحریک با سرعت زیاد
۱۳۵۳	۱۲-۱-۱۷ کنترل تحریک ناپیوسته [۴۰]
۱۳۵۸	۱۳-۱-۱۷ کنترل خطوط انتقال HVDC
۱۳۵۹	۲-۱۷ تقویت پایداری سیگنال کوچک
۱۳۵۹	۱-۲-۱۷ پایدارسازهای سیستم قدرت
۱۳۷۵	۲-۲-۱۷ کنترل تکمیلی جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو
۱۳۸۵	۳-۲-۱۷ کنترل تکمیلی خطوط انتقال HVDC
۱۳۹۶	منابع
۱۴۰۱	واژه‌نامه
۱۴۰۷	واژه‌نما

نورده





## پیشگفتار مترجمان

بررسی مسائل مترتب بر صنعت برق - که امروزه به عنوان یکی از بزرگترین سیستمهای موجود در جهان شناخته شده - امری مهم و نیازمند تحقیقات عمیق و گسترده است. در این میان، طی چند دهه اخیر، پایداری و کنترل سیستمهای قدرت، مورد توجه خاص پژوهشگران بوده است. مؤلف این کتاب، آقای دکتر پرابها کندور، حاصل دهها سال تلاش و تجربه خود را در این مجموعه منحصر به فرد، جمع آوری کرده و مؤسسه انتشاراتی مک گراهیل با همکاری انستیتو پژوهش توان الکتریکی (EPRI)، آن را به چاپ رسانده است.

اینجانبان سعی کرده ایم که در عین امانتداری در ترجمه، متنی روان و شیوا را عرضه کنیم به گونه ای که مطالب نسبتاً پیچیده؛ که بسیاری از شاخه های فنی و مهندسی را در بر می گیرد؛ به زبان فارسی در دسترس دانشجویان عزیز دوره های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری و نیز استادان گرامی و پژوهشگران ارجمند قرار گیرد. اما بی شک ترجمه چنین کتاب پر حجمی، خالی از نقص نخواهد بود و امید است این عزیزان، نظریات ارشادی خود را برای اصلاح در چاپهای بعدی ارسال فرمایند.

جلد اول را - که در قالب یازده فصل، بخشهای اول و دوم کتاب را در بر می گیرد - مترجم اول، و جلد دوم را - که سایر فصول کتاب را شامل می شود - مترجم دوم، به رشته تحریر درآورده است. گفتنی اینکه در جلد اول به کلیات، مدلسازی و مشخصه های تجهیزات سیستمهای قدرت و در جلد دوم به جنبه های فیزیکی، روشهای تحلیل و کنترل پایداری این سیستمها پرداخته شده است.

در اینجا لازم است از همه افرادی که در مراحل مختلف چاپ کتاب، اینجانبان را یاری داده اند، صمیمانه قدردانی کنیم. در این خصوص، ذکر نام جناب آقای مهندس غلامعلی منتظر؛

**بیستویک**

سرکار خانم آتوما فروهی، دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق - قدرت دانشگاه تربیت مدرس و نیز دست‌اندرکاران مرکز نشر دانشگاه تربیت مدرس ضروری است. در خاتمه از خانواده‌های خود که در مدت ترجمه این کتاب صبورانه عدم حضور فعال ما را در جمع خود متحمل شدند، صمیمانه قدردانی می‌کنیم.

امید آنکه توانسته باشیم با ترجمه این کتاب، خدمت ناچیزی را به جامعه علمی و صنعتی کشور عرضه کرده باشیم.

## تابستان ۱۳۷۶

حسین سیفی دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

تهران - دانشگاه تربیت مدرس - صندوق پستی ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵

علی خاکی صدیق دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تهران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - صندوق پستی ۱۶۵۶-۱۶۳۱۵



بیست‌ودو

## دیباچه

به نقل از مهندس نامدار برق، چارلز اشتاین متز<sup>۱</sup>، سیستم قدرت به هم پیوسته امریکای شمالی، بزرگترین و پیچیده‌ترین ماشین ساخت بشر است. در حقیقت، بهت‌آور است که چنین سیستمی با درجه بالایی از قابلیت اعتماد برای بیش از یک قرن کار کرده است.

قوام یک سیستم قدرت به وسیله توانایی آن در کارکرد حالت تعادل طی وضعیت عادی و آشفته اندازه‌گیری می‌شود. پایداری سیستم قدرت، مطالعه رفتار این سیستمها را در موقعیتهایی از قبیل تغییر ناگهانی در بار یا تولید یا اتصال کوتاه بر خطوط انتقال در بر می‌گیرد. یک سیستم قدرت در صورتی پایدار است که واحدهای به هم پیوسته تولید در حالت سنکرونیزه باقی بمانند.

توانایی سیستم قدرت در حفظ پایداری، تا حد زیادی به میرا کردن نوسانهای الکترومکانیکی به وسیله کنترل‌های موجود روی سیستم است از این رو، مطالعه و طراحی کنترلها بسیار مهم است.

از میان پدیده‌های پیچیده مربوط به سیستم قدرت، پایداری سیستم قدرت، از نظر درک، بفرنج‌ترین، و از نظر تحلیل، مشکلترین است. سیستمهای قدرت الکتریکی قرن بیست و یکم، بحث برانگیزتر هم خواهند بود زیرا که از آنها نزدیکتر به حدود پایداری، بهره‌برداری می‌شود.

من نمی‌توانم به جز دکتر پرابها گندور<sup>۲</sup>، به فرد شایسته دیگری برای نوشتن کتابی در زمینه پایداری و کنترل سیستم قدرت، فکر کنم. او فرد شناخته شده‌ای در سطح بین‌المللی در زمینه پایداری سیستم قدرت است. تخصص و تجربه عملی او در ارائه راه‌حلهای مسائل پایداری، همتا ندارد. وی نه تنها درک عمیقی از مفاهیم اصلی دارد، بلکه در سرتاسر جهان برای حل مسائل پایداری سیستم تأمین برق، کار کرده است دکتر گندور، دروس بسیاری را تدریس کرده، در مجامع

1. Charles Steinmetz

2. Prabha Kundur

حرفه‌ای و گردهماییهای کمیته صنعت، مطالب عالی را ارائه نموده و در زمینه پایداری و کنترل سیستم قدرت، مقاله‌های فن ی بیشماری را به رشته تحریر در آورده است. برای من باعث کمال مسرت است که بر این کتاب ارزشمند، دیباچه‌ای بنویسم که مطمئن هستم برای مهندسان کاربردی و دانشجویان مهندسی قدرت، بسیار گرانقدر خواهد بود.

دکتر نیل.ج. بالو<sup>۱</sup>

مدیر برنامه‌ها

برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت

بخش سیستمهای الکتریکی

انستیتو پژوهش توان الکتریکی<sup>۲</sup>

---

1. Dr. Neal J. Balu      2. Electric Power Research Institute

## پیشگفتار

این کتاب راجع به درک، مدل‌سازی، تحلیل و روش‌های بهبود مسائل کنترل و پایداری سیستم قدرت است. چنین مسائلی، ملاحظه‌های بسیار مهمی را در برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های مدرن قدرت شامل می‌شود. به دلیل رشد به هم پیوستگیها و استفاده از تکنولوژیهای جدید، پیچیدگی سیستم‌های قدرت مرتباً در حال افزایش است. در همان حال، قیود مالی و مقررات، شرکتهای برق را مجبور به استفاده از سیستمها، تقریباً در حدود پایداری خود، کرده است. این دو عامل، انواع جدیدی از مسائل پایداری را به وجود آورده است بنابراین، برای تقویت قابلیت اطمینان سیستم، تسهیل طرح اقتصادی و تأمین قابلیت انعطاف بیشتر کار سیستم، اعتماد بیشتر به استفاده از ابزارهای خاص کنترلی معطوف شده است. بعلاوه، پیشرفت در تکنولوژی کامپیوتر، تحلیل عددی، نظریه کنترل و مدل‌سازی تجهیزات به ایجاد ابزار اصلاح شده محاسباتی و روشهای بهتر طراحی سیستم، منجر شده است. انگیزه اصلی برای نوشتن این کتاب، بیان این پیشرفتهای جدید و بررسی جامع موضوع بوده است.

متن ارائه شده در کتاب، مطالب مربوط به پایداری و کنترل سیستم قدرت را از منابع زیادی گرد هم آورده است: دروس تحصیلات تکمیلی که از سال ۱۹۷۹ میلادی در دانشگاه تورنتو تدریس کرده‌ام، چندین پروژه تحقیقاتی EPRI (۱۲۰۸ RP، ۲۴۴۷ RP، ۳۰۴۰ RP، ۳۱۴۱ RP، ۴۰۰۰ RP، ۸۴۹ RP و ۹۹۷ RP) که با آنها به طور نزدیک درگیر بوده‌ام، و مقاله‌های فنی بسیاری که از سوی آی.ای.ای. ای<sup>۱</sup>، ای.ای.ای<sup>۲</sup> و سی. آی. جی. آر. ای<sup>۳</sup> منتشر شده است.

این کتاب به منظور تأمین احتیاجهای مهندسان کاربردی که با صنعت برق سر و کار دارند و نیز دانشجویان تحصیلات تکمیلی و پژوهشگران نوشته شده است. کتابهای موجود در این زمینه حداقل ۱۵ سال قدمت دارند حال آنکه بعضی کتابهای مشهور، قدمت ۳۰ تا ۴۰ ساله

---

1. IEEE

2. IEE

3. CIGRE

دارند. در غیبت یک کتاب جامع، دروس پایداری سیستم قدرت، اغلب جنبه‌های محدودی از مسأله را با تأکید بر روشهای خاص محاسباتی بیان می‌نمایند. بعلاوه، هم اعضای هیأت علمی و هم دانشجویان، بسهولت به اطلاعات مربوط به جنبه‌های عملی امکان دسترسی ندارند. چون موضوع، نیازمند درک زمینه‌های وسیعی است. مهندسان کاربردی که تازه وارد موضوع شده‌اند با مشکل طاق‌فرسای جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز از منابع بسیار پراکنده، روبرو می‌شوند.

سعی این کتاب، آن است که با تأمین و بیان مفاهیم اصلی لازم، شرح جنبه‌های عملی و پرداختن جامع به آخرین دستاوردها در روشهای مدل‌سازی و ابزار محاسباتی، این خلأ را پر کند و به سه بخش تقسیم شده است. بخش اول، اطلاعات زمینه‌ای عمومی را در دو فصل، بیان می‌کند فصل اول، ساختار سیستمهای مدرن قدرت را شرح داده و سطوح گوناگون کنترلی را شناسایی می‌کند. فصل دوم، به معرفی مسأله پایداری پرداخته، مفاهیم اصلی، تعاریف و طبقه‌بندی را ارائه می‌نماید.

بخش دوم کتاب که شامل فصلهای ۳ تا ۱۱ است، به مشخصه‌های و مدل‌سازی تجهیزات اختصاص یافته است. پایداری سیستم از مشخصه‌های هر عنصر اصلی سیستم قدرت، تأثیر می‌پذیرد. برای درک پایداری سیستم، دانستن مشخصه‌های فیزیکی هر عنصر و تواناییهای آن، ضروری است. برای تحلیل پایداری، نمایش این عناصر به وسیله مدل‌های مناسب ریاضی، مهم است. فصلهای ۳ تا ۱۰، به ژنراتورها، سیستمهای تحریک، توربینها (چرخاننده‌ها)، انتقال جریان متناوب و جریان مستقیم و بارهای سیستم اختصاص داده شده است فصل یازدهم، اصول کنترل توان حقیقی و راکتیو را بیان می‌کند و مدل‌های تجهیزات کنترلی را به دست می‌آورد. بخش سوم که شامل فصول ۱۲ تا ۱۷ است، طبقه‌بندیهای مختلف پایداری سیستم قدرت را در نظر می‌گیرد. در این بخش تأکید، بر درک فیزیکی وجوه بسیار متنوع پدیده پایداری است و روشهای تحلیل به همراه معیارهای کنترلی برای کاهش مشکلات پایداری به طور مشروح بیان شده است.

نظریه‌های پایداری سیستم قدرت و کنترل سیستم قدرت بسیار به هم مرتبط هستند. تمام کنترل‌های سیستم قدرت به صورت سلسله مراتبی، بسیار گسترده هستند. پایداری سیستم بشدت از این کنترلها تأثیر می‌پذیرد.

در هر فصل، با شروع از مفاهیم ساده، فرضیه بیان شده، رفته رفته مفاهیم پیچیده مطرح می‌شود به گونه‌ای که بتوان آن را در موقعیتهای پیچیده عملی به کار برد. این موضوع، با تعداد زیادی مثال تشریحی تکمیل می‌شود. در صورت داشتن جایگاه، زمینه‌های تاریخی و تجربه‌های گذشته مورد تأکید قرار گرفته است.

## بیستوشش

چون این چاپ اول کتاب است، ممکن است بعضی جنبه‌های موضوع به اندازه کافی پوشش داده نشده باشد. نیز ممکن است بعضی خطاها، اشکالات تایپی و غیره مشاهده شود. از هرگونه اطلاع در مورد این خطاها و نیز پیشنهاد برای بهبود در صورتی که چاپ دومی در کار باشد، استقبال می‌کنم.

اینجانب به افراد بسیاری که در تهیه این کتاب به من یاری رسانده‌اند، مدیون هستم. بافو<sup>۱</sup> و سینات مورتی<sup>۲</sup> در محاسبات و شبیه‌سازیهای کامپیوتری بسیاری به من کمک کرده‌اند. کیپ موریسون<sup>۳</sup>، شولومون بیرگا<sup>۴</sup>، میرکلاین<sup>۵</sup>، کای تانگ<sup>۶</sup> و دیپا کُندور<sup>۷</sup> نیز در بعضی نتایج ارائه شده کمک کرده‌اند.

آتف مُرکد<sup>۸</sup>، کیپ موریسون، ارنی نیوُرف<sup>۹</sup>، گراهام راجوز<sup>۱۰</sup>، دیوید وُنگ<sup>۱۱</sup>، حمید همدانی‌زاده، بهنام دانایی، سعید عربی و لوروبینو<sup>۱۲</sup> فصلهای مختلف کتاب را مرور و نظریات ارزشمندی ارائه کرده‌اند.

دیوید لی<sup>۱۳</sup> فصلهای ۹ و ۱۰ را مرور و نظریات و پیشنهادهای ارزشمندی ارائه نمود. اینجانب، حداقل ۲۲ سال است که با او در تعدادی از مسائل پیچیده مربوط به پایداری سیستم قدرت از نزدیک همکاری بوده‌ام. نتیجه تلاش مشترک ما در بخشهای مختلف کتاب منعکس شده است.

کارسن تیلور<sup>۱۴</sup>، متن کتاب را مرور کرده، پیشنهادهای مفیدی را برای بهبود مطرح کرد. بعلاوه، بحثهای گرمی با وی، دکتر چارلز کنکوردا<sup>۱۵</sup> و آقای یاکوت منصور<sup>۱۶</sup> داشته‌ام که به من در درک بهتر نیازهای حال و آینده تحلیل پایداری سیستم قدرت کمک کرده است.

پاتی اسکات<sup>۱۷</sup> و کریستین هبشر<sup>۱۸</sup> اولین نمونه متن را مرور نمودند. ژانت کیبل وایت<sup>۱۹</sup> آخرین نمونه متن را مرور کرد و نکات مفیدی را مطرح کرد. اینجانب عمیقاً به لی وانگ<sup>۲۰</sup> و همسر او مینگ<sup>۲۱</sup> به خاطر کار عالی آنها در حروفچینی کتاب و نیز تهیه تصاویر و شکلها مدیونم.

فرصت را مغتنم می‌شمارم تا تشکر خود را به آقای یال داندنو<sup>۲۲</sup> برای تشویقی که او به کار برد

- |                       |                        |                     |                       |
|-----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
| 1. Baofu Gao          | 2. Sainath Moorthy     | 3. Kip Morison      | 4. Solomon Yirga      |
| 5. Meir Klein         | 6. Chi Tang            | 7. Deepa Kundur     | 8. Atef Morched       |
| 9. Ernie Neudorf      | 10. Graham Rogers      |                     | 11. David Wong        |
| 12. Lew Rubino        | 13. David Lee          | 14. Carson Taylor   |                       |
| 15. Charles Concordia |                        | 16. Yakout Mansour  |                       |
| 17. Patti Scott       | 18. Christine Hebscher |                     | 19. Janet Kibblewhite |
| 20. Lei Wang          | 21. Xialu Meng         | 22. Paul L. Dardeno |                       |
| 23. Ontario Hydro     |                        |                     |                       |

#### بیست‌وهفت

و به اینجانب در طی دوران اولیه کار من در انتاریو هیدرو<sup>۱</sup> اعتماد نشان داد، ابراز دارم. به واسطه او بود که من به صنعت برق ملحق شدم و سپس وارد بسیاری از موضوعاتی شدم که در این کتاب در خصوص عملکرد دینامیکی سیستم قدرت مطرح شده است.

اینجانب باید از انستیتو پژوهش توان الکتریکی برای حمایت از چاپ کتاب تشکر کنم. بخصوص، از دکتر نیل بالو و آقای مارک لابی<sup>۲</sup> به دلیل تشویق و حمایتشان متشکرم. نیز، آقای لابی، متن را مرور کرده پیشنهادهای مفیدی را ارائه کرد.

مایلم از لیز دوهرتی<sup>۳</sup> و پاتی جونز<sup>۴</sup> نیز برای کمک به مکاتبات و دیگر امور اداری مربوط به کتاب تشکر کنم.

سرانجام، باید از همسرم، گیتا کندور<sup>۵</sup> برای حمایت بی شائبه و صبر او طی ماههای بسیاری که بر روی این کتاب کار کرده‌ام، سپاسگزاری کنم.

پرابها شانکار کندور

---

1. Ontario Hydro

2. Mark Lavby

3. Liz Doherty

4. Patty Jones

5. Geetha Kundur

---

## بخش ۱

### زمینه عمومی

#### فصل اول

#### مشخصه‌های عمومی سیستمهای مدرن قدرت

هدف از این فصل مقدماتی، آن است که ضمن بیان تاریخچه‌ای از پیدایش و تکامل سیستمهای قدرت، شرحی کلی از اینگونه سیستمها را به تصویر کشد. پس از آن، مشخصه‌های اصلی و ساختار سیستمهای مدرن قدرت بیان خواهد گردید. همچنین، شروط لازم برای عملکرد یک سیستم قدرت با طراحی صحیح و سطوح مختلف کنترلی مورد نیاز برای تأمین این شروط، شرح داده خواهد شد. این فصل به همراه فصل دوم، دورنمای اطلاعاتی کلی و نیز زمینه مورد نیاز برای بقیه فصول کتاب را فراهم می‌آورد.

#### ۱-۱ پیدایش و تکامل سیستمهای قدرت

در اواخر دهه ۱۸۷۰ میلادی، زمانی که لامپهای قوسی<sup>۱</sup> برای روشنایی منازل و خیابانها به کار رفت، استفاده تجاری از برق آغاز شد. توماس ادیسون اولین سیستم کامل قدرت (شامل یک ژنراتور، کابل، فیوز، اندازه‌گیر و بار) را در نیروگاه تاریخی خیابان پیرل<sup>۲</sup> شهر نیویورک پایه‌ریزی کرد که در سپتامبر ۱۸۸۲ میلادی مورد بهره‌برداری قرارگرفت. این نیروگاه، یک سیستم برق جریان مستقیم بود که از یک ژنراتور جریان مستقیم تشکیل می‌شد که به وسیله یک توربین بخار می‌چرخید و قدرت مورد نیاز ۵۹ مشتری را در منطقه‌ای به شعاع ۱/۵ کیلومتر تأمین

---

1. Arc Lamps

2. Pearl

می‌کرد. بار که تماماً شامل لامپهای توری<sup>۱</sup> می‌شد به کمک یک سیستم کابل زیر زمینی با ولتاژ ۱۱۰ ولت تغذیه می‌گردید. ظرف چند سال، سیستمهای مشابهی در اغلب شهرهای بزرگ جهان به کار گرفته شد. با ظهور موتورهای الکتریکی، که توسط اسپراگ<sup>۲</sup> در سال ۱۸۸۴ میلادی طراحی و تولید شد، اینگونه موتورها به بار سیستمهای قدرت اضافه شد. این آغاز چیزی بود که سرانجام به پیدایش یکی از بزرگترین صنایع دنیا منجر گردید.

علی‌رغم استفاده گسترده اولیه از سیستمهای جریان مستقیم، بعدتر اینگونه سیستمها، تقریباً به طور کامل، با سیستمهای جریان متناوب جایگزین شد. تا سال ۱۸۸۶ میلادی، محدودیتهای سیستمهای جریان مستقیم به طور فزاینده‌ای آشکار شد. چه، آنها فقط می‌توانستند قدرت مورد نیاز را در مسیری کوتاه از ژنراتور تأمین نمایند و برای حفظ حد تلفات انتقال ( $RI^2$ ) و افت ولتاژ، بایستی سطح ولتاژ در مسیرهای طولانی بالا می‌بود. اما این چنین سطوح ولتاژی از نظر تولید و مصرف عملی نبود. از این رو دستیابی به وسیله مناسبی برای تبدیل ولتاژ، یک ضرورت بود.

پیدایش ترانسفورمر و انتقال جریان متناوب به دست گاولارد<sup>۳</sup> و گیبس<sup>۴</sup> از شهر پاریس (فرانسه) منجر به تشکیل یک سیستم قدرت جریان متناوب شد. پس از آن، وستینگهاوس<sup>۵</sup> حقوق قانونی را در مورد بسط و توسعه اینگونه سیستمها در ایالات متحده امریکا کسب کرد. در سال ۱۸۸۶ میلادی، استانلی<sup>۶</sup>، همکار وستینگهاوس، موفق شد یک سیستم توزیع جریان متناوب و ترانسفورمر را در بعد عملی و تجاری برای ۱۵۰ لامپ در شهر بارینگتن<sup>۷</sup> در ماساچوست<sup>۸</sup> طراحی کرده، مورد آزمایش قرار دهد. در سال ۱۸۸۹ میلادی، اولین خط انتقال جریان متناوب به طول ۲۱ کیلومتر و در ولتاژ ۴۰۰۰ ولت بین دو شهر ویلامت فالز<sup>۹</sup> و پرتلند<sup>۱۰</sup> در امریکای شمالی به صورت تک فاز مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

با پیدایش سیستمهای چند فاز به وسیله نیکلاتسلا<sup>۱۱</sup>، سیستمهای جریان متناوب مورد

1. Incandescent Lamps

2. Frank Sprague

3. L. Gaulard

4. J.D. Gibbs

5. G. Westinghouse

6. William Stanley

7. Great Barrington

8. Massachusetts

9. Willamette Falls

10. Portland

11. Nikola Tesla

توجه بیشتری قرارگرفت به طوری که او تا سال ۱۸۸۸ میلادی صاحب چندین ثبت اختراع در زمینه موتورهای الکتریکی، ژنراتور، ترانسفورمر و سیستمهای انتقال شد. وسیتنگهاوس مجوز این اختراعات را خرید و سیستمهای جریان متناوب امروزی را پایه‌گذاری کرد.

در دهه ۱۸۹۰ میلادی بحث فراوانی در خصوص این درگرفت که آیا باید صنعت برق را بر اساس جریان مستقیم استاندارد کرد، یا جریان متناوب. اینگونه بحثها بیشتر بین ادیسون (که از جریان مستقیم حمایت می‌کرد) و وستینگهاوس (که به نفع جریان متناوب شعار می‌داد) مطرح بود. تا آخر قرن نوزدهم، سیستمهای جریان متناوب به دلایل ذیل بر سیستمهای جریان مستقیم فائق شد:

- در جریان متناوب، می‌توان سطوح ولتاژ را براحتی تبدیل کرد. بدین ترتیب قابلیت انعطاف در استفاده از ولتاژهای مختلف در قسمت‌های تولید، انتقال و توزیع فراهم می‌شود.
- ژنراتورهای جریان متناوب، بسیار ساده‌تر از ژنراتورهای جریان مستقیم هستند.
- موتورهای جریان متناوب، بسیار ساده‌تر و ارزانتر از موتورهای جریان مستقیم هستند. در سال ۱۸۹۳ میلادی اولین خط ۱۲ کیلومتری ۲۳۰۰ ولت سه فاز در امریکای شمالی و در کالیفرنیا جنوبی مورد بهره‌برداری قرارگرفت. در همین زمان، در آبشار نیاگارا سیستم جریان متناوب برای انتقال توان به بوفالو<sup>۱</sup>، که ۳۰ کیلومتر دورتر بود، انتخاب شد، زیرا سیستم جریان مستقیم برای انجام این کار عملی نبود. این تصمیم به بحث و مجادله در خصوص انتخاب جریان مستقیم یا جریان متناوب پایان داد و پیروزی سیستمهای جریان متناوب را قطعی کرد. در اوایل دوران سیستمهای انتقال جریان متناوب، فرکانس، استاندارد نبود و فرکانسهای مختلفی از جمله ۲۵، ۵۰، ۶۰، ۱۲۵ و ۱۳۳ هرتز مورد استفاده قرار می‌گرفت. این موضوع اتصال سیستمهای مختلف به هم را مشکل می‌کرد. سرانجام در امریکای شمالی، فرکانس ۶۰ هرتز به صورت استاندارد درآمد؛ اگر چه در بسیاری کشورهای دیگر، فرکانس ۵۰ هرتز انتخاب شده است.

نیاز روزافزون به انتقال مقادیر بیشتر توان در مسیرهای طولانی تر باعث استفاده از سطوح باز

هم بیشتر ولتاژ گردید. سیستمهای اولیه جریان متناوب، ولتاژهای ۱۲، ۴۴ و ۶۰ کیلو ولت (مقدار مؤثر<sup>۱</sup>، خط به خط) را استفاده می کردند. این سطح در سال ۱۹۲۲ میلادی به ۱۶۵ کیلو ولت، در سال ۱۹۲۳ میلادی به ۲۲۰ کیلو ولت، در سال ۱۹۳۵ میلادی به ۲۸۷ کیلو ولت، در سال ۱۹۵۳ میلادی به ۳۳۰ کیلو ولت و در سال ۱۹۶۵ میلادی به ۵۰۰ کیلو ولت، افزایش یافت. شرکت هیدروکیبک<sup>۲</sup> اولین خط ۷۳۵ کیلوولتی خود را در سال ۱۹۶۶ میلادی مورد بهره برداری قرار داد. خط ۷۶۵ کیلوولتی در ۱۹۶۹ میلادی در ایالات متحده مورد استفاده قرار گرفت. صنعت برق به منظور جلوگیری از تعدد و وسیع سطوح ولتاژ، این سطوح را به صورت استاندارد در آورد. اکنون سطوح ۱۱۵، ۱۲۸، ۱۶۱ و ۲۳۰ کیلو ولت در طبقه بندی فشار قوی<sup>۳</sup> (HV) و سطوح ۳۴۵، ۵۰۰ و ۷۶۵ کیلو ولت در طبقه بندی فشار بسیار قوی<sup>۴</sup> (EHV) به صورت استاندارد در آمده اند [مراجع ۱ و ۲].

با پیدایش لامپهای قوس جیوه ای<sup>۵</sup> در دهه ۱۹۵۰ میلادی، سیستمهای انتقال جریان مستقیم فشار قوی<sup>۶</sup> (HVDC) در شرایط بخصوصی به صورت اقتصادی در آمدند و خطوط مزبور برای انتقال مقادیر زیاد توان در مسیرهای طولانی مورد توجه قرار گرفتند. مسافتی که بالاتر از آن، انتقال به صورت جریان مستقیم رقیب جدی برای انتقال به صورت جریان متناوب است معمولاً برای خطوط هوایی، حدود ۵۰۰ کیلومتر و برای کابلهای زیر زمینی و دریایی در حدود ۵۰ کیلومتر است. زمانی که اتصال دو سیستم جریان متناوب به دلیل مسایل پایداری سیستم و یا به این علت که فرکانس سیستمها متفاوت است، امکان پذیر نباشد، می توان از سیستم انتقال به صورت HVDC استفاده کرد. اولین استفاده تجاری مدرن از خطوط HVDC در سال ۱۹۵۴ میلادی روی داد که در آن زمان سرزمین سوئد و جزیره گاتلند<sup>۷</sup> با یک کابل زیر دریایی ۹۶ کیلومتری به یکدیگر متصل شدند.

با اختراع میدلهای تریستوری<sup>۸</sup>، سیستمهای انتقال HVDC بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. اولین استفاده از این نوع در سال ۱۹۷۲ میلادی در ایل ریور<sup>۹</sup> روی داد که در آن سیستمهای

- |                       |                                |                 |                         |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------|
| 1. RMS                | 2. Hydro Quebec                | 3. High Voltage | 4. Extra – high Voltage |
| 5. Mercury Arc Valves | 6. High Voltage Direct Current | 7. Gotland      |                         |
| 8. Thyristor          | 9. Eel River                   |                 |                         |

قدرت کبک و نیوبرنزویک<sup>۱</sup> به صورت دو طرفه به یکدیگر متصل شدند. با کاهش هزینه‌ها و ابعاد تجهیزات مبدلها، و نیز افزایش قابلیت اعتماد آنها، انتقال به صورت HVDC مورد توجه روزافزون قرار گرفته است.

اتصال شبکه‌های برق مؤسسات مجاور یکدیگر، معمولاً باعث بهبود قابلیت اطمینان<sup>۲</sup> و بهره‌برداری اقتصادی از سیستم می‌شود. بهبود قابلیت اطمینان به این دلیل رخ می‌دهد که شبکه‌های مجاور در شرایط اضطراری می‌توانند به یکدیگر کمک متقابل نمایند، حال آنکه نیاز کمتر به ظرفیت ذخیره<sup>۳</sup> در هر شبکه باعث بهبود بهره‌برداری اقتصادی می‌گردد. علاوه، اتصال، این امکان را فراهم می‌آورد که مؤسسات مجاور با یکدیگر تبادل اقتصادی توان داشته باشند و بدین وسیله از پر بازده‌ترین منابع تولید توان بهره‌مند گردند. این منافع از ابتدا تشخیص داده شده بود و بدین دلیل اتصالات روز به روز گسترده‌تر می‌شوند تا آنجا که اکنون، تقریباً همه مؤسسات برق در ایالات متحده آمریکا و کانادا بخشی از یک سیستم به هم پیوسته هستند. در نتیجه سیستم بسیار بزرگی با پیچیدگی فراوان ایجاد شده است. برآستی طراحی و بهره‌برداری مطمئن از چنین سیستمی مسائل پیچیده‌ای را به دنبال دارد.

## ۱-۲ ساختار سیستم قدرت

سیستم‌های قدرت از نظر اندازه و اجزای ساختاری با یکدیگر متفاوت هستند. با وجود این، مشخصه‌های اصلی مشابهی دارند:

- همگی در سیستم سه فاز جریان متناوب و در ولتاژ تقریباً ثابت بهره‌برداری می‌شوند. در بخشهای تولید و انتقال، از تجهیزات سه فاز استفاده می‌شود. بارهای صنعتی، همگی سه فاز هستند؛ حال آنکه بارهای خانگی و تجاری تک فاز، بین فازها به گونه‌ای توزیع می‌شوند که به طور مؤثر یک سیستم سه فاز متعادل را تشکیل دهند.
- همگی از ژنراتورهای سنکرون جهت تولید برق استفاده می‌کنند. چرخاننده‌ها، منابع اولیه انرژی (فسیلی، هسته‌ای و آبی) را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌نمایند که این انرژی به کمک ژنراتورهای سنکرون به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

● همگی، توان را از طریق مسافتهای طولانی به مصرف کننده‌هایی که در مناطق وسیعی پراکنده شده‌اند، انتقال می‌دهند. لازمه این موضوع، داشتن سیستم انتقالی شامل زیر سیستمهای متنوع است که در سطوح ولتاژ متفاوت بهره‌برداری شوند.

شکل ۱-۱ اجزای اصلی یک سیستم مدرن قدرت را به تصویر کشیده است. توان الکتریکی در نیروگاهها<sup>۱</sup> (GS) تولید می‌گردد و از طریق شبکه پیچیده‌ای شامل اجزای گوناگون از جمله خطوط انتقال، ترانسفورمرها و ابزار کلیدزنی<sup>۲</sup> به مصرف کننده‌ها منتقل می‌شود. معمول است که شبکه انتقال را به زیر سیستمهای زیر تقسیم نمایند:

۱ - سیستم انتقال

۲ - سیستم انتقال ثانویه (زیر انتقال)<sup>۳</sup>

۳ - سیستم توزیع<sup>۴</sup>

سیستم انتقال، تمام نیروگاههای اصلی و مراکز عمده مصرف در سیستم را به یکدیگر متصل می‌کند. این سیستم، استخوان‌بندی سیستم مجتمع قدرت را تشکیل می‌دهد و در بالاترین سطوح ولتاژ (به طور نمونه ۲۳۰ کیلوولت و بالاتر) مورد بهره‌برداری واقع می‌شود. ولتاژ ژنراتورها معمولاً در محدوده ۱۱ تا ۳۵ کیلوولت است. این ولتاژها ابتدا به سطح ولتاژ انتقال، تبدیل شده، توان به پستهای انتقال<sup>۵</sup> فرستاده می‌شود که در آنجا ولتاژ به سطح انتقال ثانویه (به طور نمونه ۶۹ تا ۱۳۸ کیلوولت) کاهش داده می‌شود. اغلب، قسمت تولید و زیر سیستمهای انتقال را به عنوان بخش عمده سیستم قدرت<sup>۶</sup> می‌شناسند.

سیستم انتقال ثانویه توان را در حجمی کمتر از پستهای انتقال به پستهای توزیع انتقال می‌دهد. معمولاً مصرف کننده‌های عمده و بزرگ صنعتی مستقیماً از طریق سیستم انتقال ثانویه تغذیه می‌شوند. در بعضی از سیستمها، مرز مشخصی را بین بخش انتقال و بخش زیر انتقال نمی‌توان قائل شد. زمانی که سیستم گسترش پیدا می‌کند و سطوح ولتاژ بالاتر جهت انتقال مورد نیاز واقع می‌شود، اغلب، خطوط قدیمی انتقال، نقش سیستم انتقال ثانویه را ایفا می‌نمایند.

سیستم توزیع آخرین مرحله را در انتقال توان به مصرف کننده‌ها نشان می‌دهد؛ ولتاژ اولیه

1. Generating Station

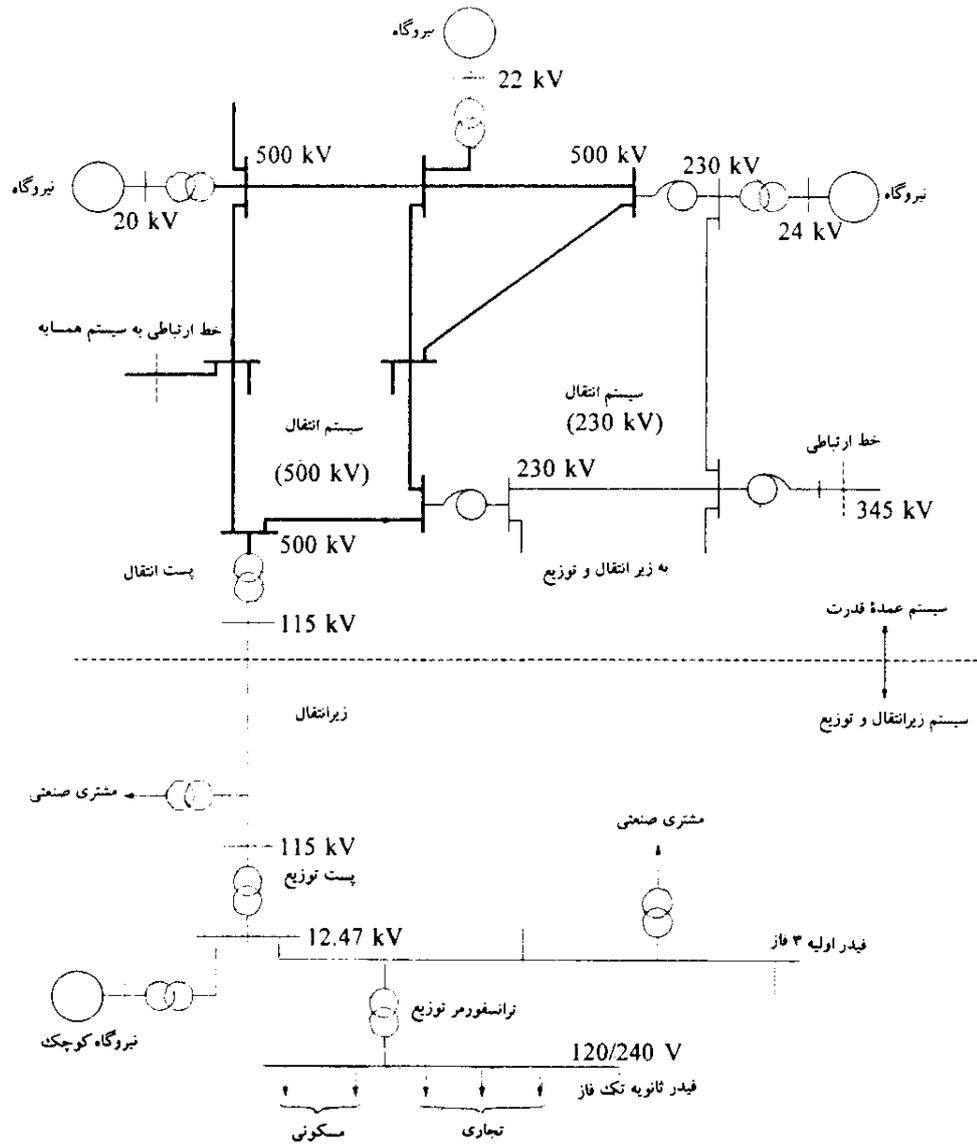
2. Switching Devices

3. Subtransmission

4. Distribution

5. Substation

6. Bulk Power System



شکل ۱-۱ عناصر اصلی سیستم قدرت

توزیع عموماً بین ۴ تا ۳۴/۵ کیلوولت قرار دارد. مصرف کننده‌های صنعتی کوچک، به وسیله فیدرهای اولیه‌ای در این سطح ولتاژ، تغذیه می‌شوند. فیدرهای ثانویه توزیع، مصرف کننده‌های صنعتی و تجاری را در ولتاژ ۱۲۰ یا ۲۴۰ ولت تغذیه می‌کنند.

واحدهای کوچک تولید، که نزدیک به مراکز مصرف قرار دارند، اغلب به طور مستقیم به سیستم انتقال ثانویه یا سیستم توزیع، متصل می‌گردند و معمولاً اتصال به سیستمهای قدرت مجاور، در سطح سیستم انتقال پیاده می‌شود.

از این رو سیستم قدرت از منابع چندگانه تولید و چندین طبقه شبکه انتقال تشکیل می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که از دید ساختاری، امکانات اضافه‌ای داشته باشیم تا سیستم را قادر سازد در برابر پیشامدهای<sup>۱</sup> غیر معمول بدون قطع خدمات به مصرف کننده‌ها، مقاوم باشد.

### ۱-۳ کنترل سیستم قدرت

وظیفه سیستم قدرت این است که انرژی را از یکی از صورتهای طبیعی موجود به صورت انرژی الکتریکی در آورد و آن را به نقاط مصرف منتقل نماید. انرژی بندرت به صورت الکتریکی مصرف می‌شود بلکه به شکل‌های دیگر از قبیل حرارت، روشنایی و انرژی مکانیکی تبدیل می‌گردد. حسن صورت الکتریکی انرژی، این است که می‌تواند براحتی منتقل شود و با درجه بالایی از بازده و قابلیت اعتماد، نسبتاً بسادگی کنترل شود. از این رو یک سیستم قدرت با طراحی و بهره‌برداری صحیح باید نیازهای اساسی ذیل را برآورده سازد:

۱. سیستم باید بتواند تقاضای بار حقیقی<sup>۲</sup> و راکتیو<sup>۳</sup> مرتباً در حال تغییر را تأمین نماید. برخلاف سایر انواع انرژی، انرژی الکتریکی را نمی‌توان براحتی در مقادیر زیاد ذخیره کرد. از این رو باید همیشه ذخیره چرخان<sup>۴</sup> کافی از توان حقیقی و راکتیو را حفظ و به طور مناسب کنترل کرد.

۲. سیستم باید انرژی را با کمترین هزینه و حداقل تأثیر زیست - محیطی تأمین نماید.

۳. کیفیت توان عرضه شده باید با توجه به عوامل زیر دارای حداقل استانداردهای لازم باشد:

(الف) تثبیت فرکانس؛

ب) تثبیت ولتاژ؛

ج) سطح قابلیت اعتماد.

به منظور تأمین نیازهای فوق، سطوح مختلف کنترل شامل مجموعه پیچیده‌ای از تجهیزات به کار گرفته می‌شود. این موضوع در شکل ۱-۲ نشان داده شده است که زیر سیستم‌های<sup>۱</sup> یک سیستم قدرت به همراه کنترل‌های مربوطه را نشان می‌دهد. در این ساختار کلی، کنترل‌کننده‌هایی وجود دارد که مستقیماً بر اجزای سیستم قدرت عمل می‌نمایند. در یک واحد تولید، این کنترل‌کننده‌ها شامل کنترل‌های چرخاننده اصلی<sup>۲</sup> (محرک) و سیستم تحریک<sup>۳</sup> است. کنترل‌کننده چرخاننده (محرک)، وظیفه تنظیم سرعت و کنترل متغیرهای سیستم تغذیه انرژی از قبیل: فشار، درجه حرارت و جریان سیال در دیگ بخار<sup>۴</sup> را به عهده دارد. وظیفه کنترل‌کننده در سیستم تحریک، تنظیم ولتاژ ژنراتور و توان راکتیو خروجی آن است. تضمین توان حقیقی خروجی مطلوب هر واحد، به کمک سیستم کنترل تولید انجام می‌پذیرد.

وظیفه اصلی سیستم کنترل تولید آن است که تعادل بین کل تولید سیستم از یک طرف و بار و تلفات را از طرف دیگر تأمین نماید به طوری که فرکانس مطلوب و سطح مورد نیاز تبادل توان با سیستم‌های مجاور را از طریق خطوط ارتباطی حفظ نماید.

کنترل‌کننده‌های بخش انتقال سیستم، شامل ابزاری است که توان و ولتاژ را کنترل می‌کنند که از آن جمله می‌توان از جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو<sup>۵</sup>، کندانسورهای سنکرون<sup>۶</sup>، خازن‌ها و راکتورهای قابل کلیدزنی<sup>۷</sup>، ترانسفورمرهای باتپ قابل تنظیم، ترانسفورمرهای تغییر دهنده فاز<sup>۸</sup> و سرانجام از کنترل‌کننده‌های خطوط فشار قوی جریان مستقیم (HVDC) نام برد.

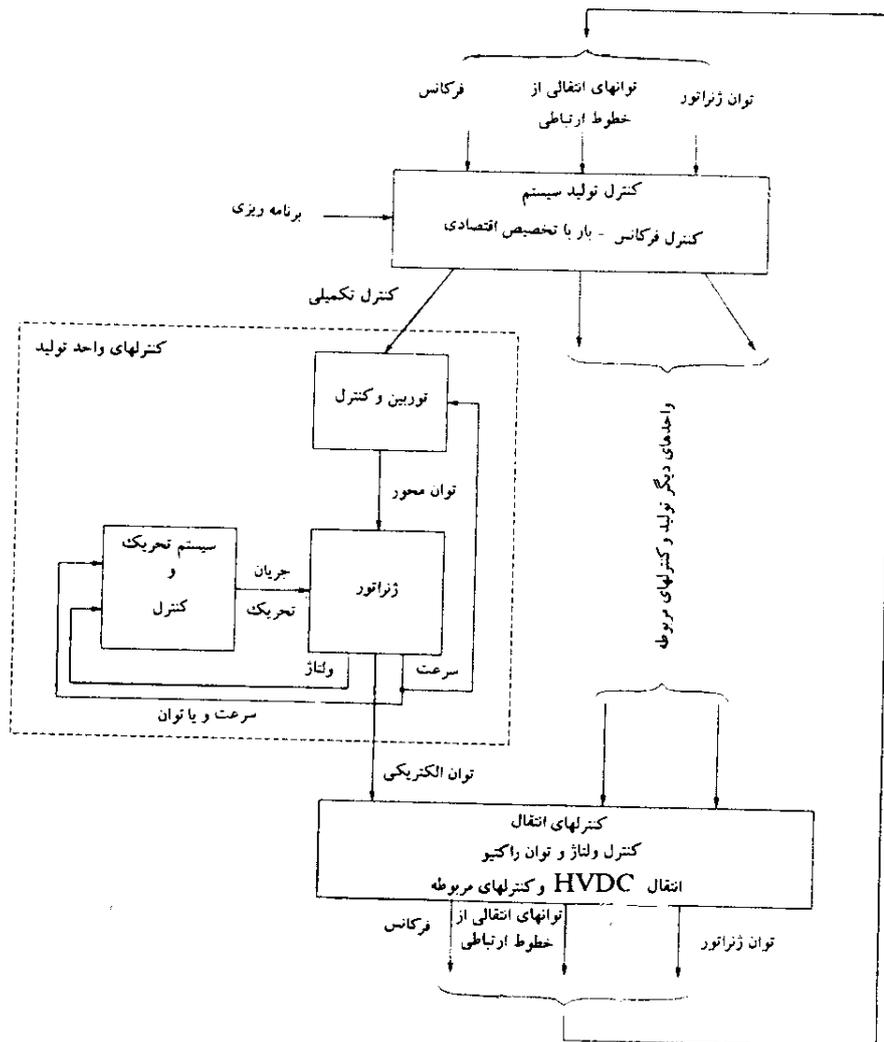
کنترل‌کننده‌های یادشده با حفظ ولتاژ، فرکانس و سایر متغیرهای سیستم در محدوده مجاز، بهره‌برداری مناسب از آن را عملی می‌سازند. همچنین این کنترل‌کننده‌ها، تأثیر زیادی بر عملکرد دینامیکی سیستم و قدرت مقابله آن با اغتشاشها دارند.

اهداف کنترل‌کننده‌ها بستگی به شرایط کاری و بهره‌برداری از سیستم قدرت دارد. در حالت

1. Subsystem      2. Prime Mover      3. Excitation      4. Boiler

5. Static Var Compensators      6. Synchronous Condensers

7. Switched Capacitors and Reactors      8. Phase - shifting



شکل ۱-۲ زیرسیستمهای سیستم قدرت و کنترل‌های مربوطه

عادی، هدف این است که در عین اینکه ولتاژ و فرکانس نزدیک به مقادیر اسمی باشند سیستم را با بازده هر چه بهتر مورد بهره‌برداری قرار داد. زمانی که وضعی غیر عادی اتفاق می‌افتد، اهداف جدیدی را باید مد نظر قرار داد تا بتوان هر چه سریعتر، سیستم را به حالت عادی بازگرداند. بندرت اتفاق می‌افتد که تنها یک اغتشاش جدی و بزرگ در سیستم منجر به وقفه‌ای عمده و فروپاشی سیستمی بظاهر مطمئن شود. چنین وقفه‌هایی معمولاً در اثر ترکیبی از پیشامدهایی روی می‌دهد که سیستم را مافوق توانایی‌اش، تحت فشار قرار می‌دهد. اغتشاشهای طبیعی سنگین (از جمله گردباد، توفانهای شدید و برف و یخبندان)، عملکرد ناصحیح تجهیزات، خطاهای انسانی و سرانجام طراحی نامناسب و ناکافی ممکن است با یکدیگر ترکیب شوند و سیستم قدرتی را تضعیف سازند به گونه‌ای که سرانجام به فروپاشی آن منجر شوند. این موضوع ممکن است به وقفه‌های متوالی<sup>۱</sup> بینجامد که باید برای جلوگیری از بروز خاموشیهای عمده، این وقفه‌ها را در بخشی کوچک از سیستم محدود کرد.

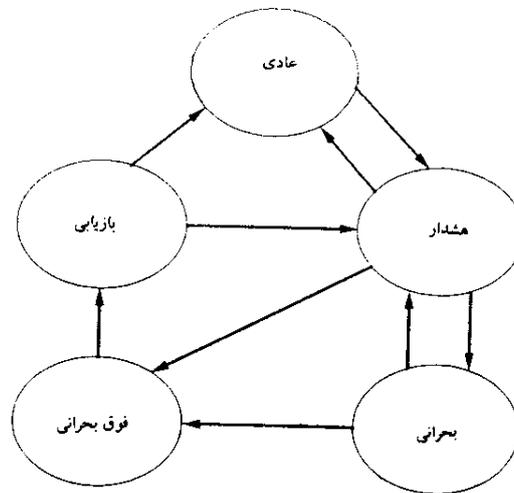
#### حالات بهره‌برداری<sup>۲</sup> یک سیستم قدرت و روشهای کنترل [۳، ۴]

به منظور بررسی قابلیت اطمینان سیستم قدرت و طراحی سیستمهای مناسب کنترلی، مفید است اگر حالات بهره‌برداری سیستم را به پنج حالت، عادی<sup>۳</sup>، هشدار<sup>۴</sup>، بحرانی<sup>۵</sup>، فوق بحرانی<sup>۶</sup> و بازیابی<sup>۷</sup>، تقسیم کرد. شکل ۱-۳ این حالتها و نیز نحوه انتقال از یک حالت به حالت دیگر را به تصویر کشیده است.

در شرایط عادی، تمام متغیرهای سیستم در محدوده مجاز واقع شده‌اند و بر هیچیک از تجهیزات، اضافه بار تحمیل نشده است. سیستم در حالتی مطمئن، بهره‌برداری می‌شود و قادر است اغتشاشی<sup>۸</sup> (پیشامدی) را بدون اینکه انحرافی از قیود ایجاد شود، تحمل نماید. اگر قابلیت اطمینان کمتر از حد مشخص قابل قبولی شود یا اینکه امکان بروز اغتشاشی (نظیر شرایط بد آب و هوایی مانند توفانهای شدید) افزایش یابد، سیستم وارد مرحله هشدار می‌شود. در این وضع، هنوز متغیرهای سیستم در محدوده مجاز واقع شده‌اند و تمام قیود رعایت گردیده‌اند. با

- |                      |                     |                |                |
|----------------------|---------------------|----------------|----------------|
| 1. Cascading Outages | 2. Operating States | 3. Normal      | 4. Alert       |
| 5. Emergency         | 6. In Extremis      | 7. Restorative | 8. Contingency |

وجود این، سیستم تا حدی تضعیف شده که ممکن است بروز یک اغتشاش باعث اضافه بار تجهیزات و در نتیجه وارد شدن سیستم به حالت بحرانی گردد. اگر اغتشاش بسیار شدید باشد، ممکن است سیستم، مستقیماً از وضعیت هشدار به وضعیت فوق بحرانی برسد.



شکل ۳-۱ حالات بهره برداری از سیستم قدرت

برای بازیابی سیستم به وضع عادی، می توان اعمالی را از جمله جابجایی تولید یا افزایش ظرفیت ذخیره به کار بست. اگر اینگونه اعمال موفق نباشد، سیستم همچنان در وضعیت هشدار باقی می ماند. اگر زمانی که سیستم در وضعیت هشدار است، اغتشاشی به اندازه کافی سخت<sup>۱</sup> اتفاق افتد، سیستم وارد مرحله بحرانی می شود. در این حالت، ولتاژ بسیاری از شینها کم و یا بارگذاری تجهیزات از حد نامی اضطراری کوتاه مدت<sup>۲</sup> فراتر رفته است. در این وضع، سیستم هنوز حالت فعال خود را حفظ کرده است و اگر بتوان با اعمال کنترلی لازم نظیر رفع خطا، کنترل

1. Severe      2. Short — term Emergency Rating

سیستم تحریک، باز و بست سریع شیرهای بخار و دریچه‌های آب، تولید زدایی، بکارگیری ظرفیت ذخیره، کمک گرفتن از خطوط فشار قوی جریان مستقیم و سرانجام بارزدایی به کمک آن شتافت ممکن است به حالت هشدار منتقل شود. اگر اعمال فوق اجرا نشود و یا اجرای آنها موفقیت آمیز نباشد، سیستم وارد حالت فوق بحرانی می‌گردد که نتیجه آن وقفه‌های متوالی و احتمالاً خاموشی بخش عمده‌ای از سیستم خواهد بود. در این وضع اعمال کنترلی از قبیل بارزدایی و پارگی تحت کنترل سیستم باید اجرا شود تا حتی المقدور بتوان آنرا از یک خاموشی فراگیر رهااند.

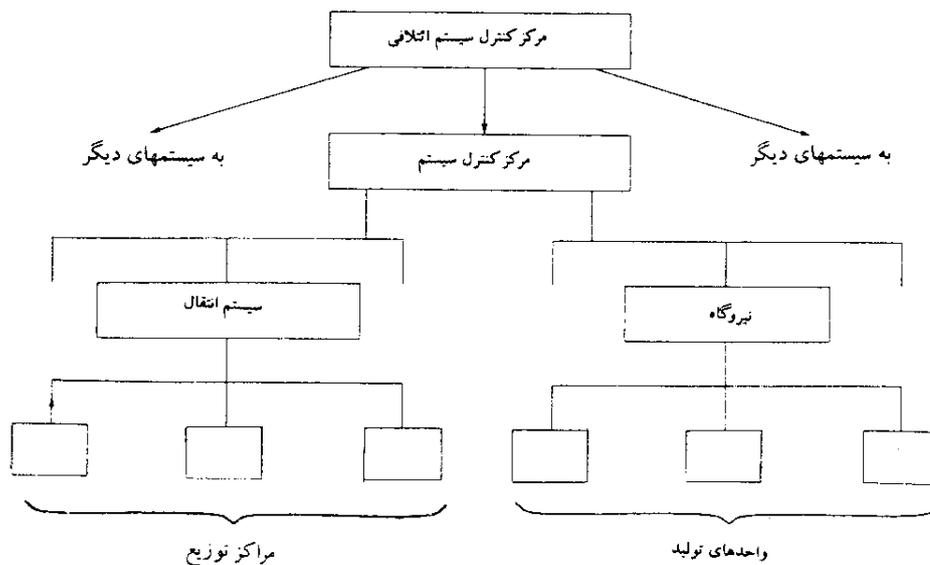
حالت بازیابی وضعی را نشان می‌دهد که در آن اعمال کنترلی به منظور وصل مجدد تجهیزات و بارها انجام می‌پذیرد و ممکن است سیستم، از این مرحله، بستگی به وضعیت، به حالت هشدار یا عادی منتقل شود.

تقسیم حالات کاری یک سیستم قدرت به پنج حالت فوق چارچوبی را فراهم می‌آورد که در آن می‌توان روشهای کنترلی مناسب را برگزید و اعمال اپراتورها را به منظور برخورد مؤثر با هر یک از آنها تنظیم و مشخص کرد.

برای سیستمی که به آن اغتشاش وارد شده و درجه قابلیت اطمینان آن کاهش یافته است، کنترل‌کننده‌های سیستم قدرت به اپراتور کمک می‌کند تا سیستم را به وضع عادی بازگرداند. اگر اغتشاش، کوچک باشد، کنترل‌کننده‌ها ممکن است خود قادر به انجام این کار باشند در غیر این صورت ممکن است اعمالی نظیر جابجایی تولید یا کلیدزنی اجزایی از سیستم ضروری باشد تا سیستم به وضع عادی بازگردد.

فلسفه تأمین نیازهای کنترلی گوناگون در حالت‌های متفاوت منجر به یک سیستم کنترلی سلسله مراتبی<sup>۱</sup> مطابق با شکل ۱-۴ شده است. در این ساختار، بعضی از کنترل‌کننده‌ها بر اجزای سیستم قدرت نظیر سیستمهای تحریک، محرکها (توربین)، دیگهای بخار، تغییردهنده‌های تپ ترانسفورمرها و کنورتورهای جریان مستقیم، مستقیماً عمل می‌نمایند. معمولاً نوعی کنترل‌کننده کلی وجود دارد که کنترل اجزای نزدیک و متصل به هم را، هماهنگ می‌نماید. این کنترل‌کننده‌ها به نوبه خود به وسیله کنترل‌کننده‌های سیستم در مراکز دیسپاچینگ هدایت

می‌شوند. کنترل‌کننده‌های سیستم، خود به وسیلهٔ مرکز کنترل سیستم ائتلافی<sup>۱</sup> هماهنگ می‌شوند. از این رو تمام سیستم کنترل به صورت گسترده<sup>۲</sup> است و بر انواع متفاوت و فراوان سیگنالهای کنترلی و سنجش شده از دور متکی است. سیستمهای کسب اطلاعات و کنترل نظارتی (SCADA)<sup>۳</sup>، اطلاعات مورد نیاز را برای نمایش وضعیت سیستم فراهم می‌آورند. برنامه‌های تخمین حالت<sup>۴</sup>، اطلاعات سنجش شده را پردازش کرده، تصویری دقیق از وضعیت سیستم را ارائه می‌دهند. اپراتور نقش مهم، کلیدی و ارتباطی را در سطوح مختلف این کنترل سلسله مراتبی ایفا می‌نماید. وظیفهٔ اصلی او



۴-۱ سلسله مراتب کنترل سیستم قدرت

۱. Pool: اگر سیستم برق چند کشور به هم متصل شود یا اینکه نظیر امریکا، شبکه برق از سیستمهای به هم متصل تشکیل گردد، می‌توانند تشکیل مجموعه‌ای اشتراکی دهند که به ائتلاف مشهور است (م).

2. Distributed
3. Supervisory Control and Data Acquisition
4. State Estimation

نظارت بر عملکرد سیستم و مدیریت منابع موجود است به گونه‌ای که در عین حفظ کیفیت و قابلیت اعتماد مورد نیاز، بهره‌برداری اقتصادی از سیستم را عملی سازد. در وضعیتهای بحرانی، اپراتور با هماهنگی کردن اطلاعات مربوطه از منابع مختلف و اتخاذ تصمیمهای مقتضی به منظور بازیابی سیستم، به وضع مطمئنتر بهره‌برداری، نقش اساسی و کلیدی را بازی می‌کند.

#### ۱-۴ معیارهای طراحی و بهره‌برداری برای پایداری

به منظور تأمین انرژی مطمئن برای مصرف‌کنندگان، باید سیستم قدرت، توانایی تحمل انواع گوناگون اغتشاشها را داشته، همچنان فعال باقی بماند. از این رو، باید سیستم را به نحوی مورد طرح و بهره‌برداری قرار داد که بتواند بدون قطع بار (بجز باری که به قسمت دارای خطا متصل است) اغتشاشهای بیشتر محتمل را تحمل نماید. بدین صورت شدیدترین اغتشاشهای ممکن نیز منجر به قطعی برقی غیر قابل کنترل، گسترده و متوالی نخواهد شد.

خاموشی کامل در نوامبر سال ۱۹۶۵ میلادی در بخش شمالی ایالات متحده آمریکا و اُنتاریو<sup>۱</sup> تأثیر عمیقی بر صنعت برق، بخصوص در شمال آمریکا گذاشت. سؤالات زیادی در خصوص معیارهای طراحی و برنامه‌ریزی مطرح گردید. این موضوع سرانجام منجر به تشکیل شورای ملی قابلیت اعتماد سیستم قدرت<sup>۲</sup> (NERC) در سال ۱۹۶۸ میلادی گردید. هدف این شورا، افزایش قابلیت اعتماد و کفایت سیستمهای قدرت در آمریکای شمالی بود. NERC از ۹ شورای منطقه‌ای تشکیل شده که تقریباً تمام سیستمهای قدرت در آمریکا و کانادا را در بر می‌گیرد. معیارهای قابلیت اعتماد به منظور طراحی و بهره‌برداری سیستم به وسیله هر شورای منطقه‌ای تعیین می‌شود. به علت تفاوت‌های موجود از نظر جغرافیایی، الگوی بار و منابع تولید، این معیارها در مناطق مختلف تا حدی متفاوت است. معیارهای طراحی و بهره‌برداری نقشی اساسی را در جلوگیری از بروز اغتشاشهای عمده‌ای که ممکن است به دنبال پیشامدهای سخت اتفاق افتد، ایفا می‌نماید. استفاده از این معیارها، ما را مطمئن می‌کند که سیستم در مقابل تمام اغتشاشهای محتمل، در بدترین وضع از حالت عادی به حالت هشدار تغییر وضعیت خواهد داد و هیچگاه به حالت‌های بحرانی و فوق بحرانی نخواهد رسید. زمانی که سیستم وارد مرحله هشدار

1. Ontario

2. National Electric Reliability Council

شود، اپراتورها می‌توانند اقدامات لازم را برای بازگرداندن سیستم به حالت عادی انجام دهند. مثال زیر نمونه‌ای از معیارهای طراحی و بهره‌برداری مربوط به پایداری سیستم را بر اساس شورای هماهنگی شمال شرق<sup>۱</sup> (NPCC) [۶] نشان می‌دهد. در اینجا سعی بر این نیست که تمام معیارها مجدداً آورده شود بلکه هدف این است که نمونه‌ای از انواع اغتشاشها و پیشامدهایی را که برای ارزیابی پایداری استفاده می‌شود، مطرح گردد.

#### ارزیابی پایداری در مقابل پیشامدهای معمولی

بر اساس معیارهای NPCC از دیدگاه پایداری لازم است که سیستم در طی و بعد از وقوع شدیدترین اغتشاشها، که ذیلاً آورده می‌شود، و با توجه به تجهیزات باز بست<sup>۲</sup>، مقاوم باقی بماند. این اغتشاشها و پیشامدها بر این اساس انتخاب شده‌اند که با توجه به تعداد زیاد اجزای تشکیل دهنده سیستم قدرت، احتمال وقوع بیشتری دارند:

(الف) اتصال کوتاه دائم سه فاز بر هر ژنراتور، خط انتقال، ترانسفورمر یا شین، با رفع در

زمان عادی و با توجه به تجهیزات باز بست؛

(ب) اتصال کوتاه دائم همزمان فاز به زمین بر دو فاز متفاوت دو خط انتقال مجاور متصل

به یک دکل چند مداره، با رفع در زمان عادی؛

(ج) اتصال کوتاه فاز به زمین بر هر خط انتقال، ترانسفورمر یا شین با رفع تأخیری به

علت عملکرد ناصحیح کلیدها<sup>۳</sup>، رله‌ها یا کانال مخابراتی؛

(د) از دست دادن هر یک از اجزای بدون وقوع خطا؛

(ه) اتصال کوتاه دائم فاز به زمین بر یک کلید، با رفع در زمان عادی؛

(و) از دست دادن دائم همزمان هر دو قطب یک وسیله دو قطبی<sup>۴</sup> جریان مستقیم.

بر اساس این معیارها به دنبال هر یک از پیشامدهای مذکور، باید پایداری سیستم حفظ شود و ولتاژها و بارگذاری خطوط و تجهیزات در محدوده مجاز باقی بماند. معیارها در دو وضعیت پایه زیر اعمال می‌شوند:

1. Northeast Power Coordinating Council      2. Reclosing      3. Circuit Breaker  
4. Bipolar

۱. تمام تجهیزات در مدار هستند.
۲. یک ژنراتور، خط انتقال و یا ترانسفورمر کلیدی خارج از مدار است با این فرض که تولید و توانهای انتقالی ناحیه، بین وقفه‌ها با استفاده از یک ذخیره ۱۰ دقیقه‌ای، تنظیم شده‌اند.

#### ارزیابی پایداری در مقابل پیشامدهای شدید

بر اساس معیارهای NPCC، ممکن است سیستم در معرض پیشامدهایی واقع شود که شدیدتر از پیشامدهای معمولی که قبلاً ذکر شد، باشد. هدف این است که مشخص شود که تأثیر این پیشامدهای شدید بر عملکرد سیستم چیست به گونه‌ای که بتوان قدرت سیستم را ارزیابی کرد و تعیین نمود که تا چه حد، اغتشاش می‌تواند گسترده گردد، هر چند که احتمال وقوع این پیشامدهای شدید بسیار کم است. بعد از بررسی و ارزیابی اینگونه پیشامدها باید در صورت امکان اقدامات لازم را به کار بست تا احتمال وقوع چنین پیشامدهایی را کاهش داد و یا عواقبی را که ممکن است به دلیل وقوع آنها ایجاد شود، تخفیف داد. پیشامدهای شدید شامل موارد ذیل است:

- الف) از دست دادن تمام ظرفیت یک نیروگاه؛
- ب) قطع تمام خطوط منشعب از یک پست نیروگاه یا یک پست کلید زنی؛
- ج) قطع تمام خطوط انتقال یک مسیر تأمین مشترک؛
- د) اتصال کوتاه دائم سه فاز بر هر ژنراتور، خط انتقال، ترانسفورمر یا شین، با رفع تأخیری و با توجه به تجهیزات باز بست؛
- ه) از دست دادن ناگهانی یک بار عمده یا یک مرکز عمده بار؛
- و) تأثیر نوسانهای شدید توان که در اثر اغتشاشهای خارج از محدوده سیستم NPCC اتفاق افتاده؛
- ز) وقفه با عملکرد ناصحیح یک سیستم حفاظتی خاص نظیر سیستم حذف تولید، سیستم باربرداری یا سیستم قطع خطوط.

### طراحی سیستم از دیدگاه پایداری

طراحی یک سیستم بزرگ به هم پیوسته قدرت به نحوی که با حداقل هزینه بهره‌برداری، از پایداری آن اطمینان حاصل شود، مسأله بسیار پیچیده‌ای است و اگر بتوان این مسأله را حل کرد، منافع اقتصادی بیشماری بر آن مترتب است. از دیدگاه نظریه کنترل، سیستم قدرت فرایندی از درجه بسیار بالا و چند متغیره است که در یک محیط دائماً در حال تغییر، کار می‌کند. به علت درجه بالا و پیچیدگی سیستم لازم است که ساده‌سازیهایی صورت پذیرد و هر مسأله مشخص را با جزئیات صحیح و لازم از مدلسازی سیستم مورد ارزیابی و بررسی قرار داد. لازمه این امر آن است که از مشخصه‌های کلی سیستم و نیز تک‌تک اجزای آن اطلاعات کافی و مناسب وجود داشته باشد.

سیستم قدرت یک سیستم بسیار غیر خطی است که عملکرد دینامیکی آن تحت تأثیر مجموعه وسیعی از تجهیزات تشکیل دهنده آن قرار دارد که هر یک، عکس العمل زمانی و مشخصه متفاوتی دارند. پایداری سیستم را نباید به صورت یک مسأله بلکه باید از دیدگاههای مختلف مورد توجه قرار داد. در فصل آینده انواع گوناگون پایداری سیستمهای قدرت شرح داده خواهد شد.

تقریباً مشخصه هر یک از اجزای اصلی سیستم قدرت بر پایداری آن تأثیر می‌گذارد. اطلاع کافی از این مشخصه‌ها برای درک و مطالعه پایداری سیستم قدرت ضروری است. از این رو مدلسازی و مشخصه‌های تجهیزات در بخش دوم کتاب مورد بررسی قرار می‌گیرد. پیچیدگی جنبه‌های فیزیکی انواع مختلف پایداری سیستم، روشهای بررسی آنها و اقدامات خاص به منظور بهبود عملکرد پایداری سیستم قدرت، در بخش سوم کتاب عرضه شده است.

## منابع

- [1] H.M. Rustebakke (editor), *Electric Utility Systems and Practices*. John Wiley & Sons, 1983.
- [2] C.A. Gross, *Power System Analysis*, Second Edition. John Wiley & Sons, 1986.
- [3] L.H. Fink and K. Carlsen, "Operating under Stress and Strain," *IEEE Spectrum*, pp. 48-53, March 1978.
- [4] EPRI Report EL 6360-L, "Dynamics of Interconnected Power Systems: A Tutorial for System Dispatchers and Plant Operators," Final Report of Project 2473-15, prepared by Power Technologies Inc., May 1989.
- [5] IEEE Special Publication 77 CH 1221-1-PWR, *Symposium on Reliability Criteria for System Dynamic Performance*, 1977.
- [6] Northeast Power Coordinating Council, "Basic Criteria for Design and Operation of Interconnected Power Systems," October 26, 1990 revision.



## فصل دوم

### مقدمه‌ای بر مسأله پایداری سیستمهای قدرت

در این فصل به معرفی کلی مسأله پایداری قدرت شامل مفاهیم فیزیکی، طبقه‌بندی و تعاریف واژه‌های مربوطه پرداخته می‌شود. بررسی ساختارهای ابتدایی سیستم قدرت با استفاده از مدل‌سازی ایده‌آل، ویژگیهای اساسی پایداری سیستم قدرت را نشان می‌دهد. به علاوه، بر پیدایش انواع مسائل پایداری که در حین تکامل سیستمهای قدرت شکل گرفته، ضروری شده، بسط و توسعه روشهای مطالعه آنها شرح داده خواهد شد. هدف این است که دیدگاهی کلی از پدیده پایداری سیستم قدرت عرضه شود و پایه لازم بر اساس دلایل فیزیکی نسبتاً ساده بنیانگذاری گردد. این موضوع کمک خواهد کرد که در فصول آینده به بررسی جامع موضوع از جنبه‌های مختلف پرداخته شود.

#### ۲ - ۱ مفاهیم اولیه و تعاریف

پایداری سیستم قدرت را می‌توان به طور کلی آن ویژگی از سیستم قدرت دانست که آن را قادر می‌سازد تا تحت وضع عادی، در حالت تعادل باقی بماند و در صورتی که تحت تأثیر اغتشاشی قرار گیرد، مجدداً حالت قابل قبول متفاوتی را به دست آورد. ناپایداری در یک سیستم قدرت ممکن است بستگی به ترکیب سیستم و حالت کاری آن به شکلهای مختلفی بروز کند. معمول بوده است که مسأله پایداری را به عنوان مسأله حفظ عملکرد سنکرون ژنراتورها بشناسند. از آنجا که تولید در سیستم قدرت بر پایه ماشینهای سنکرون (ژنراتورها) استوار است، شرط لازم



## فصل سوم

### نظریه و مدل‌سازی ماش‌های سنکرون

ژنراتورهای سنکرون، منابع عمدهٔ تأمین انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت هستند. بارهای بزرگ زیادی به وسیلهٔ موتورهای سنکرون به حرکت در می‌آیند. گاهی از کندانسورهای سنکرون<sup>۱</sup> به عنوان وسیلهٔ تأمین توان راکتیو و کنترل ولتاژ استفاده می‌شود. اساس کار این تجهیزات مشابه هم است و در مجموع از آنها به نام ماشینهای سنکرون یاد می‌شود. همچنان‌که در فصل دوم مطرح شد، مسألهٔ پایداری سیستم قدرت به طور عمده، حفظ حالت سنکرونیزه بین ماشینهای سنکرون به هم پیوسته است. از این رو، درک مشخصه و مدل‌سازی دقیق عکس‌العمل دینامیکی آنها، اهمیت زیادی در مطالعه پایداری سیستم‌های قدرت دارد.

مدلسازی و بررسی ماشینهای سنکرون همیشه مورد توجه بوده است. دربارهٔ این مسأله در دههٔ ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ میلادی کار زیادی انجام پذیرفت [۱، ۲، ۳] و حتی در سالهای اخیر مورد بررسی واقع شده است [۴ تا ۹]. همچنین نظریهٔ و عکس‌العمل ماشینهای سنکرون در بعضی کتب بیان شده است [۱۰ تا ۱۴]. در این فصل، مدل ریاضی یک ماشین سنکرون به طور مشروح و عملکرد حالت ماندگار و گذرای آن به طور خلاصه، مورد بحث قرار می‌گیرد.

برای عملکرد قابل قبول سیستم این است که همه ماشینهای مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون یا هماهنگ باقی بمانند. این جنبه پایداری تحت تأثیر دینامیک روابط زاویه روتور و توان حقیقی - زاویه ژنراتور قرار دارد.

همچنین ممکن است سیستم بدون آنکه سنکرون از دست برود، ناپایدار شود. به عنوان مثال ممکن است سیستمی شامل یک ماشین سنکرون که از طریق یک خط انتقال، یک موتور القایی را تغذیه می‌کند، در اثر فروپاشی<sup>۱</sup> ولتاژ بار، ناپایدار شود. حفظ عملکرد سنکرون در این حالت مطرح نیست بلکه مسأله پایداری و حفظ ولتاژ است. این نوع ناپایداری می‌تواند در مورد بارهایی که در یک محدوده وسیع قرار دارند و از یک سیستم بزرگ تغذیه می‌شوند نیز اتفاق افتد.

در ارزیابی پایداری، مسأله مهم رفتار سیستم در زمانی است که تحت تأثیر یک اغتشاش<sup>۲</sup> گذرا قرار گیرد. اغتشاش ممکن است کوچک یا بزرگ باشد. اغتشاشهای کوچک به شکل تغییرات بار دائماً اتفاق می‌افتد و سیستم خود را با وضعیت متغیر حاصل، تنظیم می‌کند. سیستم باید قادر باشد که تحت این حالت، عملکرد قابل قبولی داشته باشد و بتواند حداکثر مقدار بار را تأمین نماید. نیز باید بتواند در مقابل اغتشاشهای سخت از قبیل اتصال کوتاه یک خط انتقال، از دست دادن یک ژنراتور یا بار بزرگ و یا از دست دادن خط ارتباطی بین دو زیر سیستم، مقاوم باقی بماند. عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش عمدتاً ناشی از نحوه عملکرد تجهیزات تشکیل دهنده آن است. به عنوان مثال، اتصال کوتاهی که بر یک جزء حساس واقع می‌شود و آن جزء به وسیله رله‌های محافظ از سیستم جدا می‌گردد، باعث می‌شود که تغییراتی را در توانهای انتقالی خطوط ارتباطی، سرعت‌های روتور ژنراتورها و ولتاژ شینها داشته باشیم. تغییرات ولتاژ خود باعث عملکرد تنظیم کننده‌های ولتاژ ژنراتورها و سیستم انتقال می‌شود، حال آنکه تغییرات سرعت روتور ژنراتورها، گاورنر محرکها (توربینها) را به عکس‌العمل وامی‌دارد. تغییرات در توانهای انتقالی خطوط ارتباطی ممکن است سیستمهای کنترل تولید را به کار اندازد. تغییرات ولتاژ و فرکانس باعث می‌شود که بستگی به مشخصات آنها، بارهای سیستم به درجات متفاوتی تغییر نماید. به علاوه، سیستمهای محافظ اجزا ممکن است نسبت

1. Collapse

2. Disturbance

به تغییرات در متغیرهای سیستم، عکس‌العمل نشان دهد و بدینگونه بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد. با وجود این، در هر وضع بخصوص، عکس‌العمل تعداد محدودی از تجهیزات ممکن است قابل توجه باشد. از این رو معمولاً فرضیات زیادی انجام می‌پذیرد تا مسأله، ساده شود و بتوان کار را بر روی عواملی که بر روی یک مسأله پایداری بخصوص تأثیر می‌گذارند، متمرکز کرد. درک مسائل پایداری را می‌توان تا حد زیادی با طبقه‌بندی آن به انواع مختلف، تسهیل کرد. بخشهایی که به دنبال می‌آید انواع مختلف ناپایداری سیستم‌های قدرت به همراه مفاهیم مربوط و نیز در موارد لازم، ترکیب ساده سیستم قدرت را مطرح می‌نماید. بررسی چنین سیستمهایی با استفاده از مدل‌های ایده‌آل کمک می‌نماید تا ویژگیهای اساسی هر شکل از شکلهای پایداری را تشخیص داد.

## ۲-۱-۱ پایداری زاویه‌ای روتور<sup>۱</sup>

پایداری زاویه‌ای روتور توانایی ماشیهای به هم پیوسته سنکرون یک سیستم قدرت است که در حالت سنکرون با یکدیگر باقی بمانند. مسأله پایداری در این حالت شامل مطالعه نوسانهای الکترومکانیکی است که به طور ذاتی در سیستمهای قدرت وجود دارد. عامل مهم در این مسأله، نحوه رفتار توانهای خروجی ماشیهای سنکرون در مقابل نوسانهای روتور آنهاست. در گام اول، بحث کوتاهی در خصوص مشخصه‌های ماشیهای سنکرون می‌تواند در درک مفاهیم اولیه مربوطه، مفید واقع شود.

### مشخصه‌های ماشیهای سنکرون

مشخصه‌ها و مدلسازی ماشیهای سنکرون به طور مفصل در فصول سوم، چهارم و پنجم مطرح خواهد شد. در اینجا بحث به مشخصه‌های اولیه مربوط به عملکرد سنکرون محدود می‌شود.

یک ماشین سنکرون دو جزء اساسی شامل تحریک و آرمیچر دارد. معمولاً، تحریک روی روتور و آرمیچر روی استاتور واقع است. سیم پیچ تحریک با استفاده از جریان مستقیم تغذیه

می‌شود. زمانی که روتور را با یک محرک (توربین) بچرخانیم، میدان مغناطیسی دوار سیم پیچ تحریک، ولتاژهای متناوبی در سه فاز سیم پیچهای آرمیچر استاتور، القا می‌نماید. فرکانس ولتاژ متناوب القا شده و جریانهای حاصل در سیم پیچهای استاتور (زمانی که بار به آنها متصل است) بستگی به سرعت روتور دارد. از این رو مشاهده می‌شود که فرکانس متغیرهای الکتریکی استاتور با سرعت مکانیکی روتور، سنکرون یا هماهنگ شده‌اند. از این روست که واژه ماشین سنکرون به کار می‌رود.

زمانی که دو یا چند ماشین سنکرون به یکدیگر متصل می‌شوند، باید ولتاژ و جریان استاتور همه ماشینها دارای یک فرکانس باشند و سرعت مکانیکی هر یک با این فرکانس، هماهنگ باشد. از این رو روتور تمام ماشینهای سنکرون به هم پیوسته، باید با یکدیگر سنکرونیزه باشند.

ترکیب فیزیکی (توزیع فضایی) سیم پیچهای آرمیچر استاتور به گونه‌ای است که جریانهای متغیر با زمانی که از سیم پیچهای سه فاز عبور می‌کنند، در حالت ماندگار<sup>۱</sup> میدان مغناطیسی دوار را ایجاد می‌کنند که با سرعت روتور می‌چرخد (به فصل سوم بخش ۳-۱-۳ مراجعه شود). میدانهای روتور و استاتور بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند و از اینکه دو میدان سعی می‌کنند در یک جهت قرار گیرند، گشتاور الکترو مغناطیسی ایجاد می‌شود. در یک ژنراتور، این گشتاور با جهت حرکت روتور مقابله می‌کند به گونه‌ای که لازم است گشتاوری مکانیکی به وسیله توربین اعمال شود تا چرخش روتور همچنان حفظ گردد. گشتاور (یا توان) الکتریکی خروجی ژنراتور تنها زمانی تغییر می‌کند که گشتاور ورودی مکانیکی که به وسیله محرک اعمال می‌شود، تغییر نماید. تأثیر افزایش گشتاور مکانیکی آن است که روتور را در وضعیت جدیدی قرار می‌دهد که نسبت به میدان دوار مغناطیسی استاتور جلوتر واقع می‌شود. یا برعکس، کاهش گشتاور یا توان مکانیکی ورودی، روتور را عقبتر از میدان دوار مغناطیسی استاتور قرار می‌دهد. در حالت ماندگار، میدان روتور و میدان دوار حاصل از جریانهای استاتور دارای سرعت مشابه هستند. با وجود این، مقداری اختلاف زاویه‌ای بین آنها وجود دارد که بستگی به گشتاور (توان) خروجی الکتریکی ژنراتور دارد.

1. Steady State

در یک موتور سنکرون نقش گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی نسبت به آنچه که در ژنراتور وجود دارد، جابجا می‌شود. گشتاور الکتریکی چرخش را حفظ می‌کند حال آنکه بار مکانیکی با چرخش، مخالفت می‌کند. افزایش بار مکانیکی باعث عقب افتادن موقعیت روتور نسبت به میدان دوار استاتور می‌شود.

در بحث فوق دو واژه توان و گشتاور تماماً استفاده شد. این مسأله در فرهنگ پایداری سیستم‌های قدرت رایج است زیرا که سرعت چرخشی متوسط ماشینها ثابت است هر چند که ممکن است تغییرات زودگذری، بالا و پایین سرعت سنکرون اتفاق افتد. در حقیقت مقادیر توان و گشتاور در مبنای واحد<sup>۱</sup>، تقریباً با هم مساوی است.

#### رابطه توان - زاویه

مشخصه مهمی که در خصوص پایداری سیستم قدرت اهمیت دارد رابطه بین توان مبادله شده و موقعیت زاویه‌ای روتور ماشینهای سنکرون است. این رابطه بشدت غیر خطی است. برای نشان دادن موضوع، سیستم ساده شکل ۲-۱ "الف" را در نظر بگیرید. این سیستم شامل دو ماشین سنکرون است که از طریق خط انتقالی باراکتانس  $X_L$  به یکدیگر متصل شده‌اند. از مقاومت و ظرفیت خازنی خط صرف نظر شده است. فرض کنید که ماشین شماره ۱ ژنراتور سنکرونی است که ماشین شماره ۲ را، که یک موتور سنکرون است، تغذیه می‌کند. توان انتقال یافته از ژنراتور به موتور تابعی از زاویه  $\delta$  است که اختلاف زاویه بین روتورهای دو ماشین را نشان می‌دهد. زاویه  $\delta$  خود از سه مؤلفه تشکیل شده است: یکی زاویه داخلی ژنراتور به نام  $\delta_G$  (که زاویه‌ای است که روتور ژنراتور نسبت به میدان حاصل از استاتور آن جلوتر است)، دیگری  $\delta_L$ ، اختلاف زاویه بین ولتاژهای پایانه ژنراتور و موتور (یعنی زاویه‌ای که میدان استاتور ژنراتور از میدان استاتور موتور جلوتر است) و دیگری  $\delta_M$ ، زاویه داخلی موتور (که زاویه‌ای است که روتور موتور نسبت به میدان حاصل از استاتور عقبتر است). شکل ۲-۱ "ب" مدلی از سیستم را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان رابطه توان - زاویه را به دست آورد. برای هر ماشین، مدل ساده‌ای شامل یک منبع داخلی ولتاژ و یک راکتانس مؤثر فرض شده است. مقدار راکتانس



ماشین، بستگی به نوع مطالعه‌ای دارد که در پی آن هستیم. برای مطالعات حالت ماندگار، کافی است که راکتانس سنکرون ماشین را به همراه ولتاژ تحریک به عنوان منبع داخلی ولتاژ به کاربرد. اساس لازم برای چنین مدلی و تقریبهایی را که در آن به کار رفته در فصل سوم بیان خواهیم کرد. نمودار فازوری که ارتباط بین ولتاژها را نشان می‌دهد در شکل ۱-۲ "ج" نشان داده شده است. توان انتقالی از ژنراتور به موتور برابر است با:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (1-2)$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad \text{که:}$$

رابطه توان - زاویه در شکل ۱-۲ "د" رسم شده است. بامدلهای نسبتاً ایده‌آلی که برای ماشینها فرض شد، رابطه به دست آمده به صورت سینوسی است که رابطه‌ای کاملاً غیرخطی را نشان می‌دهد. با مدلهای دقیقتر ماشین، که تأثیر سیستمهای تحریک (تنظیم‌کننده‌های خودکار ولتاژ<sup>۱</sup>) را نیز در نظر گرفته، رابطه توان - زاویه به میزان زیادی از حالت سینوسی خارج می‌شود اما به هر حال شکل کلی آن باز هم مشابه است.

زمانی که زاویه صفر است هیچ توانی مبادله نمی‌شود. هر چه زاویه افزایش داده شود توان نیز افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود برسد. اگر زاویه از  $90^\circ$  بیشتر شود، توان، کاهش می‌یابد. از این رو در حالت ماندگار می‌توان حداکثر توانی مشخص را از ژنراتور به موتور منتقل کرد. مقدار این توان مستقیماً با ولتاژهای داخلی ژنراتور و موتور و به طور معکوس با مجموع راکتانسهای هر دو ماشین و خط انتقال، متناسب است.

زمانی که بیش از دو ماشین وجود داشته باشد، موقعیت نسبی روتورها نسبت به هم بر تبادلی توان به طور مشابهی تأثیر می‌گذارد. با وجود این، مقادیر حداکثر توانهای مبادله شده و اختلاف زوایا تابعی پیچیده از توزیع، تولید و بار است. اختلاف زاویه  $90^\circ$  بین هر دو ماشین (که در مورد حالت دو ماشین محدودکننده بود) به خودی خود هیچ اهمیت مشخصی ندارد.

## پدیده پایداری

پایداری حالت تعادل بین نیروهای متضاد را نشان می‌دهد. مکانیزمی که به وسیله آن ماشینهای سنکرون به هم پیوسته، حالت سنکرون را بین یکدیگر حفظ می‌کنند از طریق نیروهای بازیافت است که، زمانی عمل می‌نمایند که نیروهایی وجود داشته باشد تا یک یا چند ماشین را نسبت به سایر ماشینها شتاب مثبت یا منفی دهد. در حالت ماندگار، تعادل بین گشتاور مکانیکی ورودی و گشتاور الکتریکی خروجی وجود دارد و سرعت، ثابت باقی می‌ماند. اگر سیستم دستخوش تغییر شود این تعادل از بین می‌رود و در نتیجه روتور ماشینها بر اساس قوانین حرکت اجسام دوار، شتاب مثبت یا منفی پیدا می‌کند. اگر به طور موقت ژنراتوری نسبت به دیگری سریعتر بچرخد، موقعیت زاویه‌ای روتور آن نسبت به ماشین کندتر، جلوتر قرار می‌گیرد. بسته به رابطه توان - زاویه، اختلاف زاویه بین روتور دو ماشین باعث می‌شود تا بخشی از پار ماشین بکشد به ماشین تند منتقل شود. این موضوع سبب می‌شود که اختلاف سرعت و در نتیجه اختلاف زاویه روتورها کاهش یابد. همچنان که ذکر شد، رابطه توان - زاویه بشدت غیر خطی است. بالاتر از حد مشخصی، افزایش در اختلاف زاویه، باعث کاهش در توان مبادله شده می‌شود. این موضوع سبب می‌شود که اختلاف زاویه باز هم بیشتر شود و منجر به ناپایداری گردد. در هر وضعیت بخصوص، پایداری سیستم به این بستگی دارد که آیا انحرافات زوایای روتور ماشینها منجر به گشتاورهای بازیافت کافی می‌شود یا خیر. زمانی که یک ماشین سنکرون، حالت سنکرونیزه یا هماهنگ خود با سایر ماشینها را از دست داد، روتور آن در سرعتی بالاتر یا پایینتر از سرعتی که برای تولید ولتاژ در فرکانس سیستم لازم است، می‌چرخد. لغزش<sup>۱</sup> بین میدان دوار استاتور (مربوط به فرکانس سیستم) و تحریک روتور منجر به تغییرات بزرگی در توان خروجی، جریان و ولتاژ ماشین می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که سیستمهای حفاظتی، ماشین ناپایدار را از سیستم جدا کنند.

از دست رفتن حالت سنکرونیزه ممکن است بین یک ماشین و بقیه سیستم یا بین گروهی از ماشینها اتفاق افتد. در حالت دوم، ممکن است بعد از جدایی گروهها از یکدیگر، حالت سنکرونیزه بین ماشینهای هر گروه را حفظ کرد.

عملکرد سنکرونیزه ماشینهای سنکرون به هم پیوسته را می‌توان به مجموعه‌ای از خودروهایی تشبیه کرد که به کمک تسمه‌های لاستیکی به یکدیگر متصل شده‌اند و در یک مسیر دایره‌وار می‌چرخند. روتور ماشینهای سنکرون به خودرو و خطوط انتقال به تسمه تشبیه شده است. زمانی که خودروها با یکدیگر هم‌نوا و هم سرعت باشند تسمه‌های لاستیکی دست نخورده باقی می‌مانند. زمانی که نیروی یکی از خودروها افزایش یابد، سرعت آن نیز موقتاً افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود که تسمه متصل به آن کش بیاید که در نتیجه سرعت آن کاهش و سرعت سایر خودروها افزایش می‌یابند. بدین ترتیب عکس‌العملی زنجیروار اتفاق می‌افتد تا مجدداً تمام خودروها در سرعت مشابه ادامه طریق دهند. اگر نیروی وارده به یکی از تسمه‌ها از حد توانایی آن بیشتر شود، پاره می‌شود و باعث می‌شود که یک یا چندین خودرو از سایر خودروها جدا شوند.

در سیستمهای قدرت می‌توان با بروز اغتشاش، تغییرات گشتاور الکتریکی یک ماشین سنکرون را، به دو مؤلفه تجزیه کرد:

$$\Delta T_e = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2-2)$$

که  $T_S \Delta \delta$  مؤلفه‌ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات زاویه روتور،  $\Delta \delta$ ، همفاز است و از آن به نام مؤلفه گشتاور سنکرون کننده<sup>۱</sup> یاد می‌شود.  $T_S$ ، ضریب گشتاور سنکرون کننده است.  $T_D \Delta \omega$  مؤلفه‌ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات سرعت،  $\Delta \omega$ ، همفاز است و از آن به نام مؤلفه گشتاور میراکننده<sup>۲</sup> یاد می‌شود.  $T_D$ ، نیز ضریب گشتاور میراکننده است. پایداری سیستم بستگی به وجود هر دو مؤلفه گشتاور برای هر ماشین سنکرون دارد. کمبود گشتاور سنکرون کننده منجر به ناپایداری از طریق رانش غیر نوسانی<sup>۳</sup> زاویه روتور می‌شود. از طرف دیگر، کمبود گشتاور میراکننده هم منجر به ناپایداری نوسانی<sup>۴</sup> می‌شود. به منظور سهولت در امر بررسی پایداری و کسب نگرشی مفید بر طبیعت مسائل پایداری، مناسب است که پدیده پایداری زاویه روتور را بر حسب دو طبقه‌بندی ذیل، تقسیم کرد:

1. Synchronizing Torque
2. Damping Torque
3. Aperiodic Drift
4. Oscillatory

**الف** ( پایداری اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک <sup>۱</sup> ، توانایی سیستم را برای حفظ حالت سنکرونیزه در اثر اغتشاشهای کوچک نشان می‌دهد. این اغتشاشها به علت تغییرات کوچک بار و تولید، دائماً اتفاق می‌افتد. اغتشاشها را می‌توان به اندازه کافی کوچک به حساب آورد تا اجازه خطی کردن معادلات سیستم را برای بررسی پایداری داشته باشیم. ناپایداری که ممکن است اتفاق بیفتد می‌تواند به دو صورت باشد: یکی اینکه زاویه روتور به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده دائماً افزایش یابد و دیگری حالتی که به علت کمبود توان میراکننده، نوسانهای روتور با دامنه در حال افزایش اتفاق افتد. عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاشهای کوچک، به عوامل چندی از جمله: نقطه کار اولیه، قدرت سیستم انتقال و نوع سیستم کنترل تحریک بستگی دارد. برای ژنراتوری که به طور شعاعی به یک سیستم قدرت بزرگ متصل است، ناپایداری در غیاب تنظیم کننده‌های خودکار ولتاژ (AVR) <sup>۲</sup> (یعنی با ولتاژ تحریک ثابت)، به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده، اتفاق می‌افتد. این مسأله منجر به ناپایداری غیر نوسانی مطابق با شکل ۲-۲ "الف" می‌شود. با وجود تنظیم کننده خودکار ولتاژ، زمانی سیستم در مقابل اغتشاش کوچک پایدار است که اطمینان حاصل شود نوسانهای سیستم میرایی کافی دارند. ناپایداری معمولاً خود را به صورت نوسانهایی با دامنه در حال افزایش نشان می‌دهد. شکل ۲-۲ "ب" عکس العمل سیستم را با وجود تنظیم کننده خودکار ولتاژ به تصویر کشیده است. در سیستمهای قدرت امروزی، پایداری اغتشاش کوچک، عمدتاً به علت کمبود میرایی نوسانها اتفاق می‌افتد. پایداری انواع نوسانهای زیر مورد توجه است:

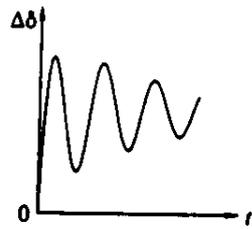
- **مُد های محلی** <sup>۳</sup> یا **مُد های ماشین** - سیستم که مربوط به نوسانهای واحدهای یک نیروگاه نسبت به بقیه سیستم قدرت است. واژه محلی به این دلیل استفاده می‌شود که نوسانها به یک نیروگاه یا بخشی کوچک از سیستم قدرت محدود می‌شود.
- **مُد های بین ناحیه‌ای** <sup>۴</sup> که مربوط به نوسانهای تعدادی ماشین سنکرون در یک بخش سیستم نسبت به ماشینهای سنکرون سایر بخشهاست. این مُدها زمانی اتفاق می‌افتد که دو یا چند بخش که هر بخش از تعدادی ماشین سنکرون کاملاً نزدیک به هم متصل

1. Small Signal

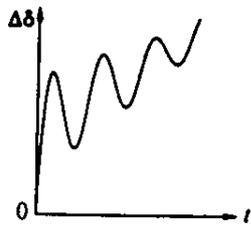
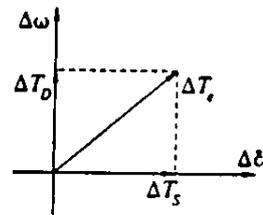
2. Automatic Voltage Regulator

3. Local Modes

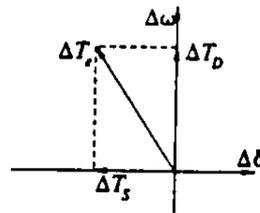
4. Interarea Modes



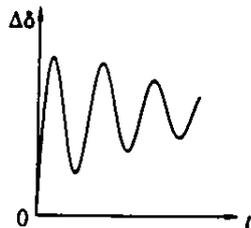
پایدار  
 • مثبت  $T_S$   
 • مثبت  $T_D$



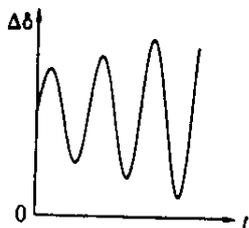
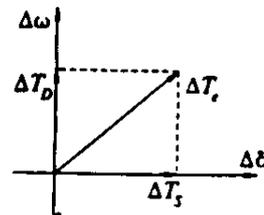
ناپایداری غیرنوسانی  
 • منفی  $T_S$   
 • مثبت  $T_D$



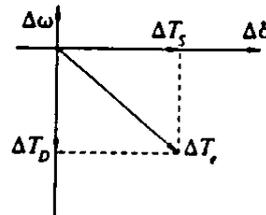
(الف) با ولتاژ تحریک



پایدار  
 • مثبت  $T_S$   
 • مثبت  $T_D$



ناپایداری نوسانی  
 • مثبت  $T_S$   
 • منفی  $T_D$



(ب) با کنترل تحریک

شکل ۲-۲ طبیعت پاسخ اغتشاش کوچک

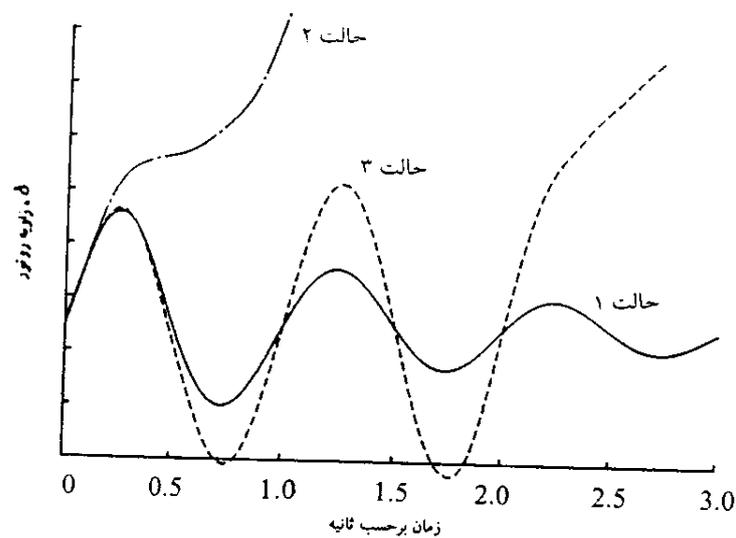
- تشکیل شده است، به وسیله خطوط ارتباطی ضعیف به هم متصل شده باشند.
- مدهای کنترلی<sup>۱</sup> که مربوط به کنترلگرهای نیروگاه و سایر کنترلگرهاست. معمولاً در صورتی که سیستمهای تحریک، گاورنرها، کنورتورهای HVDC و جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو (SVC)، بد تنظیم شده باشند، ناپایداری این گونه مدها اتفاق می افتد.
  - مدهای پیچشی<sup>۲</sup> که مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین - ژنراتور است. ناپایداری این مدها ممکن است به علت تأثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، گاورنر، کنترلگرهای HVDC و خطوط انتقالی که با خازن سری جبران شده اند، اتفاق افتد.

ب) پایداری گذرا، توانایی سیستم را به منظور حفظ حالت سنکرونیزه در اثر بروز یک اغتشاش شدید گذرا نشان می دهد. عکس العمل سیستم، شامل تغییرات بزرگ زاویه روتور ژنراتور است و از رابطه غیر خطی توان - زاویه تأثیر می پذیرد. پایداری، هم به نقطه کار اولیه سیستم و هم به شدت اغتشاش بستگی دارد. معمولاً در این حالت، سیستم دستخوش تغییر می شود به گونه ای که نقطه کار حالت ماندگار سیستم بعد از اغتشاش با نقطه کار قبل از اغتشاش متفاوت است.

در سیستم ممکن است اغتشاشهایی با شدت درجات و احتمال وقوع بسیار متفاوت روی دهد. با وجود این، سیستم به گونه ای طراحی می شود که در مقابل مجموعه ای از پیشامدهای برگزیده، پایدار بماند. این پیشامدها، عموماً اتصال کوتاه فاز به زمین، فاز به فاز به زمین و سه فاز است. معمولاً اتصال کوتاه را روی خطوط انتقال فرض می کنند اما گاهی اتصال کوتاه در شین یا ترانسفورمر نیز در نظر گرفته می شود. فرض می شود که به وسیله کلیدزنی لازم، بخشی که تحت تأثیر خطا واقع شده از بقیه سیستم جدا می گردد. در بعضی شرایط، می توان باز بست سریع را فرض کرد.

شکل ۲-۳ رفتار ماشینی سنکرون را در وضعیتهای پایدار و ناپایدار نشان می دهد. این شکل، عکس العمل زاویه روتور را برای یک حالت پایدار و دو حالت ناپایدار نشان می دهد. در

حالت پایدار (حالت ۱)، زاویه روتور ابتدا افزایش یافته، به حداکثر خود می‌رسد و سپس کاهش یافته و با دامنه در حال کاهش به صورت نوسانی در می‌آید تا اینکه به حالت ماندگار می‌رسد. در حالت ۲، زاویه روتور به طور پیوسته و یکنوا افزایش می‌یابد تا اینکه حالت سنکرون از دست برود. این شکل ناپایداری موسوم به ناپایداری اولین نوسان<sup>۱</sup> است و به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده ایجاد می‌شود. در حالت ۳، سیستم ابتدا در اولین نوسان پایدار است اما با افزایش دامنه نوسانها، تدریجاً ناپایدار می‌شود. این شکل ناپایداری عموماً زمانی اتفاق می‌افتد که شرایط حالت ماندگار سیستم بعد از خطا، خود از دیدگاه "سیگنال کوچک" ناپایدار است و لزوماً به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی‌افتد.



شکل ۲-۳ پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا

در سیستمهای قدرت بزرگ، ممکن است ناپایداری گذرا همیشه به صورت ناپایداری اولین نوسان بروز نکند بلکه می‌تواند به علت جمع آثار چندین مُد نوسانی باشد که باعث تغییرات شدید زاویه روتور بعد از اولین نوسان می‌شود. در مطالعات پایداری گذرا، زمان مطالعه معمولاً محدود به ۳ تا ۵ ثانیه بعد از اغتشاش می‌شود هر چند که ممکن است برای سیستمهای بسیار بزرگ با مُدهای نوسانی بین ناحیه‌ای غالب، این زمان به ۱۰ ثانیه هم برسد.

از واژه پایداری دینامیکی<sup>۱</sup> نیز در آثار چاپ شده به عنوان نوعی از پایداری زاویه روتور یاد شده است. با وجود این، نویسندگان مختلف از این واژه برای جنبه‌های متفاوت پدیده استفاده کرده‌اند. در امریکای شمالی، از این واژه به همان معنای پایداری سیگنال کوچک با وجود تجهیزات کنترل خودکار (عمدتاً تنظیم کننده‌های ولتاژ ژنراتور) در مقابل پایداری بدون وجود این تجهیزات یاد شده است [۲، ۱]. در فرانسه و آلمان، از این واژه به همان معنای پایداری گذرا، که در اینجا استفاده شده است یاد گردیده است. از آنجا که استفاده از این واژه ابهامات زیادی را ایجاد کرده، هم CIGRE و هم IEEE به عدم استفاده از آن توصیه نموده‌اند [۳، ۴].

## ۲-۱-۲ پایداری ولتاژ<sup>۲</sup> و فروپاشی ولتاژ<sup>۳</sup>

پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام شینهای سیستم در شرایط عادی عملکرد و بعد از اینکه تحت یک اغتشاش قرار گرفت. زمانی که حضور اغتشاش، افزایش تقاضای بار، یا تغییر در وضعیت سیستم باعث افت فزاینده و غیر قابل کنترل در ولتاژ گردد سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می‌شود. دلیل اصلی ناپایداری، عدم توانایی سیستم قدرت در تأمین توان راکتیو مورد تقاضاست. قلب مسأله معمولاً افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان حقیقی و راکتیو از راکتانسهای خطوط انتقال ایجاد می‌گردد [۵ تا ۷]. یکی از معیارهای پایداری ولتاژ آن است که در وضعیت کاری خاصی، در هر شین سیستم و در زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می‌یابد، دامنه ولتاژ نیز افزایش یابد. سیستم، از دید ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل برای یک شین سیستم، افزایش توان راکتیو تزریقی به آن (Q)، باعث کاهش دامنه ولتاژ آن (V) شود. به عبارت دیگر سیستمی از نظر ولتاژ پایدار است

1. Dynamic Stability

2. Voltage Stability

3. Voltage Collapse

که حساسیت  $V-Q$  آن برای هر شین مثبت باشد و ناپایدار است اگر این حساسیت حداقل برای یک شین منفی شود.

افت فزاینده در ولتاژ شین ممکن است به علت از دست رفتن حالت سنکرونیزه و افزایش زاویه روتور نیز صورت پذیرد. به عنوان مثال، از دست دادن تدریجی حالت سنکرونیزه ماشینها، زمانی که زوایای روتور بین دو گروه از ماشینها به  $180^\circ$  نزدیک شده یا از آن فراتر رود، منجر به ولتاژهای بسیار پایین در نقاط واسطه‌ای از شبکه می‌شود (به فصل سیزدهم، بخش ۱۳-۵-۳ مراجعه کنید). در مقابل، کاهش مداوم ولتاژ، که مربوط به ناپایداری ولتاژ است، زمانی اتفاق می‌افتد که از نظر پایداری زاویه روتور مشکلی وجود نداشته باشد.

اساساً ناپایداری ولتاژ یک پدیده محلی است. با وجود این، آثار آن ممکن است تأثیر فراگیر داشته باشد. فروپاشی ولتاژ پدیده‌ای پیچیده‌تر از ناپایداری ساده ولتاژ است و معمولاً اثر رشته‌ای از حوادث ناپایداری ولتاژ است که منجر به ولتاژ پایین در بخش عمده‌ای از سیستم قدرت می‌شود.

ناپایداری ولتاژ ممکن است به صورتهای مختلفی بروز کند. در ساده‌ترین شکل، موضوع را می‌توان با توجه به شبکه ساده شکل ۲-۴ نشان داد [۵]. این شبکه، شامل یک منبع ثابت ولتاژ ( $E_S$ ) است که باری ( $Z_{LD}$ ) را از طریق یک امپدانس سری ( $Z_{LN}$ ) تغذیه می‌کند. این شبکه نمونه‌ای از یک سیستم شعاعی است که در آن بار یا ناحیه‌ای از بارها به وسیله یک خط انتقال از سیستمی بزرگ تغذیه می‌شود. جریان  $\tilde{I}$  در شکل ۲-۴ برابر است با:

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_S}{\tilde{Z}_{LN} + \tilde{Z}_{LD}} \quad (3-2)$$

که  $\tilde{I}$  و  $\tilde{E}_S$  مقادیر فازوری هستند و داریم:

$$\tilde{Z}_{LN} = Z_{LN} \angle \theta, \quad \tilde{Z}_{LD} = Z_{LD} \angle \phi$$



دامنه جریان برابر است با:

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \phi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \phi)^2}}$$

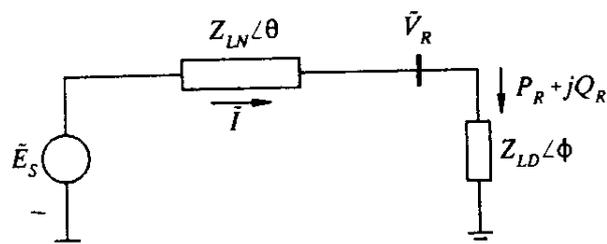
که این رابطه را به صورت زیر هم می توان بیان کرد:

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_S}{Z_{LN}} \quad (۴-۲)$$

$$F = 1 + \left[ \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right]^2 + 2 \left[ \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right] \cos(\theta - \phi) \quad \text{که:}$$

دامنه ولتاژ طرف گیرنده (بار) برابر است با:

$$\begin{aligned} V_R &= Z_{LD} I \\ &= \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \end{aligned} \quad (۵-۲)$$



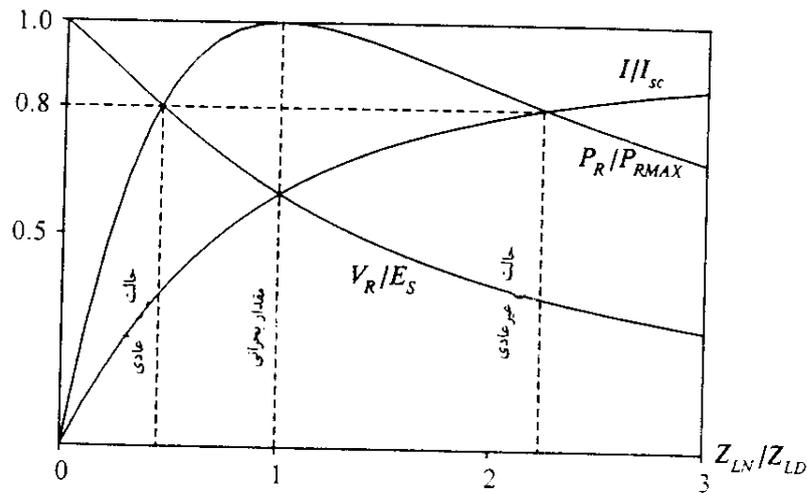
شکل ۴-۲ یک سیستم ساده شعاعی برای نمایش پدیده پایداری ولتاژ

و توان حقیقی بار برابر است با:

$$P_R = V_R I \cos \phi$$

$$= \frac{Z_{LD}}{F} \left( \frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \phi \quad (6-2)$$

نمودار  $P_R$ ،  $V_R$ ،  $I$  بر حسب  $Z_{LN}/Z_{LD}$  برای حالتی که  $\tan \theta = 0/0$  و  $\cos \phi = 0/95$  است در شکل ۵-۲ رسم شده است. برای اینکه بتوان نتایج را برای هر مقدار  $Z_{LN}$  به کاربرد، مقادیر  $I$ ،  $V_R$  و  $P_R$  به طور مناسبی نرمالیزه شده‌اند.



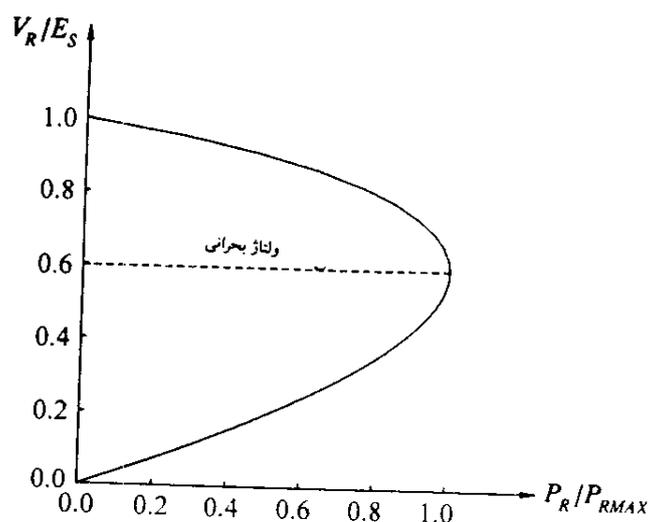
شکل ۵-۲ ولتاژ، جریان و توان طرف گیرنده به صورت تابعی از تقاضای بار برای سیستم شکل ۴-۲

اگر با کاهش  $Z_{LD}$ ، بار مورد تقاضا را افزایش دهیم،  $P_R$  قبل از رسیدن به یک حداکثر، ابتدا سریعاً و سپس کندتر افزایش می‌یابد و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند. از این رو مقدار

حداکثری برای توان حقیقی وجود دارد که می توان آن را با منبع ولتاژ ثابتی از طریق یک امیدانس، انتقال داد. توان، زمانی حداکثر است که افت ولتاژ خط، از نظر مقدار مساوی  $V_R$ ، باشد یعنی زمانی که  $Z_{LN}/Z_{LD}=1$  است. زمانی که  $Z_{LD}$  رفته رفته کاهش یابد،  $I$  زیاد می شود و  $V$  کم می گردد. در ابتدا در مقادیر بزرگ  $Z_{LD}$ ، افزایش در جریان بر کاهش در ولتاژ غالب است و در نتیجه با کاهش  $Z_{LD}$ ،  $P_R$  سریعاً افزایش می یابد. زمانی که  $Z_{LD}$  به  $Z_{LN}$  نزدیک شد، تأثیر کاهش در  $I$  فقط کمی بیشتر از تأثیر کاهش در  $V_R$  است. زمانی که  $Z_{LD}$  کمتر از  $Z_{LN}$  باشد، کاهش در  $V_R$  بر افزایش در  $I$  غالب می شود که در نتیجه، تأثیر خالص آن، کاهش  $P_R$  است. حالت بحرانی کاری که در آن توان، حداکثر است، حد بهره برداری قابل قبول را نشان می دهد. در تقاضاهای بیشتر بار، کنترل توان به وسیله تغییر بار ممکن است به ناپایداری بینجامد یعنی کاهش امیدانس بار منجر به کاهش توان می شود. اینکه آیا ولتاژ به طور فزاینده ای کاهش یابد و سیستم ناپایدار گردد بستگی به مشخصه های بار دارد. با باری با مشخصه استاتیکی امیدانس ثابت، سیستم در توان و ولتاژی کمتر از حدود مطلوب، پایدار می شود. از طرفی اگر مشخصه بار به صورت توان ثابت باشد، سیستم با فروپاشی ولتاژ شین بار، ناپایدار می شود. با مشخصه های دیگر بار، ولتاژ به کمک ترکیب مشخصه های خط انتقال و بار، تعیین می گردد. اگر بار به وسیله ترانسفورمرهایی با وجود تغییر دهنده های خودکار تپ زیر بار<sup>۱</sup> (ULTC) تغذیه شود، تغییر دهنده سعی خواهد کرد که ولتاژ را بالا ببرد. این موضوع باعث می شود که  $Z_{LD}$  مؤثر از دیدگاه سیستم کاهش یابد که خود باعث می شود  $V_R$  بازم کاهش یابد و سرانجام منجر به کاهش فزاینده ولتاژ شود. این موضوع، شکل ساده و خالص ناپایداری ولتاژ است.

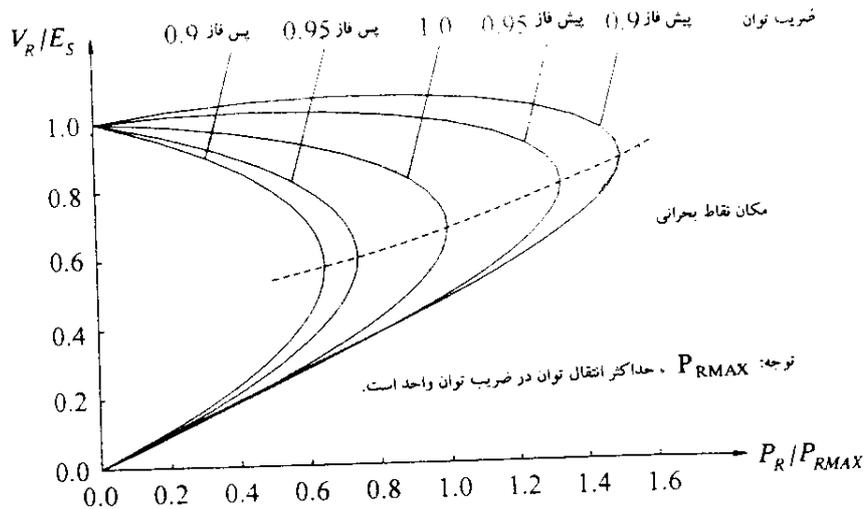
از دیدگاه پایداری ولتاژ، رابطه بین  $P_R$  و  $V_R$  مورد توجه است. این رابطه در شکل ۲-۶ برای سیستم مورد مطالعه، زمانی که ضریب توان<sup>۲</sup> بار مساوی ۰/۹۵ پس فاز است، نشان داده شده است.

با توجه به معادلات ۲-۵ و ۲-۶، ضریب توان تأثیر مهمی بر مشخصه توان - ولتاژ سیستم دارد. این موضوع، منطقی است زیرا افت ولتاژ در خط انتقال تابعی هم از توان حقیقی و هم از توان راکتیو انتقالی است. پایداری ولتاژ در حقیقت به روابط بین  $P$ ،  $Q$  و  $V$  بستگی دارد.



شکل ۶-۲ مشخصه‌های توان - ولتاژ سیستم شکل ۴-۲

صورت‌های مرسوم جهت نمایش این ارتباطها در شکل‌های ۷-۲ و ۸-۲ نشان داده شده است. شکل ۷-۲ منحنی‌های  $V_R - P_R$  را برای مقادیر مختلف ضریب توان در سیستم قدرت شکل ۴-۲ نشان می‌دهد. مکان هندسی نقاط بحرانی به صورت نقطه چین در شکل نشان داده شده است. معمولاً تنها نقاط کاری بالای نقاط بحرانی، شرایط کاری قابل قبول را نشان می‌دهند. کاهش ناگهانی در ضریب توان (افزایش  $Q_R$ ) می‌تواند سیستم را از حالت کاری پایدار به یک حالت کاری غیر قابل قبول و احتمالاً ناپایدار (در محدوده پایین منحنی‌ها) سوق دهد.

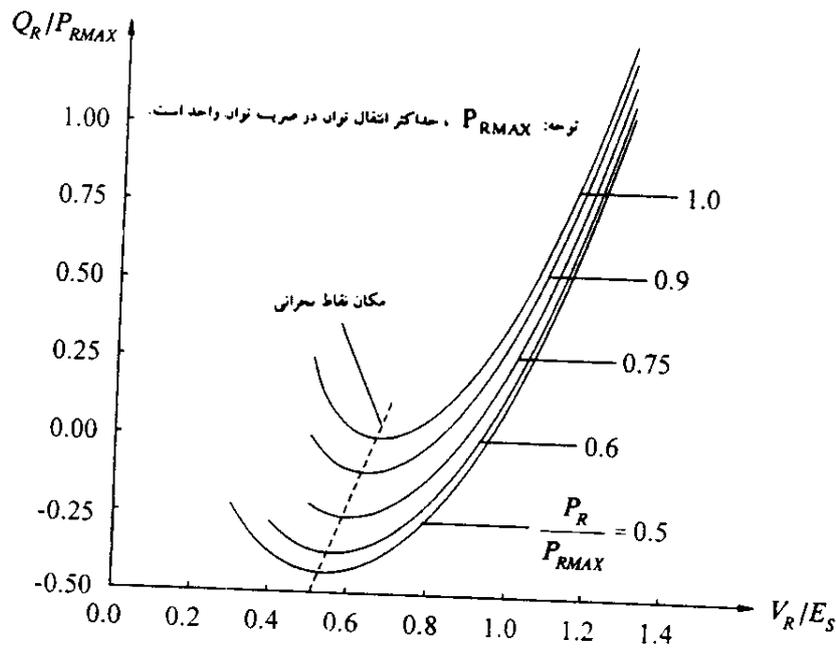


شکل ۲-۷ مشخصه‌های  $V_R - P_R$  مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با ضریبهای مختلف توان بار

تأثیر مشخصه‌های توان راکتیو تجهیزات و وسایلی که در طرف گیرنده قرار دارند (بار و تجهیزات جبرانگر) بیشتر در شکل ۲-۸ نمایان است. این شکل، مجموعه‌ای از منحنی‌ها برای سیستم قدرت شکل ۲-۴ است که هر منحنی رابطه بین  $V_R$  و  $Q_R$  را برای یک  $P_R$  ثابت نشان می‌دهد. سیستم در محدوده‌ای که مشتق  $dQ_R/dV_R$  مثبت است، پایدار است. حد پایداری ولتاژ (نقطه بحرانی) زمانی فرا می‌رسد که مشتق، صفر باشد. از این رو بخشی از منحنی‌ها که در منرف راست نقطه حداقل قرار دارد، نمایانگر محدوده عملکرد پایدار و بخش طرف چپ نمایانگر محدوده ناپایدار است. عملکرد پایدار در محدوده‌ای که  $dQ_R/dV_R$  منفی است، فقط زمانی قابل کسب است که یک جبرانگر قابل تنظیم توان راکتیو با محدوده کافی کنترلی با بهره  $Q/V$  بالا و با پلاریته عکس حالت عادی، در دسترس باشد.

شرح فوق در خصوص پدیده پایداری ولتاژ، ابتدایی است و هدف، کمک به طبقه‌بندی و درک جنبه‌های متفاوت پایداری سیستم قدرت است. بررسی، محدود به یک سیستم شعاعی

شد که تصویری ساده و در عین حال گویا از مسأله پایداری ولتاژ را نشان دهد. در یک سیستم عملی پیچیده قدرت، عوامل زیادی به فرایند فروپاشی ولتاژ سیستم در اثر ناپایداری ولتاژ، کمک می‌کنند؛ از آن جمله، می‌توان از قوت سیستم انتقال، سطوح توانهای انتقالی، مشخصه‌های بارها، حدود توانایی توان راکتیو ژنراتورها و مشخصه‌های تجهیزات جبرانگر توان راکتیو نام برد. در بعضی حالات، مسأله با عملکرد ناهماهنگ سیستمهای گوناگون حفاظتی و کنترل، ترکیب می‌شود.



شکل ۲-۸ مشخصه‌های  $V_R - Q_R$  مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با نسبت‌های مختلف  $P_R/P_{RMAX}$

به منظور بررسی، مناسب است که پایداری ولتاژ را به دو طبقه ذیل تقسیم نمود:

### 1. Strength

الف) پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاشهای بزرگ از جمله خطاهای سیستم، از دست دادن تولید یا پیشامدهای خطوط است. این توانایی به وسیله مشخصه‌های بار سیستم و تأثیر متقابل سیستمهای کنترلی و حفاظت پیوسته<sup>۱</sup> و گسسته<sup>۲</sup> مشخص می‌شود. تعیین پایداری اغتشاش بزرگ، مستلزم آن است که عملکرد غیر خطی دینامیکی سیستم در محدوده زمانی کافی که تأثیر متقابل تجهیزاتی از قبیل تغییردهنده‌های تپ زیر بار (ULTC) و محدود کننده‌های جریان تحریک ژنراتور مشخص می‌شود، تعیین گردد. زمان مطالعه ممکن است از چند ثانیه تا چندین دقیقه طول بکشد. از این رو شبیه سازی دینامیکی بلند مدت برای بررسی مسأله، ضروری است. معیاری جهت پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ آن است که به دنبال بروز اغتشاش و بعد از عمل کنترل‌کننده‌های سیستم، ولتاژ تمام شینها به سطوح ماندگار قابل قبول برسند.

ب) پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاشهای کوچک، مثلاً تغییرات کوچک در بار سیستم، است. این نوع پایداری به کمک مشخصه‌های بار، کنترل‌کننده‌های پیوسته و کنترل‌کننده‌های گسسته در یک لحظه زمانی مشخص، تعیین می‌گردد. این مفهوم، مشخص می‌کند که در هر زمان سیستم چگونه در مقابل اغتشاشهای کوچک، عکس العمل نشان می‌دهد.

فرایندهای اصلی که به پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ کمک می‌کنند اساساً دارای طبیعت حالت ماندگار هستند. از این رو می‌توان به طور مؤثر از بررسی استاتیکی برای تعیین حاشیه پایداری<sup>۳</sup>، عوامل مؤثر بر پایداری و مطالعه تأثیر محدوده وسیعی از وضعیتهای سیستم و تعداد زیادی سناریو که به دنبال پیشامدها و اغتشاشات رخ می‌دهد، استفاده کرد [۸].

معیاری جهت پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ آن است که در یک حالت کاری مشخص، دامنه ولتاژ هر شین سیستم، زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می‌یابد، زیاد شود. سیستم، از نظر ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل در یک شین سیستم، دامنه ولتاژ (V)، زمانی که توان راکتیو تزریقی (Q) به آن افزایش یابد، کم شود. به عبارت دیگر، سیستم از نظر ولتاژ، پایدار است اگر حساسیت V-Q برای هر شین، مثبت و ناپایدار است اگر حساسیت V-Q

حداقل برای یک شین، منفی باشد.

ناپایداری ولتاژ همیشه به شکل خالص خود بروز نمی‌کند. اغلب، ناپایداری ولتاژ و زاویه با یکدیگر تداخل می‌کنند. ناپایداری از یک نوع ممکن است به ناپایداری از نوع دیگر منجر شود و تفکیک، واضح و روشن نباشد. با وجود این، تفکیک مهم است زیرا به دنبال درک و تعیین عوامل مؤثر بر مسأله است که می‌توان روشهای مناسب بهره‌برداری و طراحی را برگزید. شرح مفصلتر پایداری ولتاژ شامل روشهای مطالعه و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در فصل چهاردهم آمده است. بررسی جامع و عمیق مسأله در کتاب پایداری ولتاژ سیستم قدرت<sup>۱</sup> که به قلم تیلور<sup>۲</sup> تألیف شده، بیان گردیده است.

#### ۲-۱-۳ پایداری میان مدت<sup>۳</sup> و بلند مدت<sup>۴</sup>

واژه‌های پایداری بلندمدت و میان مدت در فرهنگ پایداری سیستمهای قدرت نسبتاً جدید هستند. این واژه‌ها به دنبال نیاز به بررسی عکس العمل دینامیکی سیستم قدرت در حالاتی که سیستم، دستخوش آشفتگیهای شدید می‌شود، مطرح شده‌اند [۹-۱۳]. آشفتگیهای شدید در سیستم منجر به تغییرات بزرگی در ولتاژ، فرکانس و توانهای انتقالی می‌شود و فرایندها، کنترل‌کننده‌ها و سیستمهای حفاظتی کُند را که در مطالعات سنتی پایداری گذرا، مدل نمی‌شوند به عکس العمل وا می‌دارد. مشخصه‌های زمانی این فرایندها و تجهیزات، که در اثر تغییرات بزرگ فرکانس و ولتاژ تحریک می‌شوند و از محدوده چند ثانیه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل کنترل‌کننده‌ها و سیستمهای حفاظتی ژنراتور) تا چند دقیقه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل سیستمهای تأمین انرژی چرخاننده‌ها و تنظیم‌کننده‌های بار - ولتاژ) متغیر است [۱۰، ۱۴].

در پایداری بلندمدت فرض می‌شود که نوسانهای توان سنکرون کننده بین ماشینهای سنکرون، میرا شده است و در نتیجه فرکانس یکنواختی در کل سیستم برقرار است [۳، ۱۱] و [۱۵]. در اینجا تأکید بر پدیده‌های کُندتر و بلندمدت‌تر است که همراه با آشفتگیهای شدید سیستم و در نتیجه عدم تطابق زیاد و طولانی بین تولید و مصرف توانهای حقیقی و راکتیو است.

1. Power System Voltage Stability

2. C. W. Taylor

3. Mid - term

4. Long - term

پدیده‌ها شامل عکس‌العمل دینامیکی دیگهای بخار<sup>۱</sup> واحدهای حرارتی، عکس‌العمل دینامیکی آبگذر و کانال آب واحدهای آبی، کنترل خودکار تولید، کنترل‌کننده‌ها و سیستمهای حفاظتی نیروگاهها و سیستم انتقال، اشباع در ترانسفورمر و تأثیرات فرکانس غیراسمی بر بار و شبکه است.

عکس‌العمل میان مدت نمایشگر انتقال بین عکس‌العملهای کوتاه مدت و بلند مدت است. در مطالعات پایداری میان مدت، تأکید بر نوسانهای توان سنکرون‌کننده بین ماشینهای سنکرون و از جمله تأثیر بعضی از پدیده‌های کندتر و احتمالاً تغییرات شدید ولتاژ یا فرکانس است. از نظر زمانی، بازه‌های نوعی به صورت زیر است:

- کوتاه مدت یا گذرا : صفر تا ۱۰ ثانیه
- میان مدت : ۱۰ ثانیه تا چند دقیقه
- بلندمدت : چندین دقیقه تا چندین ده دقیقه

باید خاطر نشان کرد که تمایز بین پایداری میان مدت و بلندمدت عمدتاً بر اساس پدیده‌های مورد بررسی و مدلسازی مورد استفاده سیستم بخصوص با توجه به نوسانهای زودگذر و بین ماشینی و نه با توجه به دوره زمانی مورد نظر، صورت می‌پذیرد. به طور کلی مسائل پایداری بلند مدت و کوتاه مدت مربوط به نقص در عکس‌العمل تجهیزات، هماهنگی ضعیف بین سیستمهای کنترلی و حفاظتی یا کمبود ذخیره توانهای حقیقی و راکتیو اتفاق می‌افتد.

پایداری بلند مدت معمولاً مربوط به عکس‌العمل سیستم در مقابل اغتشاشهای بزرگی است که از محدوده معیارهای طراحی معمولی سیستم خارج است. این موضوع ممکن است به وقفه‌های متوالی و پارگی<sup>۲</sup> سیستم به چندین زیر سیستم منجر شود که در هر زیر سیستم، ژنراتورها در حالت سنکرونیزه باقی بمانند. مفهوم پایداری در این حالت آن است که "آیا هر زیر سیستم به حالت قابل قبول تعادلی با حداقل بار زدایی می‌رسد یا خیر". این موضوع از عکس‌العمل کلی زیر سیستم با توجه به فرکانس متوسط<sup>۳</sup> آن و نه با توجه به حرکت نسبی بین ماشینهای سنکرون، تعیین می‌شود. در بدترین وضع، ممکن است عکس‌العمل تجهیزات حفاظتی سیستم واحدها وضعیت را باز هم بدتر کند و فروپاشی زیر سیستم یا بخشی از آن رخ

دهد.

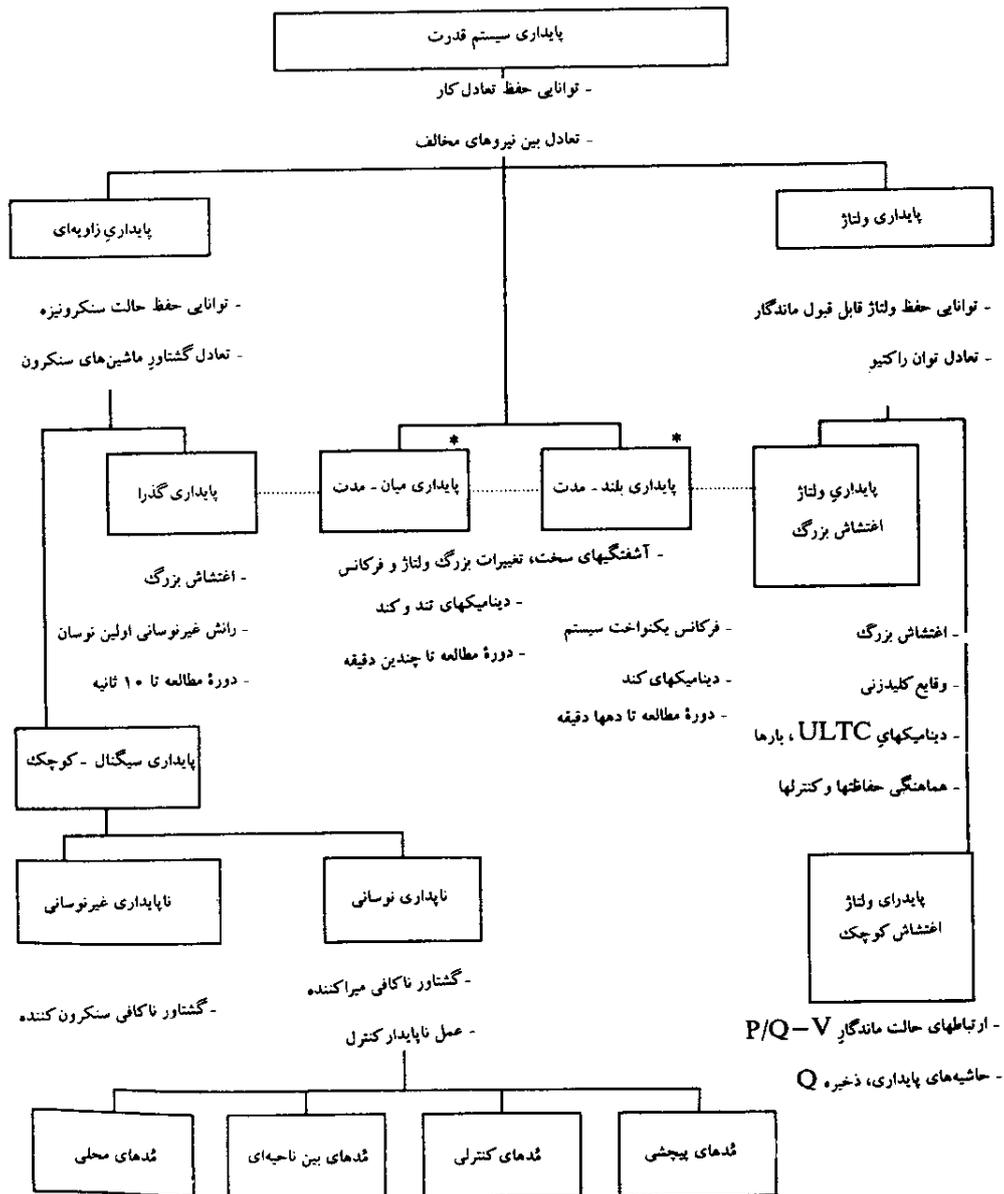
کاربردهای دیگر بررسی پایداری بلند مدت و کوتاه مدت، در خصوص بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ است که نیازمند به شبیه سازی تأثیر تغییر دهنده‌های تپ ترانسفورمرها، حفاظت فوق تحریک<sup>۱</sup> ژنراتورها، حدود منابع توان راکتیو و بارهای ترموستاتی<sup>۲</sup> است. در این حالت، کمتر محتمل است که نوسانهای بین ماشینهای سنکرون، مهم باشد. با وجود این، باید دقت کرد که از بعضی عکس‌العملهای دینامیکی سریع چشم پوشی نکرد.

در خصوص بررسی پایداری بلند مدت و میان مدت تجربه و مطالعه به صورت محدود انجام گرفته است. همچنان که بر تجربه‌ها افزوده گردد و روشهای بهبود یافته در خصوص شبیه‌سازی عکس‌العملهای دینامیکی کند و سریع مطرح شود، تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت اهمیت کمتری پیدا می‌کند.

## ۲-۲ طبقه بندی پایداری

پایداری سیستم قدرت یک مسأله منفرد است اما عملی نیست که آن را بدین صورت مطالعه کرد. همچنان که در بخش قبل مطرح گردید، ناپایداری یک سیستم قدرت می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد و از عوامل گوناگونی تأثیر پذیرد. با طبقه بندی مناسب پایداری، می‌توان بررسی مسائل مربوطه، تشخیص عوامل اصلی سهم در ناپایداری و ایجاد روشهای بهبود عملکرد پایدار سیستم را تا حد زیادی تسهیل بخشید. این طبقه‌بندی بر اساس نکات زیر صورت می‌پذیرد:

- طبیعت فیزیکی ناپایداری حاصل؛
  - اندازه اغتشاش موجود؛
  - تجهیزات، فرایندها و محدوده زمانی که برای تعیین پایداری لازم است مورد توجه قرار گیرند؛
  - مناسب‌ترین روش محاسبه و پیش بینی پایداری.
- شکل ۲-۹ شکل کلی مسأله پایداری سیستم قدرت را به تصویر کشیده است که در آن



\* با امکان دسترسی به روشهای اصلاح شده محاسباتی که روندی متحد را برای تحلیل دینامیک‌های تند و کند فراهم می‌آورند، تمایز میان پایداری میان-مدت و پایداری بلند-مدت کم‌رنگ تر شده است.

شکل ۹-۲ طبقه‌بندی پایداری سیستم قدرت

طبقات و زیر طبقه‌ها بر اساس آنچه که در بخش قبلی بیان گردید، مشخص شده‌اند. از بُعد عملی، طبقه‌بندی بر اساس نکات متنوعی انجام گرفته که مرزبندی مشخص را بین طبقات و تعیین تعاریفی را که دقیق و در عین حال از دید عملی مفید باشند، مشکل می‌نماید. به عنوان مثال، همیشه نوعی همپوشانی<sup>۱</sup> بین پایداری میان مدت، بلند مدت و پایداری ولتاژ وجود دارد. با مدلسازی مناسب بارها، تغییردهنده زیر بار تپ ترانسفورمرها و حدود توان راکتیو ژنراتورها، شبیه‌سازی پایداری میان مدت و بلند مدت، مناسب بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ نیز خواهد بود. به طور مشابه، همپوشانی بین پایداری گذرا، میان مدت و بلند مدت وجود دارد، بدین صورت که از روشهای محاسباتی مشابه برای پیش بینی عکس‌العمل غیر خطی زمانی سیستم در مقابل اغتشاشهای بزرگ استفاده می‌کنند. اگر چه این سه طبقه، مسأله پایداری را از جنبه‌های مختلف مورد توجه قرار می‌دهند، از دیدگاه محاسباتی و شبیه سازی، هر یک تعمیمی از دیگری است و مرزبندی مشخص، مشکل است.

هر چند که طبقه‌بندی پایداری سیستم قدرت، وسیله مؤثر و مناسبی در برخورد با پیچیدگیهای موجود در مسأله است، اما باید همواره پایداری کلی سیستم را مد نظر داشت. حل مسأله پایداری یک طبقه نباید منجر به تأثیر منفی بر پایداری طبقه دیگر شود. این نکته اساسی است که باید تمام جنبه‌های پدیده پایداری را مورد توجه قرار داد و هر جنبه را از بیش از یک دیدگاه بررسی کرد. لازمه این امر آن است که انواع روشهای محاسباتی گوناگون ایجاد گردد و از آنها به صورت منطقی استفاده شود. در این صورت است که تا حدی، همپوشانی در پدیده مورد بررسی، مطلوب است.

## ۲-۳ مروری بر تاریخچه مسائل پایداری

پایداری سیستم قدرت، موضوع پیچیده‌ای است که در طول سالها مورد توجه و بحث مهندسان سیستم قدرت بوده است. مروری بر تاریخچه موضوع به درک بهتر مسائل امروزی پایداری کمک می‌کند.

پایداری سیستم قدرت ابتدا در سال ۱۹۲۰ میلادی به عنوان یک مسأله مهم در سیستم

1. Overlap

قدرت مطرح گردید [۱۶]. نتایج اولین آزمایشها بر روی سیستمهای با مقیاس کوچک در سال ۱۹۲۴ میلادی ارائه شد [۱۷]. اولین آزمایشهای میدان<sup>۱</sup>، مربوط به پایداری یک سیستم قدرت واقعی در سال ۱۹۲۵ میلادی انجام پذیرفت [۱۸ و ۱۹]. در ابتدا مسائل پایداری مربوط به نیروگاههای آبی می شد که از راه دور و از طریق خطوط انتقال طولانی، مراکز بار شهری را تغذیه می کردند. به دلایل اقتصادی، این سیستمها را نزدیک به حدود پایداری بحالت ماندگار خود مورد بهره برداری قرار می دادند. در بعضی حالات، ناپایداری در حالت بهره برداری ماندگار سیستم اتفاق می افتاد؛ اما اغلب به دنبال خطاهای اتصال کوتاه و سایر اغتشاشهای سیستم، واقع می شد [۲۰]. پایداری سیستم تا حد زیادی از قوت سیستم انتقال، تأثیر می پذیرفت و ناپایداری به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده رخ می داد. سیستمهای رفع خطا کند بودند و در محدوده ۵/۰ تا ۲/۰ ثانیه (و حتی بیشتر) عمل می کردند.

مدلها و روشهای محاسباتی مورد استفاده، به تجهیزات محاسباتی روز و پیشرفت در مسأله نظریه پایداری سیستمهای دینامیکی بستگی داشت. با وجود خط کشهای محاسباتی<sup>۲</sup> و ماشینهای حساب<sup>۳</sup> مکانیکی، مدلها و روشهای محاسباتی بایستی ساده می بودند. به علاوه، روشهای تصویری از جمله معیار سطوح مساوی<sup>۴</sup> و تصاویر دایره ای<sup>۵</sup> مطرح شده بودند. این روشها برای بررسی سیستمهای ساده که بتوان آنها را به صورت سیستم دو واحدی در نظر گرفت، مناسب بودند. پایداری ماندگار و گذرا به طور جدا مورد مطالعه قرار می گرفتند. پایداری گذرا را به شیب و اوج منحنی توان - زاویه ربط می دادند و این موضوع را که نوسانها میرا می شود، بدیهی می انگاشتند.

بتدریج که سیستمهای قدرت رشد کرد و به هم پیوستن سیستمهای مستقل از دیدگاه اقتصادی جنبه عملی به خود گرفت، پیچیدگی مسائل پایداری، افزایش یافت. اکنون دیگر نمی شد سیستمها را به صورت دو واحدی مدل کرد. گامی مهم در بهبود روشهای محاسباتی پایداری، با ساخت تحلیلگر شبکه<sup>۶</sup> در سال ۱۹۳۰ میلادی برداشته شد. این وسیله، در حقیقت مدلی با مقیاس کوچک از یک سیستم قدرت جریان متناوب بود که با استفاده از مقاومتها،

- 
- |                   |                     |               |               |
|-------------------|---------------------|---------------|---------------|
| 1. Field Tests    | 2. Slide Rule       | 3. Calculator | 4. Equal Area |
| 5. Circle Diagram | 6. Network Analyzer |               |               |

راکتورها و خازنهای قابل تنظیم، شبکه انتقال و بار را مدل می‌نمود. برای نمایش ژنراتورها، از منابع ولتاژ با دامنه و زاویه قابل تنظیم و از اندازه‌گیرها به منظور اندازه‌گیری جریان، ولتاژ و توان در سرتاسر شبکه استفاده می‌شد. این وسیله، امکان مطالعه و بررسی پخش بار<sup>۱</sup> شبکه‌های چند ماشینه را فراهم می‌کرد. با وجود این، هنوز می‌بایست معادله حرکت یا تاب<sup>۲</sup> (نوسان)، با روشهای دستی و با استفاده از انتگرال‌گیری گام به گام<sup>۳</sup> حل می‌شد.

آنچه از دیدگاه نظری در دهه ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ میلادی انجام پذیرفت، پایه لازم برای درک مسأله پایداری سیستم قدرت از طرف صنعت را بنیان گذاشت. در این زمان، دانش مربوط به پایداری سیستم قدرت، به علت مطالعه مربوط به انتقال در طی مسیرهای طولانی، فراهم گردید و از دیدگاه نظری ماشینهای سنکرون مورد توجه نبود. تأکید، بر شبکه بود و ژنراتورها را به صورت منابع ولتاژ و به دنبال آن یک راکتانس ثابت و بارها را به صورت امپدانس ثابت مدل می‌کردند. این مسأله، به دلیل ابزار محاسباتی موجود دیکته می‌شد زیرا این ابزار، برای حل معادلات جبری و نه معادلات دیفرانسیل، مناسب بود.

امکان بهبود پایداری سیستم با استفاده از سیستمهای رفع خطاهای سریعتر و تنظیم کننده‌های ولتاژ با عملکرد پیوسته و بدون وجود باندها<sup>۴</sup> فراهم گردید. منافع یک سیستم تحریک با عکس‌العمل سریع، در اوایل دهه ۱۹۲۰ میلادی به منظور افزایش پایداری حالت ماندگار مطرح گردید. با وجود این، در ابتدا این محدوده پایداری دینامیکی برای عملکرد معمولی پیشنهاد نمی‌شد بلکه به عنوان یک حاشیه اضافی در تعیین حدود کاری سیستم، استفاده می‌شد. با افزایش درک تواناییهای سیستم تحریک با عکس‌العمل سریع در محدود کردن اولین نوسان ناپایداری گذرا و نیز افزایش حدود انتقال توان حالت ماندگار، استفاده از آنها رواج پیدا کرد. با اینهمه، استفاده از چنین سیستمهایی در بعضی حالات منجر به کاهش میرایی نوسانهای توان گردید. از این رو، ناپایداری نوسانی<sup>۵</sup> به صورت یک مسأله مطرح شد حال آنکه عملاً ناپایداری حالت ماندگار به صورت رانش یکنوازی زاویه روتور حذف گردید. این مسائل نیازمند ابزار محاسباتی بهتری بود. بایستی ماشین سنکرون و سیستم تحریک با جزئیات بیشتری مدل

1. Power Flow      2. Swing      3. Step by Step      4. Dead Band  
5. Oscillatory Instability

می شدند و شبیه سازی برای محدوده زمانی طولانی تری صورت می پذیرفت.

در اوایل دهه ۱۹۵۰ میلادی، کامپیوترهای آنالوگ برای بررسی مسائلی که نیازمند مدل سازی مشروحتر ماشین سنکرون، سیستم تحریک و گاورنر سرعت بودند، مورد استفاده واقع شدند. چنین شبیه سازیهایی برای مطالعه عمیق تأثیر مشخصه های تجهیزات و نه رفتار کلی سیستم چند ماشینه مناسب بودند. در دهه ۱۹۵۰ میلادی، کامپیوترهای دیجیتال نیز ظهور کردند. اولین برنامه مطالعه پایداری سیستم قدرت بر روی چنین کامپیوترهایی حدود سال ۱۹۵۶ میلادی پیاده شد. مدل های مورد استفاده در برنامه های کامپیوتری اولیه مشابه مدل های مورد استفاده در تحلیلگرهای شبکه بود. بزودی مشخص شد که این کامپیوترها برای مطالعه شبکه از دید اندازه و ابعاد شبکه و امکان مدل سازی مشروحتر مشخصه های دینامیکی تجهیزات، بر تحلیلگرهای شبکه برتری دارند. اینها وسیله مناسبی برای مطالعه مسائل پایداری سیستم های به هم پیوسته ای بودند که پیشتر به صورت سیستم های مستقل عمل می کردند.

در دهه ۱۹۶۰ میلادی اغلب سیستم های قدرت موجود در ایالات متحده آمریکا و کانادا به صورت بخشی از دو سیستم به هم پیوسته بزرگ، یکی در شرق و دیگری در غرب درآمد. در سال ۱۹۶۷ میلادی، خطوط کم ظرفیت ارتباطی فشار قوی جریان مستقیم، بین سیستم های شرق و غرب برقرار شد.

در حال حاضر، عملاً سیستم های قدرت موجود در این دو کشور، یک سیستم بزرگ را تشکیل داده اند. در حالی که به هم پیوستگی سیستمها از دیدگاه بهره برداری اقتصادی و افزایش قابلیت اعتماد از طریق همکاری متقابل، مهم است، از دیدگاه مسائل پایداری، به افزایش پیچیدگی منجر می شود و عواقب ناپایداری را افزایش می دهد. خاموشی کامل در نهم نوامبر سال ۱۹۶۵ میلادی در منطقه شمال شرق این موضوع را کاملاً آشکار ساخت و باعث شد که مسأله پایداری و اهمیت قابلیت اعتماد سیستم های قدرت از محدوده توجه مهندسان به سطح عموم و مؤسسات استاندارد کشانده شود.

از دهه ۱۹۶۰ میلادی، بیشتر تلاش و توجه صنعت به پایداری گذرای سیستم معطوف بوده است. سیستم های قدرت از دیدگاه معیارهای مربوط به پایداری گذرا طراحی و بهره برداری می شوند. در نتیجه، ابزار اصلی مطالعه پایداری در طراحی و بهره برداری، برنامه پایداری گذرا بوده است. برنامه های قدرتمندی تهیه شده که امکان نمایش سیستم های بسیار بزرگ و

مدلسازی مشروح تجهیزات در آنها فراهم آمده است. با پیشرفت روشهای عددی و تکنولوژی کامپیوترهای دیجیتال، این موضوع تا حد زیادی تسهیل شده است. همچنین، پیشرفت زیادی در زمینه مدلسازی و آزمایش تجهیزات، بخصوص در مورد ماشینهای سنکرون، سیستمهای تحریک و بار صورت گرفته؛ بعلاوه بهبود چشمگیری در عملکرد پایداری گذرای سیستم قدرت از طریق استفاده از تجهیزات سریع رفع خطا، سیستمهای تحریک باعکس‌العمل سریع، خازنهای سری و روشهای خاص تقویت پایداری، حاصل شده است.

همراه با پیشرفتهای مذکور، تمایل سیستمهای قدرت به ناپایداری نوسانی، افزایش یافته است. سیستمهای تحریک با عکس‌العمل سریع هر چند به بهبود پایداری گذرا کمک می‌کنند، لیکن بر پایداری اغتشاش کوچک مُد محلی نوسانی با کاهش میرایی، تأثیر سوء می‌گذارند. تأثیر منفی سیستمهای تحریک سریع با کاهش قدرت سیستمهای انتقال نسبت به اندازه واحدهای تولید، باز هم افزایش می‌یابد. چنین مسائلی با استفاده از پایدار سازهای سیستمهای قدرت<sup>۱</sup> حل شده است (به فصل دوازدهم مراجعه نمایید).

موضوع دیگری که به ناپایداری نوسانی کمک می‌کند تشکیل، و در نتیجه رشد به هم پیوستگی بین سیستمهای قدرت، گروه‌های بزرگی از ماشینهای نزدیک به هم متصل است که از طریق خطوط ارتباطی ضعیف به هم متصل شده باشند. در توانهای انتقالی زیاد، چنین سیستمهایی، مُدهای نوسانی فرکانس - کم بین ناحیه‌ای را تجربه می‌نمایند. در بسیاری از حالات، ناپایداری این مُدها موضوع مهمی شده است.

وضعیت موجود در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستمهای قدرت منجر به انواع جدیدی از مسائل پایداری شده است. مسائل مالی و شرایط استاندارد باعث شده شرکت‌های تولیدکننده برق، سیستمهای قدرت را با افزونگی<sup>۲</sup> کمتری بسازند و آنها را نزدیکتر به حدود پایداری گذرا مورد بهره‌برداری قرار دهند. به هم پیوستن با استفاده از تکنولوژیهای جدید و از جمله سیستم انتقال فشار قوی جریان مستقیم چند پایانه‌ای<sup>۳</sup>، همچنان در حال رشد است. علاوه بر این استفاده وسیعتری از خازنهای موازی صورت می‌پذیرد. ترکیب و مشخصه‌های بارها تغییر می‌کند. این موضوعها باعث شده تا در مشخصه‌های دینامیکی سیستمهای مدرن قدرت،

1. Power System Stabilizer

2. Redundancy

3. Multiterminal

تغییرات فراوانی صورت پذیرد. مدهای ناپایداری پیچیدگی روز افزونی پیدا می‌کنند و بررسی آنها نیازمند توجه جامع به جنبه‌های مختلف پایداری سیستم است. بخصوص ناپایداری ولتاژ و نوسانهای فرکانس کم بین ناحیه‌ای، نسبت به گذشته نیازمند توجه بیشتری است. در حالی که پیشتر این مسائل در شرایط و موقعیت‌های خاصی اتفاق می‌افتاد، اکنون تقریباً در همه جا رایج شده است. نیاز به بررسی عکس‌العمل دینامیکی بلند مدت سیستم به دنبال وقوع آشفتگیهای شدید در سیستم و اطمینان از هماهنگی صحیح بین سیستمهای کنترلی و حفاظتی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

در سالهای اخیر تحقیقات و پیشرفتهای بسیاری انجام شده که به درک بهتر جنبه‌های فیزیکی مسائل جدید پایداری و نیز ایجاد ابزار محاسباتی لازم برای بررسی و طراحی بهتر سیستم، کمک می‌نماید. پیشرفت در زمینه نظری سیستمهای کنترل و روشهای عددی، تأثیر شگرفی بر این کار گذاشته است. فصولی که به دنبال می‌آید این پیشرفتهارا مطرح می‌نماید و بررسی جامعی از موضوع پایداری سیستمهای قدرت را ارائه می‌دهد.

## منابع

- [1] D.N. Ewart and F.P. deMello, "A Digital Computer Program for the Automatic Determination of Dynamic Stability Limits," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-86, pp. 867-875, July 1967.
- [2] H.M. Rustebakke (editor), *Electric Utility Systems and Practices*, John Wiley & Sons, 1983.
- [3] CIGRE Working Group 32-03, "Tentative Classification and Terminologies Relating to Stability Problems of Power Systems," *Electra*, No. 56, 1978.
- [4] IEEE Task Force, "Proposed Terms and Definitions for Power System Stability," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, pp. 1894-1898, July 1982.
- [5] C. Barbier and J.P. Barret, "An Analysis of Phenomena of Voltage Collapse on Transmission System," *Revue Generale d'Electricite*, pp. 672-690, October 1980.
- [6] CIGRE Task Force 38-01-03, "Planning against Voltage Collapse," *Electra*, No. 111, pp. 55-75, March 1987.
- [7] IEEE Special Publication, *Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience*, 90TH0358-2-PWR, 1990.
- [8] 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.
- [9] D.R. Davidson, D.N. Ewart, and L.K. Kirchmayer, "Long Term Dynamic Response of Power Systems - An Analysis of Major Disturbances," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-94, pp. 819-826, May/June 1975.
- [10] 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.
- [11] EPRI Report EL-596, "Midterm Simulation of Electric Power Systems," Project RP745, June 1979.
- [12] EPRI Report EL-983, "Long Term Power System Dynamics, Phase III," Research Project 764-2, May 1982.

- [13] 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.
- [14] E.G. Cate, K. Hemmaplardh, J.W. Manke, and D.P. Gelopulos, "Time Frame Notion and Time Response of the Methods in Transient, Mid-Term and Long-Term Stability Programs," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-103, pp. 143-151, January 1984.
- [15] K. Hemmaplardh, J.W. Manke, W.R. Pauly, and J.W. Lamont, "Considerations for a Long Term Dynamics Simulation Program," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-1, pp. 129-135, February 1986.
- [16] C.P. Steinmetz, "Power Control and Stability of Electric Generating Stations," *AIEE Trans.*, Vol. XXXIX, Part II, pp. 1215, July-December, 1920.
- [17] R.D. Evans and R.C. Bergvall, "Experimental Analysis of Stability and Power Limitations," *AIEE Trans.*, pp. 39-58, 1924.
- [18] R. Wilkins, "Practical Aspects of System Stability," *AIEE Trans.*, pp. 41-50, 1926.
- [19] R.D. Evans and C.F. Wagner, "Further Studies of Transmission System Stability," *AIEE Trans.*, pp. 51-80, 1926.
- [20] AIEE Subcommittee on Interconnections and Stability Factors, "First Report of Power System Stability," *AIEE Trans.*, pp. 261-282, February 1937.
- [21] S.B. Crary, *Power System Stability, Vol. I: Steady-State Stability*, John Wiley & Sons, 1945.
- [22] E.W. Kimbark, *Power System Stability, Vol. I: Elements of Stability Calculations*, John Wiley & Sons, 1948.
- [23] Westinghouse Electric Corporation, *Electric Transmission and Distribution Reference Book*, East Pittsburgh, Pa., 1964.
- [24] C. Concordia, "Power System Stability," *Proceedings of the International Symposium on Power System Stability*, Ames, Iowa, pp. 3-5, May 13-15, 1985.
- [25] G.S. Vassell, "Northeast Blackout of 1965," *IEEE Power Engineering Review*, pp. 4-8, January 1991.

## بخش ۲

### مشخصه‌ها و مدل‌سازی تجهیزات

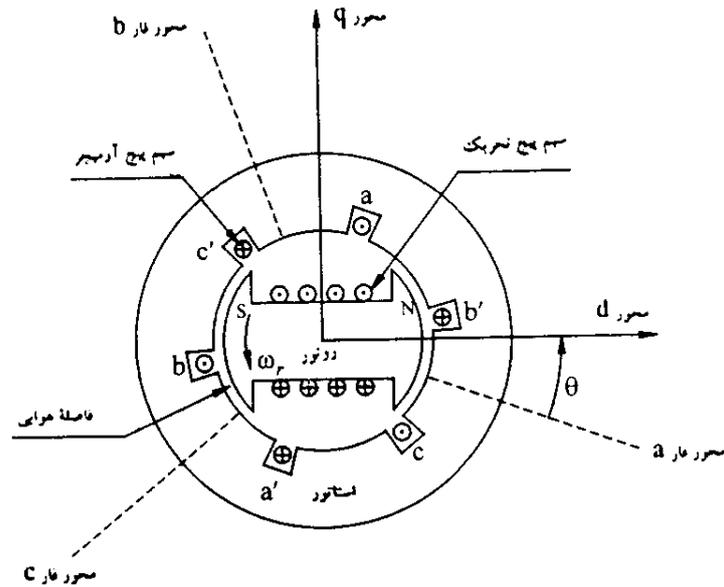
#### فصل سوم

### نظریه و مدل‌سازی ماشینهای سنکرون

ژنراتورهای سنکرون، منابع عمده تأمین انرژی الکتریکی در سیستمهای قدرت هستند. بارهای بزرگ زیادی به وسیله موتورهای سنکرون به حرکت در می‌آیند. گاهی از کندانسورهای سنکرون<sup>۱</sup> به عنوان وسیله تأمین توان راکتیو و کنترل ولتاژ استفاده می‌شود. اساس کار این تجهیزات مشابه هم است و در مجموع از آنها به نام ماشینهای سنکرون یاد می‌شود. همچنان‌که در فصل دوم مطرح شد، مسأله پایداری سیستم قدرت به طور عمده، حفظ حالت سنکرونیزه بین ماشینهای سنکرون به هم پیوسته است. از این رو، درک مشخصه و مدل‌سازی دقیق عکس‌العمل دینامیکی آنها، اهمیت زیادی در مطالعه پایداری سیستمهای قدرت دارد. مدل‌سازی و بررسی ماشینهای سنکرون همیشه مورد توجه بوده است. درباره این مسأله در دهه ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ میلادی کار زیادی انجام پذیرفت [۱، ۲، ۳] و حتی در سالهای اخیر مورد بررسی واقع شده است [۴ تا ۹]. همچنین نظریه و عکس‌العمل ماشینهای سنکرون در بعضی کتب بیان شده است [۱۰ تا ۱۴]. در این فصل، مدل ریاضی یک ماشین سنکرون به طور مشروح و عملکرد حالت ماندگار و گذرای آن به طور خلاصه، مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۳-۱-۳ شرح فیزیکی

در شکل ۱-۳-۱ نمایی از سطح مقطع یک ماشین سنکرون سه فاز با یک جفت قطب تحریک نشان داده شده است. ماشین از دو جزء اساسی یکی تحریک و دیگری آرمیچر تشکیل شده است. از سیم پیچ تحریک جریان مستقیم عبور می‌کند و میدانی مغناطیسی ایجاد می‌کند که در سیم پیچهای آرمیچر، ولتاژ متناوبی را القا می‌نماید.



شکل ۱-۳-۱ نمودار نمادین ماشین سنکرون سه فاز

### ۳-۱-۱-۳ ساختار آرمیچر و تحریک

سیم پیچهای آرمیچر معمولاً در ولتاژی بسیار بالاتر از ولتاژ تحریک کار می‌کنند و از این رو نیازمند فضای بیشتری برای قسمت عایقی<sup>۱</sup> خود هستند. همچنین، از آنها جریانهای گذرای

1. Insulation

شدیدی عبور می‌کند و باید قدرت مکانیکی کافی داشته باشند. از این رو معمول است که آرمیچر را بر روی استاتور قرار می‌دهند. از لحاظ فضایی، سیم پیچهای سه فاز آرمیچر،  $120^\circ$  با یکدیگر اختلاف مکان دارند که این موضوع باعث می‌شود با چرخش یکنواخت میدان تحریک، در این سیم پیچها ولتاژهایی، که از نظر زمانی  $120^\circ$  با یکدیگر اختلاف فاز دارند، القا شود. از آنجا که آرمیچر تحت تأثیر شار مغناطیسی متغیر با زمان قرار دارد، برای کاهش تلفات جریانهای گردابی<sup>۱</sup>، آهن استاتور را از ورقه‌های نازک می‌سازند.

زمانی که جریانهای سه فاز متعادل از سیم پیچهای آرمیچر عبور می‌کند، آرمیچر، خود میدان مغناطیسی در فاصله هوایی ایجاد می‌کند که با سرعت سنکرون می‌چرخد (این موضوع در بخش ۳-۱-۳ نشان داده خواهد شد). از طرفی میدان تحریک ایجاد شده در سیم پیچ روتور به علت جریان مستقیم، با چرخش روتور می‌چرخد. برای تولید گشتاور ماندگار، میدانهای استاتور و روتور باید با یک سرعت بچرخند. از این رو، روتور باید دقیقاً در سرعت سنکرون بچرخد.

تعداد قطب تحریک با توجه به سرعت مکانیکی روتور و فرکانس الکتریکی جریان استاتور تعیین می‌گردد. سرعت سنکرون برابر است با:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p_f} \quad (1-3)$$

که  $n$ ، سرعت بر حسب دور در دقیقه،  $f$ ، فرکانس بر حسب هرتز و  $p_f$ ، تعداد قطب تحریک است.

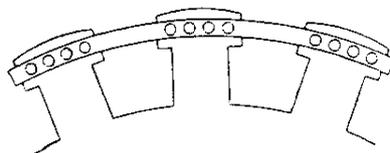
با توجه به سرعت، روتور دو ساختار ممکن است داشته باشد. توربینهای آبی در سرعتهای پایین می‌چرخند و از این رو تعداد نسبتاً زیادی قطب لازم است تا فرکانس اسمی را تولید نمایند. برای این وضعیت، روتوری با قطبهای برجسته<sup>۲</sup> و سیم پیچهای متمرکز مناسبتر است. چنین روتورهایی، اغلب دارای سیم پیچهای میراکننده<sup>۳</sup> به صورت میله‌های مسی یا برنجی هستند که در سطح قطب جای می‌گیرند. این میله‌ها در دو انتها به وسیله حلقه‌هایی مطابق با شکل ۲-۳ "الف" به یکدیگر متصل می‌شوند تا شبیه آنچه که در یک موتور قفس سنجابی

1. Eddy Currents

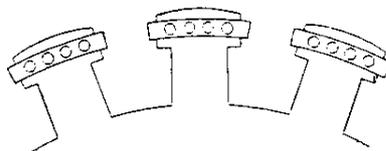
2. Salient Pole

3. Damper Winding

وجود دارد، سیم پیچهای اتصال کوتاه را تشکیل دهند. هدف از این سیم پیچها میرا کردن نوسانهای سرعت است. سیم پیچهای میراکننده ممکن است مطابق با شکل ۲-۳ "ب" غیر پیوسته باشند و بر روی هر قطب، اتصال کوتاه شده باشند. هارمونیکهای فضایی موجود در نیروی محرکه مغناطیسی<sup>۱</sup> (mmf) آرمیچر، به تلفات سطحی جریانهای گردابی کمک می نمایند. از این رو، قطبهای ماشینهای سنکرون قطب برجسته از ورقه های نازک تشکیل می شود.



(الف) میراکننده پیوسته

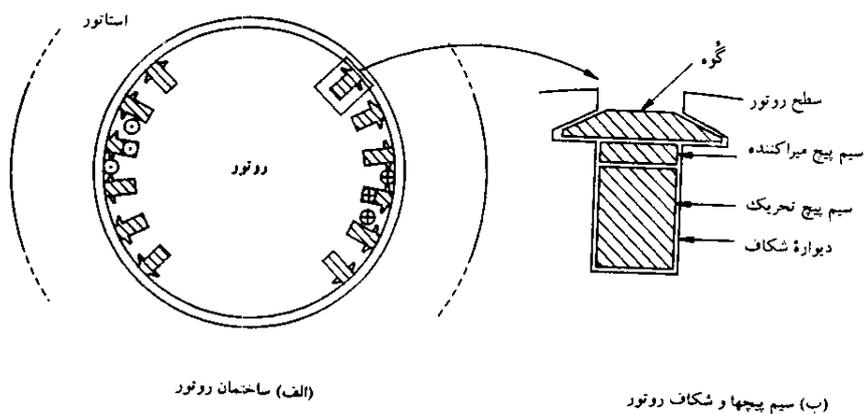


(ب) میراکننده ناپیوسته

شکل ۲-۳ ساختمان روتور قطب برجسته

از طرف دیگر توربینهای بخار و گاز در سرعت بالا می چرخند. روتور ژنراتور این توربینها به

صورت استوانه‌ای<sup>۱</sup> است که از فولاد یکپارچه ساخته شده است. آنها دارای دو یا چهار قطب تحریک هستند که سیم پیچهای آنها به صورت توزیع شده در شکافهایی که در بدنه روتور تعبیه شده، قرار دارد. سیم پیچها به کمک گوه‌هایی<sup>۲</sup> در جای خود محکم نگه داشته می‌شوند. اغلب چنین ماشینهایی دارای سیم پیچ میراکننده نیستند زیرا که روتور یکپارچه فلزی، اجازه عبور جریانهای گردابی را فراهم می‌کند که تأثیری مشابه جریانهای سیم پیچهای میراکننده دارد. بعضی سازندگان تأثیر میرایی بیشتر و قابلیت عبور جریان مؤلفه منفی را با استفاده از گوه‌های فلزی مستقر در شکافهای سیم پیچ تحریک (که در انتها به یکدیگر متصل شده‌اند تا یک روتور قفس سنجابی شبیه موتور القایی را تشکیل بدهند) و یا با استفاده از میله‌های مسی مستقل زیر گوه‌های نگهدارنده، فراهم می‌آورند. شکل ۳-۳ ساختار چنین روتوری را به نمایش می‌گذارد.



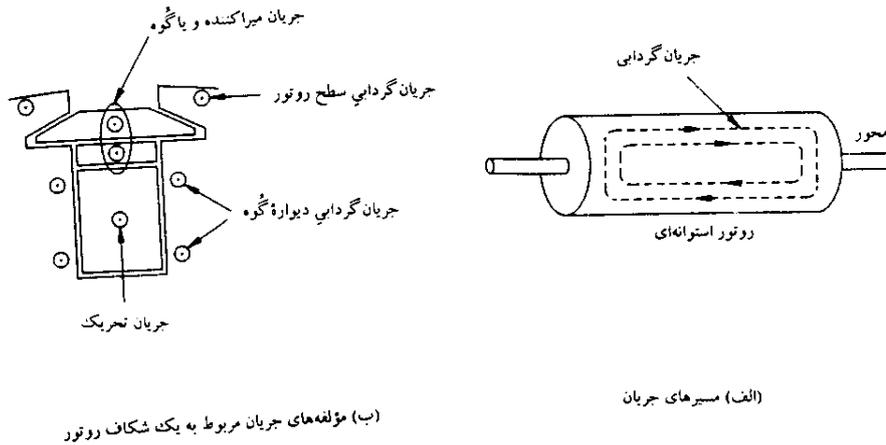
شکل ۳-۳ ساختمان روتور صلب استوانه‌ای

در حالت ماندگار جریان روتور، تنها مربوط به جریان مستقیم سیم پیچ تحریک است. اما در حالت دینامیکی، جریانهای گردابی در سطح روتور و دیواره شکافها و در گوه‌های شکافها و یا سیم پیچهای میراکننده (در حالتی که برای تأمین میرایی بیشتر وجود داشته باشد)، القا می‌شود.

1. Cylindrical

2. Wedge

شکل ۳-۴ مسیر جریانهای روتور یک ژنراتور تووین بخار را نشان می دهد.



شکل ۳-۴ مسیرهای جریان در یک روتور استوانه‌ای

### ۲-۱-۳ ماشینهای سنکرون با چند زوج قطب

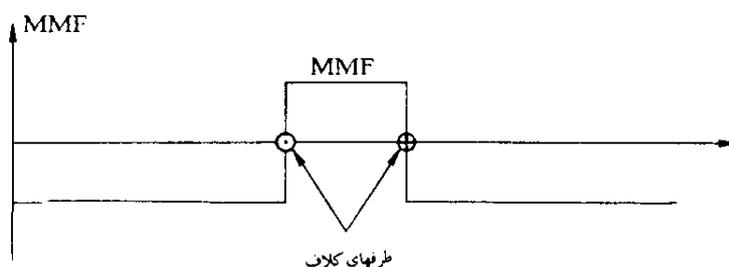
ماشینهای سنکرون با بیش از یک زوج قطب تحریک، دارای سیم پیچهای استاتور با تعداد مشابه کلاف<sup>۱</sup> هستند. در بررسیها، مناسب است که فقط یک زوج قطب را در نظر گرفت و تشخیص داد که شرایط برای سایر زوج قطبها، مشابه است. از این رو، زوایا معمولاً برحسب رادیان یا درجه الکتریکی، اندازه گیری می شوند. زاویه تحت پوشش یک زوج قطب معادل  $2\pi$  رادیان یا  $360^\circ$  الکتریکی است. رابطه بین زاویه  $\theta$  (برحسب واحد الکتریکی) و  $\theta_m$  (برحسب واحد مکانیکی) به صورت زیر است:

$$\theta = \frac{P_f}{p} \theta_m \quad (2-3)$$

### ۳-۱-۳ شکل امواج نیروی محرکه مغناطیسی

در عمل، سیم پیچهای آرمیچر و سیم پیچهای تحریک ماشین روتور استوانه‌ای در تعداد زیادی شکاف توزیع می‌شود تا شکل امواج نیروی محرکه مغناطیسی و شار حاصل، تقریباً توزیع فضایی سینوسی داشته باشند. در حالت ماشینهای قطب برجسته که دارای سیم پیچهای متمرکز بر روی قطبها هستند، با شکلدهی مناسب قطبها، سعی می‌شود هارمونیکهای شار حاصل حداقل شود.

ابتدا شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی را که فقط به علت سیم پیچهای آرمیچر ایجاد می‌شود، در نظر بگیرید. در شکل ۳-۵، نیروی محرکه مغناطیسی، که به علت جریان تنها یک کلاف از فاز a ایجاد شده، نشان داده شده است. در این شکل به منظور نمایش شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی، استاتور به صورت گسترده و باز شده نمایش داده شده است.

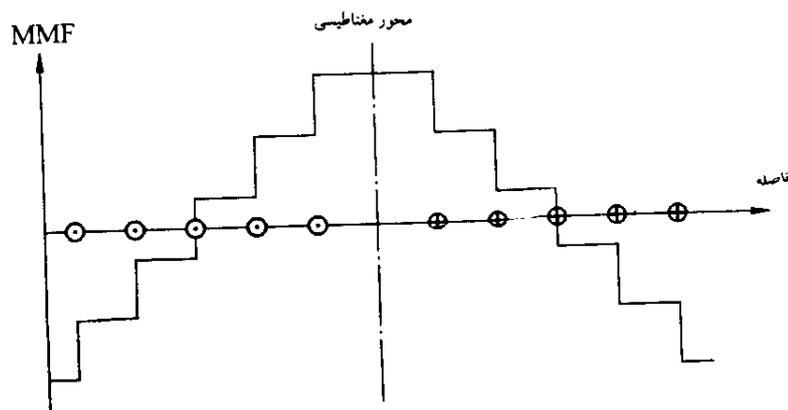


شکل ۳-۵ شکل موج MMF ناشی از یک کلاف

با افزایش تعداد کلافها، شکل موجی مطابق شکل ۳-۶، به دست می‌آید. مشاهده می‌شود که با افزایش کلافها، رفته رفته شکل موج از حالت مربعی به حالت سینوسی نزدیکتر می‌شود. با استفاده از سیم پیچهای با گام (کمانه) کسری<sup>۱</sup> می‌توان هارمونیکهای فضایی را کم کرد [۱۲].

1. Fractional – pitch

طراحی ماشین سعی بر این است تا هارمونیکها کاهش یابد و در اغلب بررسیهای مربوط به عملکرد ماشین، کافی است که شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی هر فاز را سینوسی فرض نماییم. در این صورت گفته می شود که سیم پیچها به صورت سینوسی توزیع شده اند. از دیدگاه عملکرد ماشین، می توان هارمونیکها را مسأله ای فرعی به حساب آورد. هارمونیکها علاوه بر ایجاد تلفات سطحی روتور در اثر جریانهای گردابی، بر مقدار راکتانسهای نشتی<sup>۱</sup> آرمیچر نیز تأثیر می گذارند.



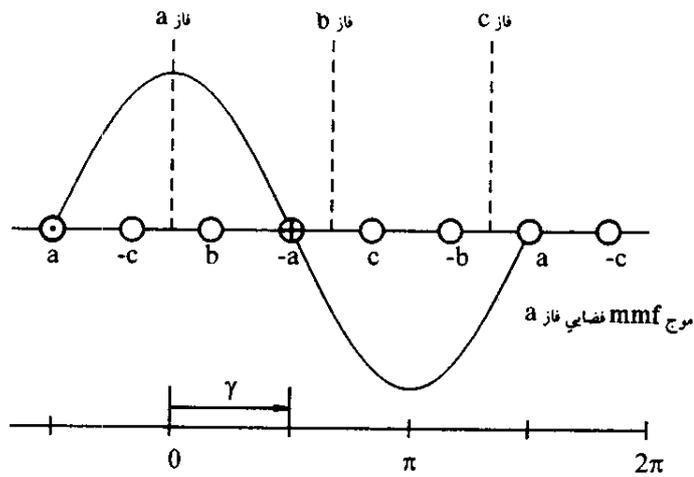
شکل ۳-۶ شکل موج MMF ناشی از تعدادی کلاف

#### میدان مغناطیسی چرخان

اکنون شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی حاصل از جریانهای هر سه فاز استاتور را تعیین می نماییم. شکل ۳-۷، شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی فاز  $a$  را نشان می دهد. اگر زاویه بین هر نقطه از پیرامون استاتور نسبت به محور مغناطیسی (مرکز) فاز  $a$  باشد، شکل موج

1. Leakage

نیروی محرکه مغناطیسی سه فاز را می توان به صورت زیر نشان داد:



شکل ۷-۳ موج mmf فضایی فاز a

$$MMF_a = Ki_a \cos \gamma$$

$$MMF_b = Ki_b \cos \left[ \gamma - \frac{2\pi}{3} \right]$$

$$MMF_c = Ki_c \cos \left[ \gamma + \frac{2\pi}{3} \right]$$

که  $i_a$ ،  $i_b$  و  $i_c$  جریانهای لحظه‌ای فازها هستند و  $K$  ضریبی ثابت است. هر سیم پیچ یک نیروی محرکه مغناطیسی ایستا ایجاد می‌کند که دامنه آن همزمان با تغییرات لحظه‌ای جریان در سیم پیچ مربوطه، تغییر می‌نماید. سه نیروی محرکه مغناطیسی که به علت سه فاز ایجاد می‌شوند به صورت فضایی،  $120^\circ$  الکتریکی با یکدیگر اختلاف فاز دارند.

### 1. Stationary

زمانی که جریانها، متعادل باشند اگر به طور اختیاری، مبدأ زمان را لحظه‌ای فرض کنیم که جریان  $i_a$ ، حد اکثر است، آنگاه داریم:

$$i_a = I_m \cos(\omega_s t)$$

$$i_b = I_m \cos\left[\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right] \quad (3-3)$$

$$i_c = I_m \cos\left[\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right]$$

که  $\omega_s = 2\pi f$  فرکانس زاویه‌ای جریانهای استاتور بر حسب رادیان الکتریکی بر ثانیه است. نیروی محرکه مغناطیسی کل به علت هر سه فاز برابر است با:

$$\begin{aligned} \text{MMF}_{\text{total}} &= \text{MMF}_a + \text{MMF}_b + \text{MMF}_c \\ &= KI_m \left[ \cos(\omega_s t) \cos \gamma + \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (4-3) \\ &= \frac{3}{2} KI_m \cos(\gamma - \omega_s t) \end{aligned}$$

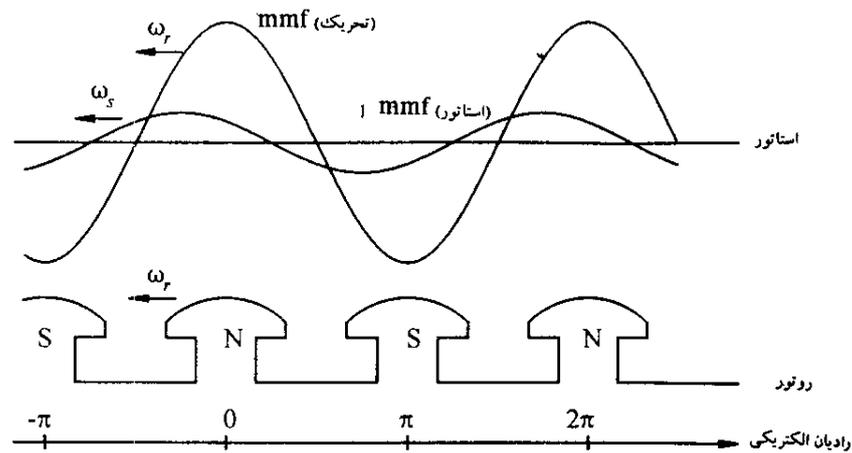
این معادله یک موج سیار<sup>۱</sup> است. در هر لحظه زمانی، نیروی محرکه مغناطیسی کل یک توزیع فضایی سینوسی دارد که دامنه آن ثابت و زاویه فضایی فاز آن  $\omega_s t$  است که تابعی از زمان است. از این رو کل موج با سرعت زاویه‌ای ثابت  $\omega_s$  (بر حسب رادیان الکتریکی بر ثانیه) در حال حرکت است. برای ماشینی که دارای  $p_f$  قطب تحریک است، سرعت زاویه‌ای میدان استاتور برابر است با:

$$\omega_{sm} = \frac{2}{p_f} \omega_s \quad (3-5 \text{ الف})$$

یا:

$$n_s = \frac{60 \cdot \omega_{sm}}{2\pi} = \frac{120 \cdot f}{p_f} \quad (3-5 \text{ ب})$$

این سرعت همان سرعت سنکرون روتور مطابق با معادله ۳-۱ است. از این رو در حالتی که جریانهای استاتور متعادل است، نیروی محرکه مغناطیسی کل، که به علت جریانهای استاتور ایجاد می‌شود، نسبت به روتور ایستاست. در شکل ۳-۸ امواج نیروی محرکه مغناطیسی استاتور و روتور نسبت به ساختمان روتور نشان داده شده که در آن هم استاتور و هم روتور به صورت گسترده و باز در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۳-۸ شکل موج mmf مربوط به استاتور و روتور

دامنه موج نیروی محرکه مغناطیسی استاتور و موقعیت نسبی آن نسبت به موج نیروی محرکه مغناطیسی روتور بستگی به بار (خروجی) ماشین سنکرون دارد. گشتاور الکترو مغناطیسی روی روتور در جهتی عمل می‌کند که میدانهای مغناطیسی را در یک راستا قرار دهد. اگر میدان روتور نسبت به میدان آرمیچر، پیش فاز باشد، گشتاور در جهت مخالف چرخش روتور عمل می‌کند و ماشین به صورت ژنراتور کار می‌کند. از طرف دیگر، زمانی که میدان روتور نسبت به میدان آرمیچر، پس فاز باشد، گشتاور، در جهت چرخش روتور عمل می‌کند و ماشین به صورت موتور کار می‌کند. به عبارت دیگر، در حالت ژنراتوری، میدان روتور با تأثیر

گشتاور اعمال شده از طرف توربین (محرک) نسبت به میدان آرمیچر جلو می‌افتد. در حالت موتوری به علت گشتاور باز دارنده بار محور (مکانیکی)، عکس موضوع اتفاق می‌افتد.

### ۳-۱-۴ محورهاى طولی<sup>۱</sup> و عرضی<sup>۲</sup>

با توجه به اینکه مدارهای مغناطیسی و تمام سیم پیجهای روتور نسبت به محورهاى قطبی<sup>۳</sup> و بین قطبی<sup>۴</sup> متقارن هستند، در بررسی مشخصه‌های ماشین سنکرون مناسب است که دو محور زیر را مطابق با شکل ۳-۱ تعریف نمود:

- محور طولی (d)، که از لحاظ مغناطیسی در مرکز قطب مثبت قرار گرفته است.
- محور عرضی (q)، که  $90^\circ$  الکتریکی از محور d، جلو است.

موقعیت روتور نسبت به استاتور را با زاویه  $\theta$ ، که زاویه بین محور d و محور مغناطیسی سیم پیچ فاز a است، اندازه می‌گیرند. انتخاب اینکه محور q نسبت به محور d، پیش فاز باشد کاملاً اختیاری است. این قرارداد بر اساس تعاریف استاندارد IEEE [۱۵] اختیار شده است و به صورت وسیعی استفاده می‌شود. می‌توان عکس موضوع را نیز اختیار کرد [۱۶، ۱۷].

### ۳-۲ توصیف ریاضی ماشین سنکرون

در به دست آوردن معادلات ماشین سنکرون فرض می‌کنیم که:

الف) از نظر تأثیر متقابل<sup>۵</sup> با روتور، سیم پیجهای استاتور به صورت سینوسی در امتداد فاصله هوایی توزیع شده‌اند،

ب) شکافهای موجود در بدنه استاتور تأثیر قابل توجهی بر اندوکتانسهای روتور در حال حرکت ندارند،

ج) پسماند قابل چشم پوشی است،

د) تأثیر اشباع مغناطیسی، قابل چشم پوشی است.

فرضیات "الف"، "ب" و "ج" منطقی است. توجیه آن، این است که با فرضیات فوق،

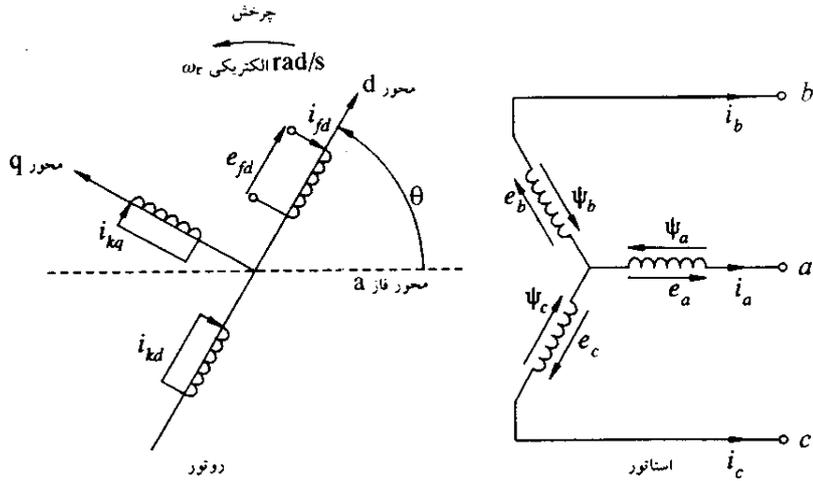
1. Direct      2. Quadrature      3. Polar      4. Inter – polar

5. Mutual Effects

عکس‌العملهای محاسبه شده ماشین با عملکرد ماشین در حالت واقعی مطابقت دارد. فرض "د" به منظور سهولت در بررسی ماشین اتخاذ شده است. با پذیرش این فرض، با مدارهای وابسته خطی مواجه هستیم که قانون جمع آثار<sup>۱</sup> را می‌توان در مورد آنها به کاربرد. با وجود این، تأثیر اشباع مهم است و روشهای تقریبی به منظور به حساب آوردن آن در بخش ۳-۸ مورد بحث قرار خواهد گرفت. در ابتدا معادلات ماشین را بر اساس فرض خطی بودن رابطه شار - جریان به دست می‌آوریم.

شکل ۳-۹ مدارهای لازم در بررسی یک ماشین سنکرون را نشان می‌دهد. مدارهای استاتور از سیم پیچهای سه فاز آرمیچر تشکیل شده که جریانهای متناوب حمل می‌کنند. مدارهای روتور شامل سیم پیچهای تحریک و میراکننده است. به منظور سهولت در امر بررسی، فرض می‌کنیم که جریانهای مربوط به سیم پیچ میراکننده (یا هسته روتور) از دو مدار بسته که میدان مغناطیسی یکی در جهت محور طولی (جهت میدان تحریک) و دیگری در جهت محور عرضی (عمود بر میدان تحریک) است، عبور می‌کنند. همچنان که قبلاً بحث شد، مدارهای میراکننده، شکلهای مختلفی دارد و ممکن است نتوان آنها را به شکل مدارهای الکتریکی مستقل از هم فرض کرد. در طراحی ماشین، از تعداد زیادی مدار برای نمایش تأثیر آنها استفاده می‌کنند. در بررسی سیستم که مشخصه‌های ماشین از دیدگاه پایانه‌های استاتور و روتور مورد توجه است، تعداد محدودی مدار را می‌توان به کار برد. تعداد به نوع ساختار روتور و محدوده فرکانسی بستگی دارد و مدل باید مشخصه‌های ماشین را به صورت دقیق نمایش دهد. در مطالعات پایداری سیستمهای قدرت بندرت اتفاق می‌افتد که بیش از دو یا سه مدار در هر محور جهت نمایش تأثیر میراکننده‌ها لازم باشد. در شکل ۳-۹ به منظور سهولت، تنها یک مدار در هر محور در نظر گرفته شده است. با این فرض، معادلات ماشین به دست می‌آیند. با اینهمه، با زیرنویس  $k$ ، می‌توان تعداد دلخواهی از این مدارها را در نظر گرفت.

در شکل‌های ۳-۱ و ۳-۹،  $\theta$  زاویه‌ای است که محور  $d$  (طولی) به اندازه آن از محور مغناطیسی سیم پیچ فاز  $a$ ، در جهت حرکت پیش است. از آنجا که روتور نسبت به استاتور، با



سیم پیچهای فاز استاتور : a , b , c

سیم پیچ تحریک : fd

مدار میراکننده محور d : kd

مدار میراکننده محور q : kq

k = ۱ و ۲ و ... و n ، n = تعداد مدار میراکننده

$\theta$  = زاویه‌ای که به آن اندازه، محور d برحسب رادبان الکتریکی نسبت به محور منطقی فاز a، جلو است.

$\omega_r$  = سرعت زاویه‌ای روتور برحسب رادبان الکتریکی بر ثانیه

شکل ۳-۹ مدارهای استاتور و روتور ماشین سنکرون

سرعت زاویه‌ای  $\omega_r$  در حال چرخش است، با افزایش زمان،  $\theta$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta = \omega_r t$$

معادلات الکتریکی حاکم بر یک ماشین سنکرون را می‌توان با نوشتن معادلات مدارهای تزویجی<sup>۱</sup> در شکل ۳-۹ به دست آورد. قبل از انجام این کار، مناسب است که مروری بر

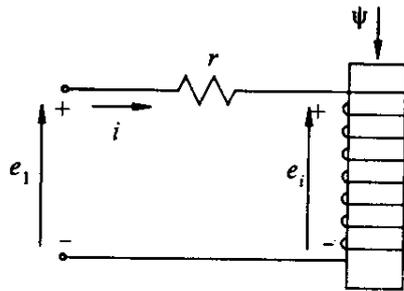
1. Coupled

چگونگی نوشتن معادلات مدارهای ساده صورت پذیرد.

### ۳-۲-۱ مروری بر معادلات مدارهای مغناطیسی

مدار تک تحریکه

مدار ابتدایی شکل ۳-۱۰ را که در آن یک کلاف با تعداد دور  $N$  و مقاومت  $r$  تحریک شده در نظر بگیرید. با فرض خطی بودن رابطه بین شار و نیروی محرکه مغناطیسی و بر اساس قانون فارادی<sup>۱</sup> ولتاژ القا شده  $e_i$  برابر است با:



شکل ۳-۱۰ مدار مغناطیسی تک تحریک

$$e_i = \frac{d\Psi}{dt} \quad (۶-۳)$$

که  $\Psi$ ، مقدار لحظه‌ای شار دور<sup>۲</sup> و  $t$ ، زمان است. در این صورت ولتاژ پایانه  $e_1$  برابر است با:

$$e_1 = \frac{d\Psi}{dt} + ri \quad (۷-۳)$$

1. Faraday's Law

2. Flux Linkage



شار دور را می توان بر حسب اندوکتانس مدار ( $L$ ) به صورت زیر نوشت:

$$\Psi = Li \quad (۸-۳)$$

طبق تعریف، اندوکتانس، مساوی شار دور به ازای هر واحد جریان است. بنابراین:

$$L = N \frac{\Phi}{i} \quad (۹-۳)$$

$$= N^2 P$$

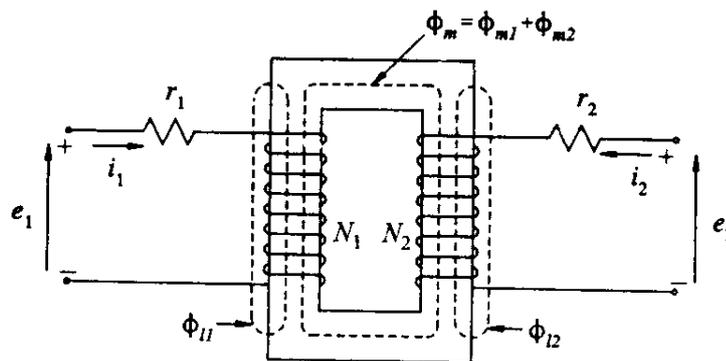
که:

$P$  : نفوذ پذیری مغناطیسی (عکس مقاومت مغناطیسی)

و  $\Phi$  : شار مساوی (MMF)P یا NiP است.

#### مدارهای تزویجی

اکنون شکل ۱۱-۳ را در نظر بگیرید که از دو سیم پیچ تزویج مغناطیسی، تشکیل شده است. سیم پیچها دارای تعداد دور  $N_1$ ،  $N_2$  و مقاومتهای  $r_1$  و  $r_2$  هستند. فرض می شود که رابطه ای خطی بین شار و نیروی محرکه مغناطیسی برقرار باشد. جریانهای  $i_1$ ،  $i_2$  دو سیم پیچ را به طرف داخل، مثبت فرض می کنیم. در این صورت، ولتاژهای پایانه ها برابر است با:



شکل ۱۱-۳ مدارهای با تزویج مغناطیسی

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1 \quad (10-3)$$

$$e_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2 \quad (11-3)$$

میدان مغناطیسی، از جریانهای هر دو سیم پیچ تعیین می‌گردد. از این رو،  $\psi_1$  و  $\psi_2$  شار دور هر سیم پیچ است که به وسیله جریانهای هر دو سیم پیچ ایجاد شده، بنابراین:

$$\psi_1 = N_1(\Phi_{m1} + \Phi_{l1}) + N_1 \Phi_{m2} \quad (12-3)$$

$$\psi_2 = N_2(\Phi_{m2} + \Phi_{l2}) + N_2 \Phi_{m1} \quad (13-3)$$

که:

$\Phi_{m1}$  : شار متقابل<sup>۱</sup> گذرنده از هر دو سیم پیچ تنها با احتساب جریان سیم پیچ شماره یک؛

$\Phi_{l1}$  : شار نشتی<sup>۲</sup> سیم پیچ شماره یک؛

$\Phi_{m2}$  : شار متقابل گذرنده از هر دو سیم پیچ تنها با احتساب جریان سیم پیچ شماره دو؛

و  $\Phi_{l2}$  : شار نشتی سیم پیچ شماره دو است.

شار دورها را می‌توان بر حسب اندوکتانسهای خودی و متقابل به صورت زیر بیان نمود:

اندوکتانس خودی<sup>۳</sup> طبق تعریف، شار دور به ازای یک واحد جریان در همان سیم پیچ است. از

این رو، این اندوکتانس برای سیم پیچهای یک و دو به ترتیب برابر است با:

$$L_{11} = N_1(\Phi_{m1} + \Phi_{l1})/i_1 \quad (14-3)$$

$$L_{22} = N_2(\Phi_{m2} + \Phi_{l2})/i_2 \quad (15-3)$$

یا:

$$L_{11} = L_{m1} + L_{l1} \quad (16-3)$$

$$L_{22} = L_{m2} + L_{l2} \quad (17-3)$$

که  $L_{m1}$  و  $L_{m2}$ ، اندوکتانسهای مغناطیس کننده و  $L_{11}$  و  $L_{12}$ ، اندوکتانسهای نشتی دو سیم پیچ است.

اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ طبق تعریف، شار دور یک سیم پیچ به ازای یک واحد جریان در سیم پیچ دیگر است. از این رو، اندوکتانس متقابل بین سیم پیچهای ۱ و ۲ برابر است با:

$$L_{12} = N_1 \Phi_{m2} / i_2 \quad (18-3)$$

یا:

$$L_{21} = N_2 \Phi_{m1} / i_1 \quad (19-3)$$

اگر  $P$  نفوذپذیری مغناطیسی مسیر شار متقابل باشد:

$$\Phi_{m1} = N_1 i_1 P \quad (20-3)$$

$$\Phi_{m2} = N_2 i_2 P \quad (21-3)$$

از معادلات ۱۸-۳ تا ۲۱-۳ می توان نتیجه گرفت که:

$$L_{12} = L_{21} = N_1 N_2 P \quad (22-3)$$

با جایگذاری معادلات ۱۶-۳ تا ۱۹-۳ در معادلات ۱۲-۳ و ۱۳-۳ روابط زیر را برای شار دور هر دو سیم پیچ (بر حسب اندوکتانسهای خودی و متقابل) نتیجه می دهد:

$$\Psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \quad (23-3)$$

$$\Psi_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \quad (24-3)$$

در معادلات فوق مهم است که با استفاده از یک علامت جبری مناسب برای اندوکتانس متقابل، جهت نسبی شار دور خودی و متقابل را تشخیص داد. اندوکتانس متقابل، مثبت است اگر جریانهای مثبت در هر دو سیم پیچ، شارهای خودی و متقابل را در همان جهت (شارها به سمت بالا) تولید کنند، در غیر این صورت، اندوکتانس، منفی است.

معادلات ۱۰-۳ و ۱۱-۳ برای ولتاژ به همراه معادلات ۲۳-۳ و ۲۴-۳ برای شار دور، مجموعاً معادلات عملکرد مدارهای خطی استاتیکی تزویجی (موضوع شکل ۱۱-۳) را نشان

می‌دهند. در این نوع نمایش، از اندوکتانسهای خودی و متقابل سیم پیچها به عنوان پارامتر استفاده می‌شود. یک اندوکتانس، تناسب بین شار دور و جریان را نشان می‌دهد. همچنان که از معادلات ۳-۹ و ۳-۲۲ برمی‌آید، اندوکتانس با مقاومت مسیر مغناطیسی مربوطه، نسبت عکس (و با نفوذ پذیری مغناطیسی، نسبت مستقیم) دارد.

در به دست آوردن معادلات مدارهای مغناطیسی این بخش، به طور صریح صحبتی از واحدهای کمیت‌های سیستم مطرح نشد. این معادلات را می‌توان برای هر سیستم واحد منطقی به کاربرد.

در نهایت قبل از پرداختن به معادلات ماشین سنکرون ذکر یک نکته در خصوص علامتهای مورد استفاده ضروری است. در بررسی مدار، معمولاً از  $i$  برای نمایش شار دور استفاده می‌شود حال آنکه در فرهنگ ماشینهای سنکرون و پایداری سیستمهای قدرت، عموماً از  $\psi$  استفاده می‌شود. در این کتاب از  $\psi$  استفاده می‌شود ضمن اینکه زمانی که در فصول آینده از  $i$  برای نمایش مقادیر ویژه استفاده می‌شود، ابهام پیش نمی‌آید.

### ۳-۲-۲ معادلات اصلی حاکم بر ماشین سنکرون

همان شکل کلی معادلات به دست آمده در بخش قبل، در مورد مدارهای تزویجی شکل ۳-۹ صدق می‌کند. با وجود این، جهت جریان سیم پیچهای استاتور را ژنراتوری و به طرف بیرون و جهت جریانهای سیم پیچهای تحریک و میراکننده را به سمت داخل فرض می‌کنیم.

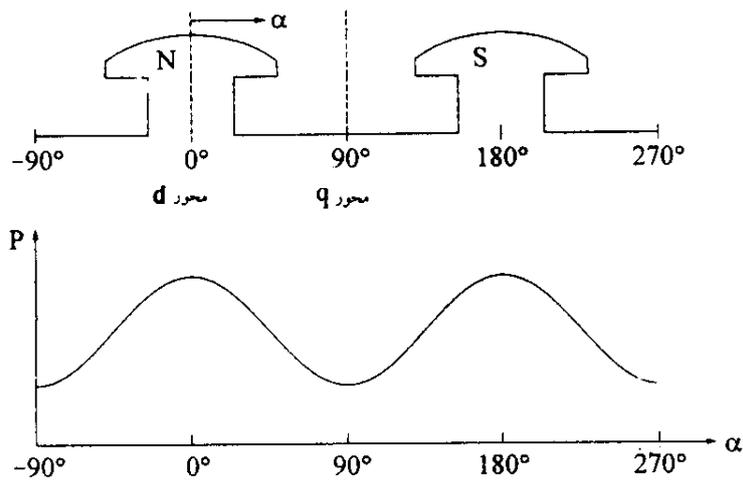
علاوه بر تعداد زیاد مدار موجود، این حقیقت که اندوکتانسهای خودی و متقابل مدارهای استاتور، با موقعیت روتور تغییر می‌کنند، معادلات ماشین سنکرون را پیچیده می‌کند. تغییرات اندوکتانسها به این دلیل ایجاد می‌شود که مقاومت مسیر میدان مغناطیسی به علت عدم یکنواختی فاصله هوایی، تغییر می‌کند. این موضوع در یک ماشین قطب برجسته، بیشتر ظهور می‌کند که در آن مقاومت مغناطیسی در دو محور کاملاً متفاوت است. حتی در یک ماشین روتور استوانه‌ای، به علت تعداد زیاد شکاف مربوط به سیم پیچ تحریک، مقاومت مغناطیسی دو محور، با هم تفاوتی دارد.

شار ایجاد شده به وسیله یک سیم پیچ استاتور در مسیری از طریق آهن استاتور، فاصله هوایی، آهن روتور و مجدداً فاصله هوایی عبور می‌کند. تغییرات مقاومت مغناطیسی این مسیر

را می‌توان بر حسب تابعی از موقعیت روتور، به صورت تقریبی ذیل بیان نمود.

$$P = P_0 + P_r \cos 2\alpha \quad (25-3)$$

که در آن  $P$ ، نفوذپذیری مغناطیسی و  $\alpha$  مطابق با شکل ۱۲-۳، فاصله زاویه‌ای محیط نسبت به محور طولی ( $d$ ) روتور است. از آنجا که مقاومت مغناطیسی قطبهای مثبت و منفی، مساوی است، تغییراتی بر حسب  $2\alpha$  ایجاد می‌شود. در عمل، هارمونیکهای زوج بیشتری وجود دارد که به علت کوچکی از آنها صرف نظر می‌شود.



شکل ۱۲-۳ تغییر نفوذپذیری مغناطیسی با موقعیت روتور

در بیان معادلات مربوط به سیم پیچهای روتور و استاتور، از قراردادهای زیر استفاده

می‌کنیم:

ولتاژهای لحظه‌ای فاز به زمین استاتور؛  $e_a, e_b, e_c$

جریانهای لحظه‌ای در فازهای  $a, b$  و  $c$ ؛  $i_a, i_b, i_c$

ولتاژ تحریک؛  $e_{fd}$

جریان در سیم پیچهای تحریک، میراکننده محور d و میراکننده محور q؛	$i_{fd}, i_{kd}, i_{kq}$
مقاومت‌های مربوط به سیم پیچهای روتور؛	$R_{fd}, R_{kd}, R_{kq}$
اندوکتانسهای خودی سیم پیچهای استاتور؛	$l_{aa}, l_{bb}, l_{cc}$
اندوکتانسهای متقابل بین سیم پیچهای استاتور؛	$l_{ab}, l_{bc}, l_{ca}$
اندوکتانسهای متقابل بین سیم پیچهای استاتور و روتور؛	$l_{afd}, l_{akd}, l_{akq}$
اندوکتانسهای خودی سیم پیچهای روتور؛	$l_{ffd}, l_{kkd}, l_{kkq}$
مقاومت هر فاز آرمیچر؛	$R_a$
اپراتور مشتق (d/dt).	$p$

## معادلات مدارهای استاتور

معادلات ولتاژ سه فاز، به صورت زیر است.

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a = p\psi_a - R_a i_a \quad (26-3)$$

$$e_b = p\psi_b - R_a i_b \quad (27-3)$$

$$e_c = p\psi_c - R_a i_c \quad (28-3)$$

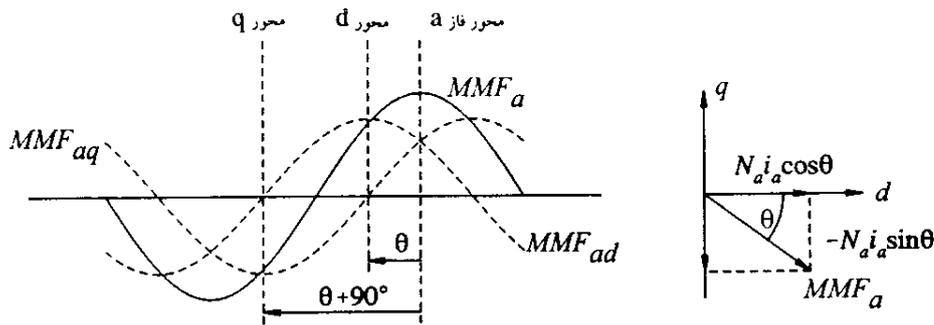
شار دور فاز a در هر لحظه برابر است با:

$$\psi_a = -l_{aa} i_a - l_{ab} i_b - l_{ac} i_c + l_{afd} i_{fd} + l_{akd} i_{kd} + l_{akq} i_{kq} \quad (29-3)$$

معادلات مشابهی را می‌توان برای شار دور سیم پیچهای b و c نوشت. واحدهای مورد استفاده، وبر<sup>۱</sup>، هانری<sup>۲</sup> و آمپر است. علامت منفی مربوط به جریان در سیم پیچهای استاتور، به علت قرارداد مورد استفاده است. اکنون نشان خواهیم داد که تمام اندوکتانسهای معادله ۳-۲۹، تابعی از موقعیت روتور و در نتیجه، متغیر با زمان است.

## اندوکتانسهای خودی استاتور

اندوکتانس خودی  $L_{aa}$  مساوی نسبت شار دور فاز  $a$  به جریان  $i_a$  است، زمانی که جریان در بقیه مدارها، صفر باشد. اندوکتانس، با نفوذپذیری مغناطیسی نسبت مستقیم دارد که به صورت معادله ۳-۲۵ بیان شد. اندوکتانس  $L_{aa}$  در  $\theta=0^\circ$  حداکثر، در  $\theta=90^\circ$ ، حداقل و در  $\theta=180^\circ$  حداکثر (و به همین ترتیب) خواهد بود. با چشمپوشی از هارمونیکهای فضایی، نیروی محرکه مغناطیسی فاز  $a$ ، یک توزیع فضایی سینوسی دارد که اوج آن بر محور فاز  $a$ ، متمرکز است. دامنه اوج موج نیروی محرکه مغناطیسی، مساوی  $N_a i_a$  است که  $N_a$ ، تعداد دور مؤثر هر فاز است. مطابق با شکل ۳-۱۳، می توان این موج را به دو نیروی محرکه مغناطیسی سینوسی دیگر، یکی در جهت محور طولی دیگری در جهت محور عرضی تجزیه نمود. مقادیر اوج این



شکل ۳-۱۳ موج mmf فاز  $a$  و مؤلفه‌های آن

دو مؤلفه برابر است با:

$$\text{اوج } MMF_{ad} = N_a i_a \cos \theta \quad (3-30)$$

$$\text{اوج } MMF_{aq} = N_a i_a \cos(\theta + 90^\circ) = -N_a i_a \sin \theta \quad (3-31)$$

دلیل تجزیه نیروی محرکه مغناطیسی به دو مؤلفه این است که هر یک در فاصله هوایی

مشخصی عمل می‌کنند. شارهای فاصله هوایی هر قطب در دو محور برابر است با:

$$\Phi_{gad} = (N_a i_a \cos \theta) P_d \quad (32-3)$$

$$\Phi_{gaq} = (-N_a i_a \sin \theta) P_q \quad (33-3)$$

در روابط فوق،  $P_d$  و  $P_q$  ضرایب مربوط به نفوذپذیری مغناطیسی محورهای طولی و عرضی است. علاوه بر مقاومت‌های مغناطیسی واقعی، این ضرایب، عوامل مورد نیاز برای احتساب رابطه شار در هر قطب با مقدار اوج موج نیروی محرکه مغناطیسی را در نظر می‌گیرند. شار دور کل فاصله هوایی برابر است با:

$$\begin{aligned} \Phi_{gaa} &= \Phi_{gad} \cos \theta - \Phi_{gaq} \sin \theta \\ &= N_a i_a (P_d \cos^2 \theta + P_q \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (34-3)$$

$$= N_a i_a \left[ \frac{P_d + P_q}{2} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos 2\theta \right]$$

خود القای فاز  $a$ ، به علت فاصله هوایی برابر است با:

$$\begin{aligned} I_{gaa} &= \frac{N_a \Phi_{gaa}}{i_a} \\ &= N_a^2 \left[ \frac{P_d + P_q}{2} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos 2\theta \right] \quad (35-3) \\ &= L_{g_0} + L_{aa2} \cos 2\theta \end{aligned}$$

خود القای کل،  $I_{aa}$ ، مساوی با مجموع  $I_{gaa}$  با اندوکتانس ناشی  $L_{al}$  است که به علت شار ناشی که از فاصله هوایی عبور نمی‌کند، ایجاد می‌شود. در نتیجه:

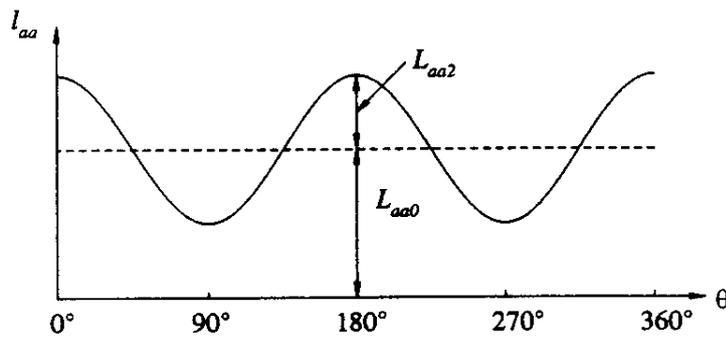
$$\begin{aligned} I_{aa} &= L_{al} + I_{gaa} \\ &= L_i + L_{g_0} + L_{aa2} \cos 2\theta \quad (36-3) \\ &= L_{aa_0} + L_{aa2} \cos 2\theta \end{aligned}$$

با توجه به اینکه ساختار فازهای  $b$ ،  $c$  مشابه با فاز  $a$  و با اختلاف زاویه‌ای به ترتیب  $120^\circ$  و  $240^\circ$  است، در نتیجه:

$$I_{bb} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (37-3)$$

$$I_{cc} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (38-3)$$

تغییرات  $I_{aa}$  برحسب  $\theta$  در شکل ۱۴-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۳ تغییر خودالقاه فاز استاتور

در معادلات ۳۶-۳، ۳۷-۳ و ۳۸-۳، اندوکتانسهای خودی استاتور دارای یک جمله ثابت و یک جمله هارمونیک دوم هستند. در اینجا از هارمونیکهای با درجه بالاتر صرف نظر شده است. در یک ماشین سنکرون با طراحی درست که سیم پیچهای استاتور و روتور آن، شار و نیروی محرکه مغناطیسی با توزیع سینوسی، ایجاد می‌کنند، این هارمونیکها قابل صرف نظر است.

#### اندوکتانسهای متقابل استاتور

اندوکتانسهای متقابل بین هر دو سیم پیچ استاتور نیز به علت ساختمان روتور، دارای تغییراتی به صورت هارمونیک دوم هستند. این اندوکتانسها منفی هستند و مقدار قدر مطلق آنها زمانی

حداکثر است که قطبهای مثبت و منفی، فاصله‌ای یکسان از مراکز دو سیم پیچ مربوطه داشته باشند. به عنوان مثال، مقدار قدر مطلق  $I_{ab}$  زمانی حداکثر است که  $\theta = -30^\circ$  یا  $\theta = 150^\circ$  باشد. اندوکتانس متقابل  $I_{ab}$  را می‌توان بدین صورت محاسبه نمود که ابتدا شار فاصله هوایی،  $\Phi_{gba}$ ، در فاز  $b$  را زمانی که فقط فاز  $a$  جریان دارد، محاسبه نمود. از آنجا که هدف، پیدا کردن شار فاز  $b$  به علت نیروی محرکه مغناطیسی فاز  $a$  است،  $\theta$  را می‌توان در معادله ۳-۳۴ با  $\theta = 2\pi/3$  جایگزین نمود؛ در نتیجه:

$$\begin{aligned}\Phi_{gba} &= \Phi_{ga} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - \Phi_{gaq} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= N_a i_a \left[ P_d \cos\theta \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + P_q \sin\theta \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (39-3) \\ &= N_a i_a \left[ -\frac{P_d + P_q}{4} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right]\end{aligned}$$

در این صورت اندوکتانس متقابل بین فازهای  $a$  و  $b$  به علت شار فاصله هوایی برابر است با:

$$\begin{aligned}I_{gba} &= \frac{N_a \Phi_{gba}}{i_a} \\ &= -\frac{1}{4} L_{g_0} + L_{ab\tau} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned} \quad (40-3)$$

که  $I_{g_0}$  همان بیان را دارد که در مورد اندوکتانس خودی  $I_{ga}$  در معادله ۳-۳۵ مطرح شد. اگر شار متقابل بسیار کمی را که در اطراف انتهای سیم پیچها وجود دارد و از فاصله هوایی عبور نمی‌کند، به حساب آوریم، اندوکتانس متقابل بین فازهای  $a$  و  $b$  را به صورت زیر می‌توان نوشت:

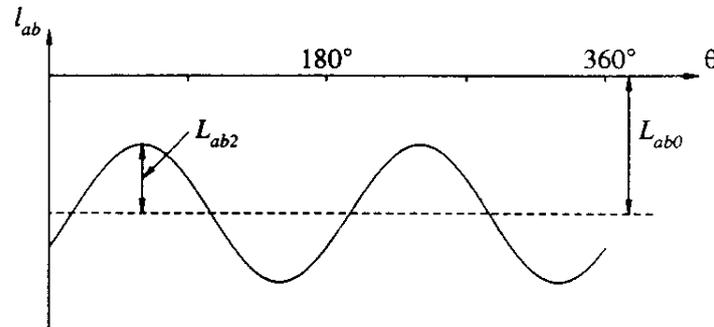
$$\begin{aligned}I_{ab} = I_{ba} &= -L_{ab_0} + L_{ab\tau} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= -L_{ab_0} - L_{ab\tau} \cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right)\end{aligned} \quad (41-3)$$

به طور مشابه:

$$I_{bc} = I_{cb} = -L_{ab_0} - L_{ab\tau} \cos(2\theta - \pi) \quad (42-3)$$

$$I_{ca} = I_{ac} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos\left(\gamma\theta - \frac{\pi}{3}\right) \quad (43-3)$$

از معادلات فوق نتیجه می شود که  $L_{ab2} = L_{aa2}$  است. این نتیجه قابل انتظار است زیرا که همان تغییرات مقاومت مغناطیسی است که باعث پیدایش عبارت هارمونیک دوم در اندوکتانسهای خودی و متقابل می شود. نیز توجه کنید که  $L_{ab0}$  با  $L_{aa0}/2$  تقریباً مساوی است. تغییرات اندوکتانس متقابل بین فازهای  $a$  و  $b$  بر حسب  $\theta$ ، در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۵ تغییر اندوکتانس متقابل میان سیم پیچهای استاتور

#### اندوکتانس متقابل بین سیم پیچهای استاتور و روتور

اگر از تغییرات فاصله هوایی به علت وجود شکافها صرفنظر کنیم، مدارهای روتور مقاومت مغناطیسی ثابتی را می بینند. از این رو، در این حالت تغییرات فاصله هوایی وجود ندارد. در عوض، تغییرات اندوکتانس متقابل بین سیم پیچها به علت حرکت نسبی خود سیم پیچها اتفاق می افتد.

زمانی که یک سیم پیچ استاتور با سیم پیچ دیگری از روتور در یک راستا قرار می گیرند، شاری که از هر دو سیم پیچ می گذرد و در نتیجه، اندوکتانس متقابل، حداکثر است. زمانی که دو سیم پیچ،  $90^\circ$  با یکدیگر اختلاف موقعیت داشته باشند، هیچ شاری از هر دو سیم پیچ نمی گذرد و در نتیجه اندوکتانس متقابل، صفر است. با فرض شکل موج سینوسی برای امواج نیروی

محركه مغناطیسی و شار، داریم:

$$I_{afd} = L_{afd} \cos \theta \quad (44-3)$$

$$I_{akd} = L_{akd} \cos \theta \quad (45-3)$$

$$\begin{aligned} I_{akq} &= L_{akq} \cos \left( \theta + \frac{\pi}{3} \right) \\ &= -L_{akq} \sin \theta \end{aligned} \quad (46-3)$$

برای به دست آوردن اندوکتانس متقابل بین فاز  $b$  و سیم پیچهای روتور،  $\theta$  را با  $\theta - 2\pi/3$  و برای بدست آوردن اندوکتانس متقابل بین فاز  $c$  و سیم پیچهای روتور،  $\theta$  را با  $\theta + 2\pi/3$ ، جایگزین نمایید.

اکنون تمام روابط مربوط به اندوکتانسهایی که در معادلات ولتاژ استاتور ظاهر می شود، به دست آمده اند. با جایگزینی این روابط در معادله ۳-۲۹ داریم:

$$\begin{aligned} \Psi_a &= -i_a [L_{aa.} + L_{aa\tau} \cos \gamma \theta] + i_b \left[ L_{ab.} + L_{aa\tau} \cos \left( \gamma \theta + \frac{\pi}{3} \right) \right] \\ &+ i_c \left[ L_{ab.} + L_{aa\tau} \cos \left( \gamma \theta - \frac{\pi}{3} \right) \right] + i_{fd} L_{afd} \cos \theta \\ &+ i_{kd} L_{akd} \cos \theta - i_{kq} L_{akq} \sin \theta \end{aligned} \quad (47-3)$$

به طور مشابه:

$$\begin{aligned} \Psi_b &= i_a \left[ L_{ab.} + L_{aa\tau} \cos \left( \gamma \theta + \frac{\pi}{3} \right) \right] - i_b \left[ L_{aa.} + L_{aa\tau} \cos \gamma \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ &+ i_c \left[ L_{ab.} + L_{aa\tau} \cos \left( \gamma \theta - \pi \right) \right] + i_{fd} L_{afd} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ &+ i_{kd} L_{akd} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) - i_{kq} L_{akq} \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (48-3)$$

و:

$$\begin{aligned} \Psi_c = & i_a \left[ L_{ab\gamma} + L_{aa\gamma} \cos \left( \gamma\theta - \frac{\pi}{3} \right) \right] + i_b \left[ L_{ab\gamma} + L_{aa\gamma} \cos \left( \gamma\theta - \pi \right) \right] \\ & - i_c \left[ L_{aa\gamma} + L_{aa\gamma} \cos \gamma \left( \theta + \frac{\gamma\pi}{3} \right) \right] + i_{fd} L_{afd} \cos \left( \theta + \frac{\gamma\pi}{3} \right) \quad (49-3) \\ & + i_{kd} L_{akd} \cos \left( \theta + \frac{\gamma\pi}{3} \right) - i_{kq} L_{akq} \sin \left( \theta + \frac{\gamma\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

## معادلات مدارهای روتور

معادلات ولتاژ مدارهای روتور به صورت ذیل است:

$$e_{fd} = p\Psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \quad (50-3)$$

$$0 = p\Psi_{kd} + R_{kd} i_{kd} \quad (51-3)$$

$$0 = p\Psi_{kq} + R_{kq} i_{kq} \quad (52-3)$$

به علت ساختار استوانه‌ای شکل استاتور، سیم پیچهای روتور فاصله هوایی ثابتی را می‌بینند. از این رو اندوکتانسهای خودی این سیم پیچها و اندوکتانسهای متقابل بین آنها، با موقعیت روتور تغییر نمی‌کنند و فقط اندوکتانسهای متقابل بین روتور و استاتور است که مطابق با روابط ۴۴-۳، ۴۵-۳ و ۴۶-۳ بر حسب  $\theta$  تغییر می‌کنند.

شار دور مدارهای روتور را می‌توان به صورت ذیل بیان نمود:

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{fkd} i_{kd} - L_{efd} \left[ i_a \cos \theta + i_b \cos \left( \theta - \frac{\gamma\pi}{3} \right) + i_c \cos \left( \theta + \frac{\gamma\pi}{3} \right) \right] \quad (53-3)$$

$$\Psi_{kd} = L_{fkd} i_{fd} + L_{kkd} i_{kd} - L_{akd} \left[ i_a \cos \theta + i_b \cos \left( \theta - \frac{\gamma\pi}{3} \right) + i_c \cos \left( \theta + \frac{\gamma\pi}{3} \right) \right] \quad (54-3)$$

$$\Psi_{kq} = L_{kkq} i_{kq} + L_{akq} \left[ i_a \sin \theta + i_b \sin \left( \theta - \frac{\gamma\pi}{3} \right) + i_c \sin \left( \theta + \frac{\gamma\pi}{3} \right) \right] \quad (55-3)$$

۳-۳ تبدیل dq<sub>0</sub>

معادلات ۲۶-۳ تا ۲۸-۳ و معادلات ۴۷-۳ تا ۴۹-۳ مربوط به مدارهای استاتور، به همراه معادلات ۵۰-۳ تا ۵۵-۳ مربوط به مدارهای روتور، به طور کامل عملکرد الکتریکی ماشین سنکرون را نمایش می‌دهند. اما، این معادلات دارای عبارات اندوکتانسی هستند که با  $\theta$  تغییر می‌کنند که  $\theta$  خود متغیر با زمان است. این موضوع پیچیدگی زیادی را در حل مسایل ماشینهای سنکرون و سیستمهای قدرت به وجود می‌آورد. می‌توان با تبدیل مناسب متغیرهای استاتور، به شکل ساده‌تری از معادلات دست یافت که تصویر فیزیکی گویاتری را به دست می‌دهد. با توجه به معادلات ۵۳-۳ تا ۵۵-۳ در می‌یابیم که جریانهای استاتور در هر محور تشکیل ترکیب مناسبی را داده‌اند. این موضوع باعث می‌شود که بتوان متغیرهای استاتور را به متغیرهای جدیدی به صورت زیر تبدیل کرد:

$$i_d = k_d \left[ i_a \cos \theta + i_b \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (56-3)$$

$$i_q = -k_q \left[ i_a \sin \theta + i_b \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (57-3)$$

مقادیر ثابت  $k_d$  و  $k_q$  دلخواه هستند و آنها را می‌توان به نحوی اختیار کرد که ضرایب عددی در معادلات عملکرد ماشین را ساده کنند. در اغلب آثار چاپ شده مربوط به نظریه ماشینهای سنکرون [۳، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۹]،  $k_d$  و  $k_q$  مساوی  $2/3$  اختیار شده است. همین انتخاب نیز در اینجا دنبال می‌شود. در بخش ۳-۴-۸، تبدیل دیگری با  $k_d = k_q = \sqrt{2/3}$  مورد بحث قرار خواهد گرفت.

زمانی که  $k_d$  و  $k_q$  مساوی  $2/3$  اختیار شود، در حالت متعادل سینوسی، مقادیر اوج  $i_d$  و  $i_q$  مساوی مقادیر اوج جریانهای استاتور خواهند بود. این موضوع به صورت ذیل قابل نمایش است:

در شرایط متعادل:

$$i_a = I_m \sin \omega_s t$$

$$i_b = I_m \sin \left( \omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_c = I_m \sin \left( \omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

با جایگزینی در معادله ۳-۵۶ داریم:

$$\begin{aligned} i_d &= k_d \left[ I_m \sin \omega_s t \cos \theta + I_m \sin \left( \omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + I_m \sin \left( \omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ &= k_d \frac{3}{2} I_m \sin (\omega_s t - \theta) \end{aligned}$$

برای اینکه مقدار اوج  $i_d$  مساوی  $I_m$  شود،  $k_d$  را باید مساوی  $2/3$  اختیار کرد. به صورت مشابهی در وضعیت متعادل از معادله ۳-۵۷ داریم:

$$i_q = -k_q \frac{3}{2} I_m \cos (\omega_s t - \theta)$$

که مجدداً، انتخاب  $k_q = 2/3$  منجر به مساوی شدن مقدار اوج  $i_q$  با مقدار اوج جریان استاتور می شود.

به منظور داشتن درجه کامل آزادی، مؤلفه سومی را باید تعریف کرد به طوری که جریانهای سه فاز، تبدیل به سه متغیر شوند. از آنجا که دو مؤلفه  $i_d$  و  $i_q$  میدانی را ایجاد می کنند که با میدان حاصل از جریانهای اولیه فازها یکسان است، مؤلفه سوم نباید هیچ میدانی را در فاصله هوایی ایجاد نماید. از این رو متغیر سوم مناسب، مؤلفه صفر جریان،  $i_0$ ، مربوط به مؤلفه های متقارن است. بنابراین:

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad (58-3)$$

در حالت متعادل،  $i_a + i_b + i_c = 0$  است و بنابراین  $i_0 = 0$  خواهد بود.

می‌توان تبدیل از متغیرهای فاز abc به متغیرهای dq<sub>0</sub> را به صورت ماتریسی زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (59-3)$$

تبدیل عکس به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (60-3)$$

تبدیل فوق به صورت مشابهی بر شار دورها و ولتاژهای استاتور اعمال می‌شود.

شار دورهای استاتور به صورت مؤلفه‌های dq<sub>0</sub>

با استفاده از روابط  $\Psi_a$ ،  $\Psi_b$  و  $\Psi_c$  در معادلات ۳-۴۷ تا ۳-۴۹ و تبدیل شار دورها و جریانها به مؤلفه‌های dq<sub>0</sub> با استفاده از معادله ۳-۵۹ و نیز با اعمال ساده سازهی مثلثاتی، به عبارات زیر دست خواهیم یافت:

$$\Psi_d = -(L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{2}{3} L_{aa2}) i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd}$$

$$\Psi_q = -(L_{aa0} + L_{ab0} - \frac{2}{3} L_{aa2}) i_q + L_{akq} i_{kq}$$

$$\Psi_0 = -(L_{aa0} - 2L_{ab0}) i_0$$

با تعریف اندوکتانسهای جدید زیر:

$$L_d = L_{aa_0} + L_{ab_0} + \frac{3}{\gamma} L_{aa_2} \quad (61-3)$$

$$L_q = L_{aa_0} + L_{ab_0} - \frac{3}{\gamma} L_{aa_2} \quad (62-3)$$

$$L_s = L_{aa_0} - 2L_{ab_0} \quad (63-3)$$

معادلات شار دور به صورت زیر در می آیند:

$$\Psi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} \quad (64-3)$$

$$\Psi_q = -L_q i_q + L_{akq} i_{kq} \quad (65-3)$$

$$\Psi_s = -L_s i_s \quad (66-3)$$

مشاهده می شود که مؤلفه های  $dq_0$  شار دورهای استاتور، از طریق اندوکتانسهای ثابت با مؤلفه های مربوط به جریانهای استاتور و روتور رابطه دارند.

شار دورهای روتور به صورت مؤلفه های  $dq_0$

با جایگزینی عبارات  $i_d$  و  $i_q$  در معادلات ۳-۵۳ تا ۳-۵۵ داریم:

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{fk d} i_{kd} - \frac{3}{\gamma} L_{afd} i_d \quad (67-3)$$

$$\Psi_{kd} = L_{fk d} i_{fd} + L_{kk d} i_{kd} - \frac{3}{\gamma} L_{ak d} i_d \quad (68-3)$$

$$\Psi_{kq} = L_{kk q} i_{kq} - \frac{3}{\gamma} L_{ak q} i_q \quad (69-3)$$

همچنان که مشاهده می شود، در اینجا هم اندوکتانسها ثابت و مستقل از موقعیت روتور هستند. با وجود این، باید توجه کرد که تأثیر اشباع در اینجا در نظر گرفته نشده است. تغییر اندوکتانسها به علت اشباع، طبیعت دیگری دارد و جداگانه مورد بررسی واقع خواهد شد. توجه کنید که  $i_s$  در معادلات مربوط به شار دورهای روتور ظاهر نمی شود. این موضوع، بدان دلیل است که مؤلفه

صفر جریانهای آرمیچر، نیروی محرکه مغناطیسی خاصی را در فاصله هوایی ایجاد نمی‌کند. در حالی که تبدیل  $dq_0$  منجر به اندوکتانسهای ثابت در معادلات ۳-۶۴ تا ۳-۶۹ شده، اندوکتانسهای متقابل بین مقادیر استاتور و روتور متقابلاً اینگونه نیست. به عنوان مثال، اندوکتانس متقابل مربوط به شاری که به علت جریان  $i_d$  در سیم پیچ محور طولی، از سیم پیچ تحریک می‌گذرد، از معادله ۳-۶۷ مساوی  $L_{afd} (3/2)$  است حال آنکه با استفاده از معادله ۳-۶۴، اندوکتانس متقابل مربوط به شاری که از سیم پیچ محور طولی استاتور به علت جریان تحریک عبور می‌کند، مساوی  $L_{afd}$  است. در بخش ۳-۴ خواهیم دید که با استفاده از یک سیستم مبنای واحد<sup>۱</sup> مناسب برای مقادیر روتور، می‌توان بر مسئله فوق، فائق شد.

#### معادلات ولتاژ استاتور به صورت مؤلفه‌های $dq_0$

معادلات ۳-۲۶ تا ۳-۲۸، معادلات اصلی ولتاژهای فاز بر حسب شار دورها و جریانهای فازهاست. با اعمال تبدیل معادله ۳-۵۹، روابط ذیل بر حسب مؤلفه‌های تبدیل یافته ولتاژ، شار دور و جریان، نتیجه می‌شود:

$$e_d = p\psi_d - \psi_q p\theta - R_a i_d \quad (70-3)$$

$$e_q = p\psi_q + \psi_d p\theta - R_a i_q \quad (71-3)$$

$$e_r = p\psi_r - R_a i_r \quad (72-3)$$

زاویه  $\theta$ ، مطابق شکل ۳-۹، زاویه بین محور فاز  $a$  و محور طولی  $d$  است. عبارت  $p\theta$  در معادلات فوق بیانگر سرعت زاویه‌ای  $\omega_r$  روتور است. در یک سیستم با فرکانس ۶۰ هرتز، در حالت ماندگار داریم:

$$p\theta = \omega_r = \omega_s = 2\pi \times 60 = 377 \text{ rad/s}$$

معادلات فوق ترکیبی مشابه معادلات یک سیم پیچ استاتیکی را دارند جز اینکه عبارتهای  $\psi_d p\theta$  و  $\psi_q p\theta$  به آنها اضافه شده است. این عبارتها به علت تبدیل از یک چارچوب ایستا به

یک چارچوب چرخان ایجاد شده است و نمایشگر این حقیقت است که موج شاری که هماهنگ با روتور می چرخد، ولتاژهایی را در سیم پیچهای ساکن آرمیچر القا خواهد کرد. عبارات  $\psi_q p\theta$  و  $\psi_d p\theta$  موسوم به ولتاژهای چرخشی (به علت تغییرات فضایی شار) و عبارات  $p\psi_q$  و  $p\psi_d$  موسوم به ولتاژهای ترانسفورمری (به علت تغییرات زمانی شار) هستند. ولتاژهای چرخشی، مؤلفه‌های غالب ولتاژ استاتور هستند. در حقیقت در حالت ماندگار، ولتاژهای ترانسفورمری  $p\psi_q$  و  $p\psi_d$  مساوی صفر هستند. در بسیاری از حالت‌های گذرا هم می‌توان از ولتاژهای ترانسفورمری بدون ایجاد خطای زیادی چشمپوشی کرد. با وجود این، ممکن است در حالت‌هایی این ولتاژها نیز مهم باشند. این موضوع در بخشهای ۳-۷ و ۵-۱ بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

علامتهای مربوط به عبارتهای ولتاژهای چرخشی در معادلات ۳-۷۰ و ۳-۷۱ مربوط به قرارداد علامت برای رابطه ولتاژ و شار دور و جهت‌های محورهای  $d$  و  $q$  است. از آنجا که فرض کرده‌ایم محور عرضی،  $90^\circ$  از محور طولی پیش است، به وسیله شار محور  $d$ ، ولتاژ  $e_q$  در محور  $q$  القا می‌شود. به طور مشابه، به وسیله شاری در محوری پس فاز با زاویه  $90^\circ$  نسبت به محور  $d$  (یعنی جهت منفی محور  $q$ )، ولتاژ  $e_d$  القا می‌گردد. از این رو، ولتاژ القا شده در محور  $q$  به علت چرخش، برابر با  $\omega\psi_d$  و در محور  $d$ ، برابر با  $-\omega\psi_q$  است.

### توان و گشتاور الکتریکی

توان خروجی لحظه‌ای سه فاز استاتور برابر است با:

$$P_t = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

با بیان ولتاژها و جریانهای فاز بر حسب مؤلفه‌های  $dq$  داریم:

$$P_t = \frac{3}{\gamma} (e_d i_d + e_q i_q + 2e_0 i_0) \quad (۳-۷۳)$$

در حالت متعادل،  $e_0 = i_0 = 0$  است. در نتیجه:

$$P_t = \frac{3}{\gamma} (e_d i_d + e_q i_q)$$

گشتاور الکتریکی را می توان با توجه به نیروهایی که برهادیها وارد می شوند و مساوی حاصل ضرب جریان و شار هستند، به دست آورد. راه دیگر آن است که گشتاور را از طریق رابطه توانی که از فاصله هوایی منتقل می شود، محاسبه کرد. با استفاده از روابط ۳-۷۰ تا ۳-۷۲ که ولتاژها را بر حسب شار دورها و جریانها بیان می کند، با توجه به اینکه  $d\theta/dt$  همان سرعت روتور،  $\omega_r$ ، است و جابجایی های لازم، داریم:

$$P_e = \frac{3}{2} [(i_d p \Psi_d + i_q p \Psi_q + \gamma i_0 p \Psi_0) + (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \omega_r - (i_d^2 + i_q^2 + \gamma i_0^2) R_a] \quad (74-3)$$

که بیان می کند  $P_e$  مساوی با میزان تغییر انرژی مغناطیسی آرمیچر به علاوه توان انتقال یافته از طریق فاصله هوایی منهای تلفات مقاومتی آرمیچر است. از این رو، گشتاور فاصله هوایی،  $T_e$ ، را می توان با تقسیم توان انتقال یافته از آن (یعنی توان مربوط به ولتاژهای چرخشی) بر سرعت مکانیکی روتور، بر حسب رادیان بر ثانیه، بدست آورد:

$$T_e = \frac{3}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \frac{\omega_r}{\omega_{mech}} = \frac{3}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \frac{P_f}{2} \quad (75-3)$$

معادلات شار دور ۳-۶۴ تا ۳-۶۹ مربوط به مدارهای استاتور و روتور، به همراه معادلات ۳-۷۰ تا ۳-۷۲ مربوط به ولتاژهای استاتور، معادلات ولتاژ ۳-۵۰ تا ۳-۵۲ مربوط به روتور و سرانجام معادله گشتاور ۳-۷۵، عملکرد الکتریکی دینامیکی ماشین سنکرون را بر حسب مؤلفه های  $dq_0$  بیان می کنند. این معادلات را معمولاً به نام معادلات پارک<sup>۱</sup>، کسی که مفاهیم لازم برای تبدیل فوق را پایه گذاری کرد، می شناسند [۳]. تبدیل  $dq_0$  به صورت معادله ۳-۵۹ به تبدیل پارک موسوم است. این تبدیل بر اساس نظریه دو محوری که ابتدا به وسیله بلوندل<sup>۲</sup>

[۱] پایه گذاری شد و بعداً به وسیله دوهرتی و نیکل<sup>۱</sup> [۲] بسط یافت، استوار است.

### توجیه فیزیکی تبدیل dq۰

در بخش ۳-۱-۳ مشاهده کردیم که نیروی محرکه مغناطیسی حاصل از جریانهای سه فاز آرمیچر با سرعتی معادل با  $\omega_s$  رادیان بر ثانیه، پیرامون محیط استاتور می چرخد. این سرعت روتور نیز هست. از این رو در حالت متعادل، موج نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر نسبت به روتور، ایستا به نظر می رسد و یک توزیع فضایی سینوسی دارد. از آنجا که می توان یک تابع سینوسی را به صورت مجموع دو تابع سینوسی بیان نمود، نیروی محرکه مغناطیسی حاصل از سیم پیچهای استاتور را می توان به دو تابع نیروی محرکه مغناطیسی سینوسی ایستا نسبت به روتور، تجزیه کرد که یکی دارای اوجی منطبق بر محور طولی d و دیگری اوجی منطبق بر محور عرضی q است. از این رو،  $i_d$  را می توان به جریان لحظه ای گذرنده از یک سیم پیچ ساختگی آرمیچر تشبیه کرد که این سیم پیچ با همان سرعت روتور می چرخد و همیشه در وضعیتی قرار دارد که محور آن بر محور طولی روتور منطبق است. مقدار جریان این سیم پیچ به گونه ای است که منجر به همان نیروی محرکه مغناطیسی ای در جهت محور طولی می شود که جریانهای واقعی سیم پیچهای آرمیچر، در این راستا تولید می کردند. توجیه مشابهی در مورد  $i_q$  صادق است منتها این بار بر محور q عمل می نماید.

نیروی محرکه مغناطیسی حاصل از  $i_d$  و  $i_q$  نسبت به روتور ایستا هستند و بر مسیرهایی با مقاومت مغناطیسی ثابت، عمل می کنند. از این رو اندوکتانسهای مربوطه  $L_d$  و  $L_q$ ، ثابت است.

در وضعیت متعادل حالت ماندگار، می توان جریانهای فاز را به صورت زیر بیان نمود:

$$i_a = I_m \sin(\omega_s t + \phi) \quad (۷۶-۳)$$

$$i_b = I_m \sin\left(\omega_s t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (۷۷-۳)$$

$$i_c = I_m \sin \left( \omega_s t + \phi + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (78-3)$$

که  $\omega_s = 2\pi f$  فرکانس زاویه‌ای جریانهای استاتور است. با استفاده از تبدیل  $dq_0$  داریم:

$$i_d = I_m \sin (\omega_s t + \phi - \theta) \quad (79-3)$$

$$i_q = -I_m \cos (\omega_s t + \phi - \theta) \quad (80-3)$$

$$i_0 = 0 \quad (81-3)$$

به هنگام عملکرد در حالت سنکرون، سرعت روتور،  $\omega_r$ ، مساوی فرکانس زاویه‌ای،  $\omega_s$ ، جریانهای استاتور است. بنابراین:

$$\theta = \omega_r t = \omega_s t$$

پس:

$$i_d = I_m \sin \phi = \text{ثابت}$$

$$i_q = -I_m \cos \phi = \text{ثابت}$$

یعنی در وضعیت متعادل حالت ماندگار،  $i_d$  و  $i_q$  ثابت است. به عبارت دیگر، جریانهای متناوب فاز در چارچوب abc، به شکل جریانهایی ثابت در چارچوب  $dq_0$ ، به نظر می‌رسند. تبدیل  $dq_0$  را می‌توان به ابزاری برای ارجاع کمیت‌های استاتور به طرف روتور تشبیه کرد. این تبدیل، شبیه ارجاع کمیت‌های ثانویه ترانسفورمر به طرف اولیه آن (با استفاده از نسبت تبدیل) است. تبدیل عکس (معادله ۳-۶۰) را می‌توان به ارجاع کمیت‌های روتور به طرف استاتور، شبیه دانست.

به دلایل زیر، بررسی معادلات ماشین سنکرون برحسب متغیرهای  $dq_0$  به میزان چشمگیری نسبت به کمیت‌های فاز، آسانتر است.

- معادلات عملکرد دینامیکی دارای اندوکتانسهای ثابت هستند،
- در حالت متعادل، کمیت‌های مؤلفه صفر، ظاهر نمی‌شوند،
- در وضعیت متعادل حالت ماندگار، کمیت‌های استاتور دارای مقادیر ثابت هستند. برای حالت‌های دیگر کاری، این کمیت‌ها با زمان تغییر می‌کنند. مطالعات پایداری، تغییرات کنند

در محدوده فرکانسی تا حدود ۳-۲ هرتز را در برمی گیرد،

- پارامترهای مربوط به محورهای  $d$  و  $q$  را می توان مستقیماً با آزمایش و از طریق پایانه های ماشین به دست آورد.

در بخش ۳-۶ نشان خواهیم داد که در وضعیت متعادل حالت ماندگار، تبدیل  $dq$  معادل با استفاده از فازور برای نمایش کمیت های فازی متناوب استاتور است. در بسیاری حالات، محاسن استفاده از متغیرهای  $dq$ ، شبیه استفاده از فازور (به جای عمل بر روی کمیت های سینوسی متغیر با زمان) در بررسی حالت ماندگار مدارهای جریان متناوب است.

### ۳-۴ نمایش در مبنای واحد<sup>۱</sup>

در بررسی سیستم های قدرت معمول است که برای نرمالیزه کردن متغیرهای سیستم، از یک سیستم مبنای واحد استفاده شود. در مقایسه با استفاده از واحدهای فیزیکی (آمپر، ولت، اهم، وبر، هانری و غیره)، سیستم مبنای واحد انجام محاسبات را با حذف واحدها و بیان کمیت های سیستم به صورت نسبت های بدون واحد، تسهیل می بخشد. از این رو تعریف می کنیم:

$$\text{مقدار واقعی} = \frac{\text{مقدار واقعی}}{\text{مقدار پایه کمیت}} = \text{مقدار در مبنای واحد}$$

در صورتی که یک سیستم مبنای واحد مناسب اختیار شود، انجام محاسبات را حداقل، ارزیابی را آسان و درک مشخصه های سیستم را نیز ساده تر می کند. مقادیر پایه بعضی از کمیتها را می توان به طور مستقل و کاملاً اختیاری، برگزیده حال آنکه برای دیگر متغیرها، باید مقادیر پایه را با استفاده از روابط اساسی بین متغیرهای سیستم به دست آورد. معمولاً، مقادیر پایه را به نحوی انتخاب می کنند که در حالت نامی، متغیرهای عمده مساوی یک در مبنای واحد شوند.

در بررسی ماشین سنکرون، می توان سیستم مبنای واحد را به منظور حذف ثابت های دلخواه و ساده سازی معادلات ریاضی به کاربرد به نحوی که بتوان آنها را بر حسب مدارهای معادل بیان نمود. اساس انتخاب سیستم مبنای واحد برای استاتور روشن است حال آنکه برای روتور، موضوع را باید به دقت بررسی کرد. در آثار چاپ شده مربوط به ماشینهای سنکرون، نمونه های

متنوعی از سیستم مبنای واحد برای مقادیر پایه روتور پیشنهاد شده است [۱۸، ۱۹]. اما در اینجا فقط یک سیستم مطرح می‌شود زیرا نسبت به سایر سیستمها محاسن متعددی دارد و مورد استفاده وسیع واقع شده است. این سیستم به سیستم متقابل مبنای واحد بر پایه  $L_{ad}$ ، موسوم است.

در این بخش، به منظور تعریف مقادیر در مبنای واحد و نمایش ارتباط آنها با مقادیر بر حسب واحدهای طبیعی، از بالانویس - برای نشان دادن کمیت‌های مبنای واحد استفاده شده است. اما در استفاده‌های بعدی، به منظور سهولت در امر نمایش متغیرها، این بالانویس را حذف خواهیم کرد.

### ۳-۴-۱ سیستم مبنای واحد برای کمیت‌های استاتور

معمول است که از مقادیر اسمی ماشین به عنوان مقادیر پایه کمیت‌های استاتور استفاده نمایند. در معادلات ماشین که تا کنون به دست آمده‌اند، جریانها و ولتاژهای استاتور به صورت مقادیر لحظه‌ای و زمانی که به صورت کمیت‌های سینوسی بودند، بر حسب مقادیر اوج و توابع سینوسی از زمان و فرکانس، بیان شده‌اند. اکنون مقادیر پایه زیر را برای استاتور بر می‌گزینیم (که با زیر نویس S نشان داده شده است).

$$e_{s \text{ base}} = \text{مقدار اوج ولتاژ نامی خط به نقطه خنثی، ولت}$$

$$i_{s \text{ base}} = \text{مقدار اوج جریان نامی خط، آمپر}$$

$$f_{\text{base}} = \text{فرکانس نامی، هرتز}$$

مقادیر پایه کمیت‌های دیگر به طور خودکار وابسته به مقادیر فوق به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\omega_{\text{base}} = 2\pi f_{\text{base}} \quad \text{رادیان بر ثانیه، الکتریکی،}$$

$$\omega_{m \text{ base}} = \omega_{\text{base}} \left[ \frac{2}{p_f} \right] \quad \text{رادیان بر ثانیه، مکانیکی،}$$

$$Z_{s \text{ base}} = \frac{e_{s \text{ base}}}{i_{s \text{ base}}} \quad \text{اهم،}$$

$$L_{s \text{ base}} = \frac{Z_{s \text{ base}}}{\omega_{\text{base}}} \quad \text{هانری،}$$

$$\psi_{s \text{ base}} = L_{s \text{ base}} i_{s \text{ base}}$$

$$= \frac{e_{s \text{ base}}}{\omega_{\text{base}}} \quad \text{ویر - دور،}$$

$$\text{فاز } \psi \quad VA_{\text{base}} = \sqrt{3} E_{\text{RMS base}} I_{\text{RMS base}}$$

$$= \sqrt{3} \frac{e_{s \text{ base}} i_{s \text{ base}}}{\sqrt{2} \sqrt{2}}$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} e_{s \text{ base}} i_{s \text{ base}} \quad \text{ولت - آمپر،}$$

$$\text{فاز } \psi \quad VA_{\text{base}} = \frac{\text{فاز } \psi \quad VA_{\text{base}}}{\omega_{m \text{ base}}} = \text{بایه گشتاور}$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{P_f}{2} \right) \psi_{s \text{ base}} i_{s \text{ base}} \quad \text{نیوتن - متر،}$$

### ۳-۴-۲ معادلات در مبنای واحد ولتاژهای استاتور

از معادله ۳-۷۰ داریم:

$$e_d = p\psi_d - \psi_q \omega_r - R_a i_d$$

با تقسیم طرفین معادله بر  $e_{s \text{ base}}$  و توجه به این نکته که  $e_{s \text{ base}} = i_{s \text{ base}} Z_{s \text{ base}} = \omega_{\text{base}} \psi_{s \text{ base}}$  است، خواهیم داشت:

$$\frac{e_d}{e_{s \text{ base}}} = p \left[ \frac{1}{\omega_{s \text{ base}}} \frac{\psi_d}{\psi_{s \text{ base}}} \right] - \frac{\psi_q}{\psi_{s \text{ base}}} \frac{\omega_r}{\omega_{\text{base}}} - \frac{R_a}{Z_{s \text{ base}}} \frac{i_d}{i_{s \text{ base}}} \quad (۸۲-۳)$$

یا به صورت مقادیر مبنای واحد:

$$\bar{e}_d = \frac{1}{\omega_{\text{base}}} p \bar{\psi}_d - \bar{\psi}_q \bar{\omega}_r - \bar{R}_a \bar{i}_d \quad (۸۳-۳)$$

واحد زمان در معادله فوق، ثانیه است. زمان را نیز می‌توان برحسب مبنای واحد (یا رادیان) بیان نمود بدین صورت که مقدار پایه آن را مساوی زمانی گرفت که لازم است تا روتور در سرعت سنکرون، یک درجه الکتریکی حرکت کند، یعنی:

$$t_{\text{base}} = \frac{1}{\omega_{\text{base}}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{base}}} \quad (۸۴-۳)$$

در صورتی که زمان بر حسب رادیان بیان شود، معادله ۳-۸۳ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\bar{e}_d = \bar{p} \bar{\Psi}_d - \bar{\Psi}_q \bar{\omega}_r - \bar{R}_a \bar{i}_d \quad (۸۵-۳)$$

با مقایسه روابط ۳-۷۰ و ۳-۸۵ در می‌یابیم که شکل معادله اولیه حفظ شده است و فقط مقادیر بر حسب مبنای واحد بیان شده‌اند. به طور مشابه؛ صورت مبنای واحد معادلات ۳-۷۱ و ۳-۷۲ به صورت زیر است:

$$\bar{e}_q = \bar{p} \bar{\Psi}_q - \bar{\Psi}_d \bar{\omega}_r - \bar{R}_a \bar{i}_q \quad (۸۶-۳)$$

$$\bar{e}_s = \bar{p} \bar{\Psi}_s - \bar{R}_a \bar{i}_s \quad (۸۷-۳)$$

مشتق در مبنای واحد ( $\bar{p}$ ) در معادلات فوق به صورت زیر است:

$$\bar{p} = \frac{d}{d\bar{t}} = \frac{1}{\omega_{\text{base}}} \frac{d}{dt} = \frac{1}{\omega_{\text{base}}} p \quad (۸۸-۳)$$

### ۳-۴-۳ معادلات در مبنای واحد و لثاهای روتور

با تقسیم طرفین معادله ۳-۵۰ بر  $e_{fd \text{ base}} = \omega_{\text{base}} \Psi_{fd \text{ base}} = Z_{fd \text{ base}} i_{fd \text{ base}}$  ، معادله و لثاژ تحریک در مبنای واحد به صورت زیر در می‌آید:

$$\bar{e}_{fd} = \bar{p} \bar{\Psi}_{fd} + \bar{R}_{fd} \bar{i}_{fd} \quad (۸۹-۳)$$

به طور مشابه، صورت مبنای واحد معادلات ۳-۵۱ و ۳-۵۲ به صورت ذیل است:

$$\bullet = \bar{p} \bar{\Psi}_{kd} + \bar{R}_{kd} \bar{i}_{kd} \quad (۹۰-۳)$$

$$\bullet = \bar{p} \bar{\Psi}_{kq} + \bar{R}_{kq} \bar{i}_{kq} \quad (۹۱-۳)$$



معادلات فوق شکل معادلات ولتاژ مدارهای روتور را نشان می‌دهد. با وجود این هنوز مبنای انتخاب کمیت‌های پایه روتور را بیان نکرده‌ایم.

### ۳-۴-۴ معادلات شار دور استاتور

با استفاده از رابطه اساسی  $\Psi_{s \text{ base}} = L_{s \text{ base}} \dot{i}_{s \text{ base}}$ ، معادلات ۳-۶۴ تا ۳-۶۶ در مبنای واحد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\bar{\Psi}_d = -\bar{L}_d \bar{i}_d + \bar{L}_{afd} \bar{i}_{fd} + \bar{L}_{akd} \bar{i}_{kd} \quad (۹۲-۳)$$

$$\bar{\Psi}_q = -\bar{L}_q \bar{i}_q + \bar{L}_{akq} \bar{i}_{kq} \quad (۹۳-۳)$$

$$\bar{\Psi}_\omega = -\bar{L}_\omega \bar{i}_\omega \quad (۹۴-۳)$$

که طبق تعریف داریم:

$$\bar{L}_{afd} = \frac{L_{afd}}{L_{s \text{ base}}} \frac{i_{fd \text{ base}}}{i_{s \text{ base}}} \quad (۹۵-۳)$$

$$\bar{L}_{akd} = \frac{L_{akd}}{L_{s \text{ base}}} \frac{i_{kd \text{ base}}}{i_{s \text{ base}}} \quad (۹۶-۳)$$

$$\bar{L}_{akq} = \frac{L_{akq}}{L_{s \text{ base}}} \frac{i_{kq \text{ base}}}{i_{s \text{ base}}} \quad (۹۷-۳)$$

### ۳-۴-۵ معادلات شار دور روتور

به طور مشابه، در سیستم مبنای واحد، معادلات ۳-۶۷ تا ۳-۶۹ به صورت زیر در می‌آیند:

$$\bar{\Psi}_{fd} = \bar{L}_{ffd} \bar{i}_{fd} + \bar{L}_{fkd} \bar{i}_{kd} - \bar{L}_{fda} \bar{i}_d \quad (۹۸-۳)$$

$$\bar{\Psi}_{kd} = \bar{L}_{kdf} \bar{i}_{fd} + \bar{L}_{kkd} \bar{i}_{kd} - \bar{L}_{kda} \bar{i}_d \quad (۹۹-۳)$$

$$\bar{\Psi}_{kq} = \bar{L}_{kkq} \bar{i}_{kq} - \bar{L}_{kqa} \bar{i}_q \quad (۱۰۰-۳)$$

که بر طبق تعریف داریم:

$$\bar{L}_{fda} = \frac{3}{2} \frac{L_{afd}}{L_{fd \text{ base}}} \frac{i_s \text{ base}}{i_{fd \text{ base}}} \quad (101-3)$$

$$\bar{L}_{fkd} = \frac{L_{fkd}}{L_{fd \text{ base}}} \frac{i_{kd \text{ base}}}{i_{fd \text{ base}}} \quad (102-3)$$

$$\bar{L}_{kda} = \frac{3}{2} \frac{L_{akd}}{L_{kd \text{ base}}} \frac{i_s \text{ base}}{i_{kd \text{ base}}} \quad (103-3)$$

$$\bar{L}_{kdf} = \frac{L_{fkd}}{L_{kd \text{ base}}} \frac{i_{fd \text{ base}}}{i_{kd \text{ base}}} \quad (104-3)$$

$$\bar{L}_{kqa} = \frac{3}{2} \frac{L_{akq}}{L_{kq \text{ base}}} \frac{i_s \text{ base}}{i_{kq \text{ base}}} \quad (105-3)$$

با انتخاب مناسب سیستم مبنای واحد، ضریب  $\frac{3}{2}$  در معادلات شار روتور حذف شد. اما هنوز مقادیر پایه ولتاژ و جریان روتور را بیان نکرده‌ایم که اکنون این کار را انجام می‌دهیم.

### ۳-۴-۶ سیستم مبنای واحد برای روتور

مقادیر پایه مدارهای روتور را به نحوی انتخاب می‌کنیم که با ارضای شروط زیر، معادلات شار دور را ساده کند:

الف) اندوکتانسهای متقابل بین سیم پیچهای مختلف باید در مبنای واحد متقابلاً مساوی باشند، به عنوان مثال  $\bar{L}_{afd} = \bar{L}_{fda}$ . این کار اجازه می‌دهد که مدل ماشین سنکرون به صورت مدارهای معادل، قابل نمایش باشد،

ب) اندوکتانسهای متقابل بین مدارهای روتور و استاتور در هر محور باید در مبنای واحد متقابلاً مساوی باشند، به عنوان مثال  $\bar{L}_{afd} = \bar{L}_{akd}$ .

به منظور اینکه  $\bar{L}_{fkd} = \bar{L}_{kdf}$  باشد، با توجه به معادلات ۱۰۲-۳ و ۱۰۴-۳ لازم است که:

$$\frac{L_{fkd}}{L_{fd \text{ base}}} \frac{i_{kd \text{ base}}}{i_{fd \text{ base}}} = \frac{L_{fkd}}{L_{kd \text{ base}}} \frac{i_{fd \text{ base}}}{i_{kd \text{ base}}}$$

یا:

$$L_{kd\ base} \dot{i}_{kd\ base}^Y = L_{fd\ base} \dot{i}_{fd\ base}^Y \quad (106-3)$$

با ضرب طرفین در  $\omega_{base}$  داریم:

$$\omega_{base} L_{kd\ base} \dot{i}_{kd\ base}^Y = \omega_{base} L_{fd\ base} \dot{i}_{fd\ base}^Y$$

از آنجا که:  $\omega_{base} L_{base} \dot{i}_{base} = e_{base}$  است، بنابراین داریم:

$$e_{kd\ base} \dot{i}_{kd\ base} = e_{fd\ base} \dot{i}_{fd\ base} \quad (107-3)$$

بنابراین اگر قرار باشد اندوکتانسهای متقابل مدارهای روتور مساوی باشند باید ولت - آمپر پایه آنها نیز مساوی باشد.

از طرفی اگر قرار باشد اندوکتانسهای  $\bar{L}_{afd}$  و  $\bar{L}_{rda}$  مساوی باشند، با توجه به معادلات ۳-۹۵ و ۳-۱۰۱ داریم:

$$\frac{L_{afd}}{L_{s\ base}} \frac{\dot{i}_{fd\ base}}{\dot{i}_{s\ base}} = \frac{3}{2} \frac{L_{afd}}{L_{fd\ base}} \frac{\dot{i}_{s\ base}}{\dot{i}_{fd\ base}}$$

یا:

$$L_{fd\ base} \dot{i}_{fd\ base}^Y = \frac{3}{2} L_{s\ base} \dot{i}_{s\ base}^Y$$

با ضرب طرفین در  $\omega_{base}$  و توجه به این نکته که  $\omega L i = e$  است، داریم:

$$e_{fd\ base} \dot{i}_{fd\ base} = \frac{3}{2} e_{s\ base} \dot{i}_{s\ base} \quad (108-3)$$

ولت آمپر پایه سه فاز برای استاتور =

به طور مشابه، برای اینکه  $\bar{L}_{akd} = \bar{L}_{kda}$  و  $\bar{L}_{akq} = \bar{L}_{kqa}$  باشد، خواهیم داشت:

$$e_{kd\ base} \dot{i}_{kd\ base} = \frac{3}{2} e_{s\ base} \dot{i}_{s\ base} \quad (109-3)$$

و:

$$e_{kq\ base} \dot{i}_{kq\ base} = \frac{3}{2} e_{s\ base} \dot{i}_{s\ base} \quad (110-3)$$

معادلات به دست آمده بر این نکته دلالت دارند که به منظور ارضای شرط "الف" فوق، باید

ولت آمپر پایه تمام پیچهای روتور یکسان و مساوی با ولت آمپر پایه سه فاز استاتور باشد. تاکنون، تنها حاصل ضرب ولتاژ و جریان پایه را برای مدارهای روتور مشخص کردیم. اکنون باید ولتاژ پایه یا جریان پایه را برای این مدارها مشخص کنیم. اندوکتانسهای خودی  $\bar{L}_h$  و  $\bar{L}_q$  استاتور مربوط به کل شار دور به ترتیب به علت جریانهای  $i_h$  و  $i_q$  است که می توان آنها را به دو بخش تقسیم کرد: یکی اندوکتانس ناشی به علت شاری که از هیچ مدار روتور عبور نمی کند و دیگری اندوکتانس متقابل به علت شاری که مدارهای روتور را قطع می کند. مطابق با شکل ۳-۱۶ مشاهده می کنیم که شار ناشی استاتور از شار ناشی شکاف<sup>۱</sup>، شار ناشی انتهایی دورها<sup>۲</sup> و شار ناشی فاصله هوایی تشکیل شده است. اندوکتانس ناشی دو محور تقریباً با هم مساوی است. با نمایش اندوکتانس ناشی به صورت  $\bar{L}_1$  و اندوکتانسهای متقابل با  $\bar{L}_{ah}$  و  $\bar{L}_{aq}$  داریم:

$$\bar{L}_d = \bar{L}_1 + \bar{L}_{ad} \quad (۳-۱۱۱)$$

و:

$$\bar{L}_q = \bar{L}_1 + \bar{L}_{aq} \quad (۳-۱۱۲)$$

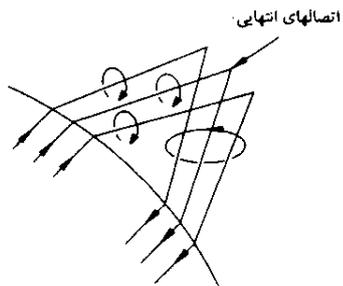
اگر بخواهیم اندوکتانسهای مبنای واحد متقابل بین مدارهای استاتور و روتور در محور طولی مساوی باشد، از معادلات ۳-۹۵ و ۳-۹۶ نتیجه می شود که:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{ad} &= \frac{L_{ad}}{L_{s \text{ base}}} = \bar{L}_{afd} = \frac{L_{afd}}{L_{s \text{ base}}} \frac{i_{fd \text{ base}}}{i_{s \text{ base}}} \\ &= \bar{L}_{akd} = \frac{L_{akd}}{L_{\text{base}}} \frac{i_{kd \text{ base}}}{i_{s \text{ base}}} \end{aligned}$$

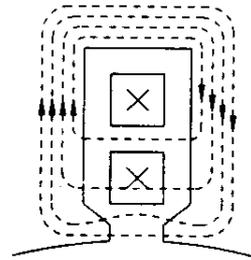
از این رو:

$$i_{fd \text{ base}} = \frac{L_{ad}}{L_{afd}} i_{s \text{ base}} \quad (۳-۱۱۳)$$

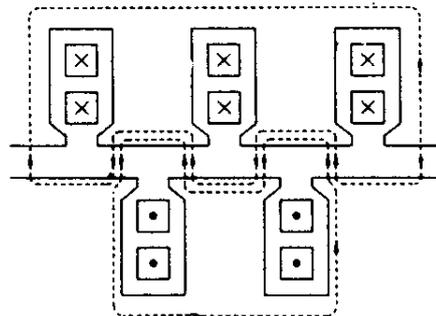
$$i_{kd \text{ base}} = \frac{L_{ad}}{L_{akd}} i_{s \text{ base}} \quad (۳-۱۱۴)$$



(ب) شار نشی پیرامون اتصال انتهایی



(الف) شار نشی درون شکاف



(ج) شارنشی که مسیری زیگزاگ را میان صفحه‌های دندانه‌ای استاتور و روتور در طول فاصله هوایی طی می‌کند.

شکل ۳-۱۶ الگوهای شار نشی استاتور

به طور مشابه، برای مساوی بودن  $\bar{L}_{aq}$  و  $\bar{L}_{akq}$ ، اندوکتانسهای متقابل محور  $q$ ، داریم:

$$i_{kq \text{ base}} = \frac{L_{aq}}{L_{akq}} i_{s \text{ base}} \quad (۱۱۵-۳)$$

به این ترتیب مقادیر پایه برای کمیت‌های روتور انتخاب شد. همچنان که قبلاً ذکر شد سیستم مبنای واحد مورد استفاده به سیستم متقابل مبنای واحد بر پایه  $I_{ad}$  موسوم است. در این سیستم، جریان پایه در هر مدار روتور، به صورت جریانی تعریف می‌شود که در هر فاز، ولتاژ مبنای واحدی مساوی  $\bar{I}_{ad}$  مبنای واحد القا نماید، یعنی ولتاژی مشابه با جریانهای متعادل سه فاز آرمیچری با اوج واحد.

### ۳-۴-۷ توان و گشتاور مبنای واحد

از معادله ۳-۷۳، توان لحظه‌ای در پایانه ماشین برابر است با:

$$P_t = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q + \gamma e \cdot i)$$

با تقسیم طرفین بر ولت آمپر سه فاز مساوی  $e_{s \text{ base}} i_{s \text{ base}}$  (۳/۲)، رابطه در مبنای واحد به صورت زیر در می‌آید:

$$\bar{P}_t = \bar{e}_d \bar{i}_d + \bar{e}_q \bar{i}_q + \gamma \bar{e} \cdot \bar{i} \quad (۳-۱۱۶)$$

با توجه به اینکه گشتاور پایه مساوی  $\Psi_{s \text{ base}} i_{s \text{ base}}$  (۳/۲) است، معادله ۳-۷۵ در مبنای واحد به صورت زیر خواهد شد:

$$\bar{T}_e = \bar{\Psi}_d \bar{i}_q - \bar{\Psi}_q \bar{i}_d \quad (۳-۱۱۷)$$

### ۳-۴-۸ سیستمهای جایگزین مبنای واحد و تبدیلات

سیستمهای مبنای واحد دیگری در فرهنگ مربوط به بررسی ماشینهای سنکرون مطرح گردیده است [۴ تا ۱۳ و ۱۶]. بعضی از نویسندگان بخصوص لويس [۲۰] تبدیل دیگری را از چارچوب abc به چارچوب dq۰ پیشنهاد کرده‌اند که مشابه معادله ۳-۵۹ است ولی به جای  $k_q = k_d = 2/3$ ، مقدار آنها  $\sqrt{2/3}$  اختیار می‌شود و ضرایب مؤلفه صفر،  $1/\sqrt{2}$  خواهد بود. در

این صورت، معادلات تبدیل جایگزین به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (118-3)$$

و عکس تبدیل به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (119-3)$$

چنین تبدیلی، متعامد است یعنی عکس ماتریس تبدیل مساوی ترانژاده آن است. همچنین در این تبدیل توان، نامتغیر است.

$$\begin{aligned} P_i &= e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \\ &= e_d i_d + e_q i_q + e_0 i_0 \end{aligned}$$

بعلاوه، در این تبدیل، تمام اندوکتانسهای متقابل به طور دو جانبه مساوی هستند. اما همچنان که در مرجع [۱۹] بحث شده، چنین تبدیلی عیوبی اساسی دارد که به نظر می رسد بر محاسن آن فائق است. تبدیل متعامد را نمی توان به هیچ وضعیت فیزیکی با مفهوم، مرتبط دانست. زمانی که  $k_d$  و  $k_q$  را مساوی  $\sqrt{2/3}$  انتخاب کنیم، سیم پیچهای معادل محور  $d$  و  $q$  دارای تعداد دوری مساوی  $\sqrt{3/2}$  تعداد دور سیم پیچهای  $abc$  خواهند بود. این موضوع باعث می شود که رابطه تک به تک بین متغیرهای  $abc$  و  $dq_0$  که در تبدیل اولیه (معادله ۳-۵۹) وجود دارد، از بین برود.

مرجع [۱۹]، بررسی دقیق و جامعی را در خصوص سیستمهای تبدیل و مبنای واحد جایگزین، مطرح کرده و نتیجه گرفته که تبدیل معادله ۳-۵۹ به همراه سیستم متقابل مبنای واحد بر پایه  $I_{hd}$  خصوصیات فیزیکی ماشین را به بهترین صورت منعکس می‌سازد. بعلاوه، اندوکتانسهای مدارهای معادل حاصل، منطبق با اندوکتانسهایی است که معمولاً توسط طراحان ماشین محاسبه می‌شود. با توجه به این محاسن، این سیستم در صنعت برق و به وسیله سازندگان ژنراتور به طور وسیعی استفاده می‌شود.

### ۳-۴-۹ خلاصه‌ای از معادلات در مبنای واحد

مقادیر پایه

کمیت‌های پایه استاتور:

ولت آمپر نامی ماشین،  $VA_{base} = VA$  فاز ۳

اوج ولتاژ نامی خط به نقطه خنثی،  $e_{s base} = V$

فرکانس نامی،  $f_{base} = Hz$

اوج جریان خط،  $i_{s base} = A$

$$= \frac{\text{فاز ۳ } VA_{base}}{(\sqrt{3}/2) e_{s base}}$$

$$Z_{s base} = \frac{e_{s base}}{i_{s base}}, \Omega$$

$$\omega_{base} = 2\pi f_{base}, \frac{\text{rad}}{s}, \text{الکتریکی}$$

$$\omega_{m base} = \omega_{base} \frac{\gamma}{p_f}, \frac{\text{rad}}{s}, \text{مکانیکی}$$

$$L_{s base} = \frac{Z_{s base}}{\omega_{base}}, H$$

و بر- دور-،  $\Psi_{s base} = L_{s base} i_{s base}$

کمیت‌های پایه روتور:

$$i_{fd \text{ base}} = \frac{L_{ad}}{L_{afd}} i_{s \text{ base}}, A$$

$$i_{kd \text{ base}} = \frac{L_{ad}}{L_{akd}} i_{s \text{ base}}, A$$

$$i_{kq \text{ base}} = \frac{L_{aq}}{L_{akq}} i_{s \text{ base}}, A$$

$$e_{fd \text{ base}} = \frac{\text{فاز } 3 \text{ VA}_{\text{base}}}{i_{fd \text{ base}}}, V$$

$$Z_{fd \text{ base}} = \frac{e_{fd \text{ base}}}{i_{fd \text{ base}}}, \Omega$$

$$= \frac{\text{فاز } 3 \text{ VA}_{\text{base}}}{i_{fd \text{ base}}^2}$$

$$Z_{kd \text{ base}} = \frac{\text{فاز } 3 \text{ VA}_{\text{base}}}{i_{kd \text{ base}}^2}, \Omega$$

$$Z_{kq \text{ base}} = \frac{\text{فاز } 3 \text{ VA}_{\text{base}}}{i_{kq \text{ base}}^2}, \Omega$$

$$L_{fd \text{ base}} = \frac{Z_{fd \text{ base}}}{\omega_{\text{base}}}, H$$

$$L_{kd \text{ base}} = \frac{Z_{kd \text{ base}}}{\omega_{\text{base}}}, H$$

$$L_{kq \text{ base}} = \frac{Z_{kq \text{ base}}}{\omega_{\text{base}}}, H$$

$$t_{\text{base}} = \frac{1}{\omega_{\text{base}}}, S$$

$$T_{\text{base}} = \frac{\text{فاز } 3 \text{ VA}_{\text{base}}}{\omega_{m \text{ base}}}, N. m$$

مجموعه کامل معادلات الکتریکی در مبنای واحد

با توجه به سیستم متقابل مبنای واحد بر پایه  $L_{ad}$ ، در مبنای واحد داریم:

$$L_{afd} = L_{fda} = L_{akd} = L_{kda} = L_{ad}$$

$$L_{akq} = L_{kqa} = L_{aq}$$

$$L_{fkd} = L_{kdf}$$

در معادلات ذیل به جای تنها یک سیم پیچ میراکننده محور  $q$  ( $kq$ ) از دو سیم پیچ با زیر نویس  $kq1$  و  $kq2$  استفاده شده است و فقط یک سیم پیچ میراکننده محور  $d$  با زیر نویس  $d1$  در نظر گرفته شده است. از آنجا که تمامی کمیتها در مبنای واحد هستند، بالا نویس - حذف شده است. معادلات ولتاژ استاتور در مبنای واحد:

$$e_d = p\Psi_d - \Psi_q \omega_r - R_a i_d \quad (120-3)$$

$$e_q = p\Psi_q + \Psi_d \omega_r - R_a i_q \quad (121-3)$$

$$e_s = p\Psi_s - R_a i_s \quad (122-3)$$

معادلات ولتاژ روتور در مبنای واحد:

$$e_{fd} = p\Psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \quad (123-3)$$

$$\bullet = p\Psi_{1d} + R_{1d} i_{1d} \quad (124-3)$$

$$\bullet = p\Psi_{1q} + R_{1q} i_{1q} \quad (125-3)$$

$$\bullet = p\Psi_{2q} + R_{2q} i_{2q} \quad (126-3)$$

معادلات شار دور استاتور در مبنای واحد:

$$\Psi_d = -(L_{ad} + L_l) i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \quad (127-3)$$

$$\Psi_q = -(L_{aq} + L_l) i_q + L_{aq} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} \quad (128-3)$$

$$\Psi_s = -L_s i_s \quad (129-3)$$

معادلات شار دور روتور در مبنای واحد:

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} \dot{i}_{fd} + L_{f1d} \dot{i}_{1d} - L_{ad} \dot{i}_d \quad (130-3)$$

$$\Psi_{1d} = L_{f1d} \dot{i}_{fd} + L_{11d} \dot{i}_{1d} - L_{ad} \dot{i}_d \quad (131-3)$$

$$\Psi_{1q} = L_{11q} \dot{i}_{1q} + L_{aq} \dot{i}_{2q} - L_{aq} \dot{i}_q \quad (132-3)$$

$$\Psi_{2q} = L_{aq} \dot{i}_{1q} + L_{22q} \dot{i}_{2q} - L_{aq} \dot{i}_q \quad (133-3)$$

گشتاور فاصله هوایی در مبنای واحد:

$$T_e = \Psi_d \dot{i}_q - \Psi_q \dot{i}_d \quad (134-3)$$

در نوشتن معادلات ۱۳۲-۳ و ۱۳۳-۳ فرض کرده‌ایم که اندوکتانسهای مبنای واحد متقابل  $L_{11q}$  و  $L_{aq}$  با هم مساوی هستند. این بدان مفهوم است که از همگی مدارهای استاتور و روتور در محور  $q$  شار متقابلی که با  $L_{aq}$  بیان می‌شود، عبور می‌کند. این موضوع قابل قبول است زیرا که مدارهای روتور تأثیر کل بدنه روتور را به نمایش می‌گذارند و سیم پیچهای واقعی با ولتاژها و جریانهای قابل اندازه‌گیری وجود ندارد.

در بررسی پایداری سیستمهای قدرت، معادلات ماشین را معمولاً به صورت مبنای واحد حل می‌کنند مگر زمان، که بر حسب ثانیه بیان می‌شود. در این صورت  $p$  مبنای واحد در معادلات ۱۲۰-۳ تا ۱۲۶-۳ با  $(1/\omega_{base})p$  جایگزین می‌شود.

مقادیر راکتانسها در مبنای واحد

اگر فرکانس کمیتهای استاتور مساوی با فرکانس پایه باشد، راکتانس در مبنای واحد یک سیم پیچ از لحاظ عددی مساوی اندوکتانس آن در مبنای واحد است. به عنوان مثال:

$$X_d = 2\pi f L_d \Omega$$

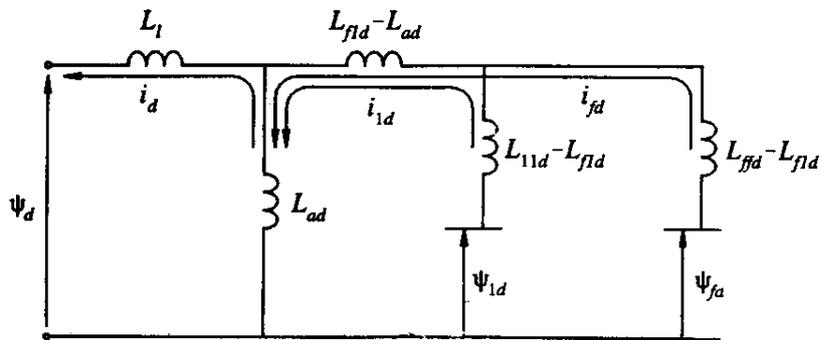
با تقسیم طرفین بر:  $Z_{s\ base} = 2\pi f_{base} L_{s\ base}$ ، داریم:

$$\frac{X_d}{Z_{s\ base}} = \frac{2\pi f}{2\pi f_{base}} \frac{L_d}{L_{s\ base}}$$

اگر  $f=f_{base}$  باشد مقادیر مبنای واحد  $X_d$  و  $L_d$  با هم مساویند. به همین علت در منابع مربوط به ماشینهای سنکرون، اغلب، نمادهای مربوط به راکتانسها برای نمایش اندوکتانسها در مبنای واحد نیز به کار می‌رود.

### ۳-۵ مدارهای معادل محورهای طولی و عرضی

در حالی که معادلات ۳-۱۲۰ تا ۳-۱۳۳ را می‌توان مستقیماً برای تعیین عملکرد ماشین سنکرون به کاربرد، اما معمول است که از مدارهای معادل برای شرح تصویری مدل ماشین استفاده کنند. قبل از اینکه مدار معادلی را به منظور نمایش کامل مشخصه‌های الکتریکی ماشین به دست آوریم، ابتدا شار دور تنها محور طولی را در نظر بگیرید. شکل ۳-۱۷ مدار معادلی را که نمایشگر معادلات شار دور محور طولی استاتور و روتور (معادلات ۳-۱۲۰، ۳-۱۳۰ و ۳-۱۳۱) است، نشان می‌دهد. در این شکل، جریانها به صورت جریانهای حلقه<sup>۱</sup> پدیدار شده‌اند:



شکل ۳-۱۷ مدار معادل محور d، نمایشگر رابطه  $\Psi-i$

مدار معادل مشابهی را می‌توان برای شار دور محور عرضی جریانهای مربوطه کرد. در اینجا مفید است که اندوکتانسهای نشتی مبنای واحد زیر را که مربوط به روتور استند،

1. Loop

تعریف کنیم:

$$L_{fd} = L_{ffd} - L_{fid} \quad (۱۳۵-۳)$$

$$L_{fd} = L_{fid} - L_{fid} \quad (۱۳۶-۳)$$

$$L_{fq} = L_{fiq} - L_{aq} \quad (۱۳۷-۳)$$

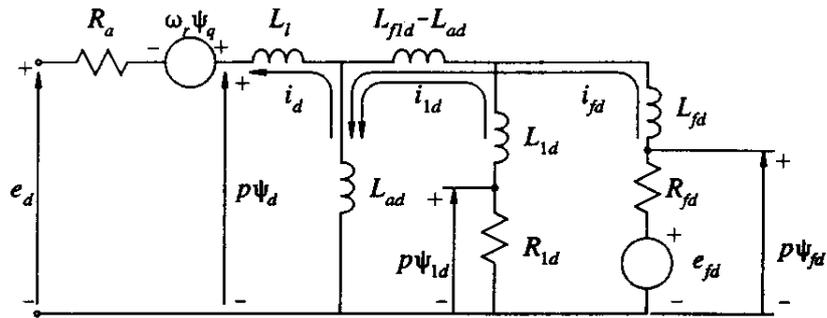
$$L_{fq} = L_{fiq} - L_{aq} \quad (۱۳۸-۳)$$

مدارهای معادل که مشخصه‌ها را به طور کامل بیان می‌نمایند و شامل معادلات ولتاژ هستند در شکل ۱۸-۳ به تصویر کشیده شده است. در این مدارها هم ولتاژها و هم شاردهورها، ظاهر شده‌اند. از این رو، شاردهورها برحسب مشتق زمانی نشان داده شده‌اند. در مدار معادل محور طولی، اندوکتانس سری  $L_{fd} - L_{ad}$  نمایشگر شاری است که از دو سیم پیچ تحریک و میراکننده (و نه آرمیچر) عبور می‌کند. با این فرض که شاری که از مدار میراکننده می‌گذرد به علت نزدیکی به فاصله هوایی تقریباً مساوی شاری است که از آرمیچر می‌گذرد، معمول است که از این اندوکتانس سری صرف نظر شود. این موضوع در عمل، زمانی واقعیت دارد که مدارهای میراکننده، کمانه بلند<sup>۱</sup> باشند. اما در حالتی که مدارهای میراکننده، کمانه کوتاه<sup>۲</sup> هستند و مسیرها از طریق روتور صلب برقرار می‌شود، این فرض زیاد صحیح نیست [۱۹]. در سالهای اخیر، تأکید بیشتری بر حفظ این اندوکتانس سری در مطالعات صورت گرفته است بخصوص در مطالعات مشروحي که هویت مدار تحریک باید در نظر گرفته شود [۵ و ۲۱].

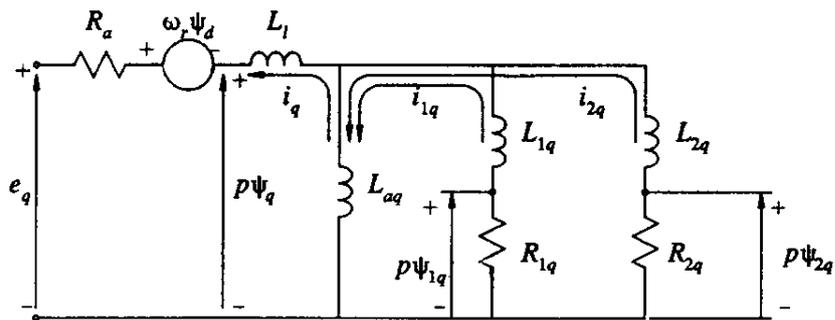
در حالت محور عرضی، سیم پیچ تحریکی وجود ندارد و سیم پیچهای ۱۹ و ۲۹، تأثیر سیم پیچهای میراکننده و مسیر جریانهای گردابی را نشان می‌دهند. از این رو، منطقی است که فرض شود (همچنان که در به دست آوردن مدار معادل شکل ۱۸-۳ و معادلات مربوطه فرض شد) از مدارهای آرمیچر و میراکننده فقط یک شار مستقابل قابل نمایش به وسیله  $L_{aq}$ ، عبور می‌کند.

1. Fully – Pitched

2. Short – Pitched



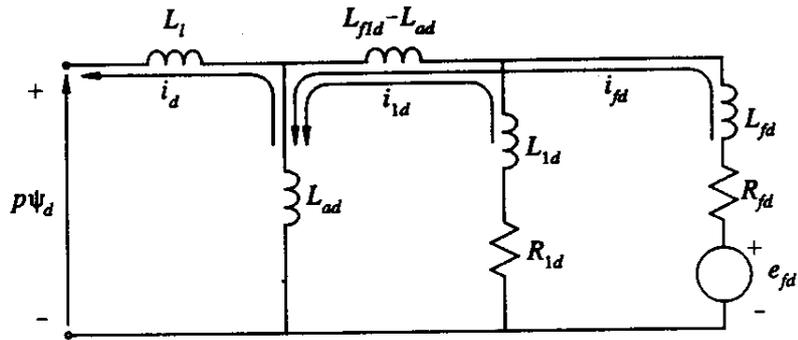
(الف) مدار معادل محور d



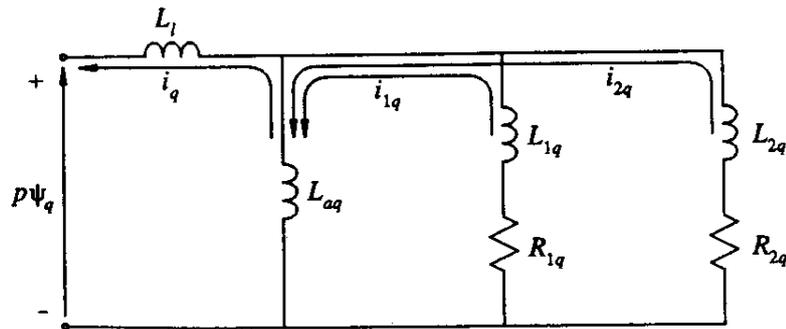
(ب) مدار معادل محور q

شکل ۳-۱۸ مدارهای معادل کامل محور d و q

امروزه مرسوم است که مطابق با مدارهای معادل شکل ۳-۱۹ از افت ولتاژ مقاومتهای استاتور و جملات ولتاژهای چرخشی صرف نظر کنند. این مدارهای معادل برای تعیین  $\Psi_q$  و  $\Psi_d$  و مشتق زمانی آنها کفایت می‌کند. مدارهای معادل این شکل، نمایشگر معادلات شار دور و ولتاژ هستند. تا جایی که استاتور مورد توجه باشد، آنها تنها  $\Psi_q$  و  $\Psi_d$  را بر حسب  $i_q$  و  $i_d$  و متغیرهای روتور بیان می‌کنند.



(الف) مدار معادل محور d



(ب) مدار معادل محور q

شکل ۳-۱۹ مدارهای معادل ساده شده مرسوم

## مثال ۳-۱

یک ژنراتور سنکرون ، ۵۵۵ MVA ، ۲۴ KV ، ۰/۹ pf ، ۶۰ Hz ، سه فاز و دو قطب دارای اندوکتانسها و مقاومتهاى مربوط به سیم پیچهای استاتور و تحریک به صورت زیر است:

$$l_{aa} = ۳/۲۷۵۸ + ۰/۰۴۵۸ \cos(۲\theta) \text{ mH}$$

$$l_{ab} = -۱/۶۳۷۹ - ۰/۰۴۵۸ \cos(۲\theta + \pi/۳) \text{ mH}$$

$$l_{afd} = ۴۰/۰ \cos \theta \text{ mH}$$

$$L_{ffd} = 576/92 \text{ mH}$$

$$R_a = 0.031 \Omega$$

$$R_{fd} = 0.0715 \Omega$$

الف)  $L_d$  و  $L_q$  را برحسب هانری تعیین کنید.

ب) اگر اندوکتانس نشی استاتور ( $L_1$ ) مساوی  $0.4129 \text{ mH}$  باشد،  $L_{ad}$  و  $L_{aq}$  را برحسب هانری تعیین نمایید.

ج) با استفاده از مقادیر نامی ماشین به عنوان مقادیر پایه کمیت‌های استاتور، با استفاده از سیستم متقابل مبنای واحد بر پایه  $L_{ad}$ ، مقادیر پارامترهای زیر را در مبنای واحد محاسبه کنید:

$$L_1, L_{ad}, L_{aq}, L_d, L_q, L_{afd}, L_{ffd}, L_{fd}, R_a, R_{fd}$$

حل

الف) با استفاده از معادلات ۳-۶۱ و ۳-۶۲ داریم:

$$\begin{aligned} L_d &= L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2} L_{aa2} & L_q &= L_{aa0} + L_{ab0} - \frac{3}{2} L_{aa2} \\ &= 3/2758 + 1/6379 + \frac{3}{2} \times 0.458 & &= 3/2758 + 1/6379 - \frac{3}{2} \times 0.458 \\ &= 4/9825 \text{ mH} & &= 4/8451 \text{ mH} \end{aligned}$$

ب)

$$\begin{aligned} L_{ad} &= L_d - L_1 \\ &= 4/9825 - 0.4129 \\ &= 4/5696 \text{ mH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{aq} &= L_q - L_1 \\ &= 4/8451 - 0.4129 \\ &= 4/432 \text{ mH} \end{aligned}$$

ج) مقادیر پایه کمتهای استاتور و روتور به صورت زیر است:

$$S_{base} = 555 \text{ MVA} \quad \text{ولت آمپر پایه سه فاز}$$

$$E_{s \text{ base}} (\text{RMS}) = 24 / \sqrt{3} = 13.856 \text{ kV}$$

$$e_{s \text{ base}} (\text{اوج}) = \sqrt{2} \times 13.856 = 19.596 \text{ kV}$$

$$I_{s \text{ base}} (\text{RMS}) = \frac{555 \times 10^6}{3 \times 13.856 \times 10^3} = 13351/2 \text{ A}$$

$$i_{s \text{ base}} (\text{اوج}) = \sqrt{2} \times 13351/2 = 18811/5 \text{ A}$$

$$Z_{s \text{ base}} = \frac{13.856 \times 10^3}{13351/2} = 1/0.3784 \Omega$$

$$\omega_{base} = 2\pi \times 60 = 377 \quad \text{رادیان بر ثانیه، الکتریکی}$$

$$L_{s \text{ base}} = \frac{1/0.3784}{377} \times 10^3 = 2/753 \text{ mH}$$

$$i_{fd \text{ base}} = \frac{L_{ad}}{L_{afd}} i_{s \text{ base}}$$

$$= \frac{4/5696}{4/0} \times 18811/5$$

$$= 2158/0 \text{ A}$$

$$e_{fd \text{ base}} = \frac{555 \times 10^6}{2158} = 257/183 \text{ kV}$$

$$Z_{fd \text{ base}} = \frac{257/183}{2158/0} = 119/18 \Omega$$

$$L_{fd \text{ base}} = \frac{119/18}{377} \times 10^3 = 316/12 \text{ mH}$$

و مقادیر در مبنای واحد به صورت زیر خواهد بود:

$$L_1 = \frac{0.4129}{2/753} = 0.15 \text{ pu}$$

$$L_{ad} = \frac{4/5696}{2/753} = 1/66 \text{ pu}$$

$$L_{aq} = \frac{4/432}{2/753} = 1/61 \text{ pu}$$

$$L_d = L_{ad} + L_1 = 1/66 + 0.15 = 1/81 \text{ pu}$$

$$L_q = L_{aq} + L_1 = 1/61 + 0.15 = 1/76 \text{ pu}$$

$$L_{afd} = \frac{L_{afd}}{L_s \text{ base}} \frac{i_{fd} \text{ base}}{i_s \text{ base}}$$

$$= \frac{4.0}{2/753} \times \frac{2158}{18881/5} = 1/66 \text{ pu}$$

$$L_{ffd} = \frac{576/92}{316/12} = 1/825 \text{ pu}$$

$$L_{fd} = L_{ffd} - L_{ad}$$

$$= 1/825 - 1/66 = 0.165 \text{ pu}$$

$$R_s = \frac{0.0031}{1/0.3784} = 0.003 \text{ pu}$$

$$R_{fd} = \frac{0.0715}{119/18} = 0.006 \text{ pu}$$

### ۳-۶ تحلیل حالت ماندگار

عملکرد ماشینهای سنکرون در حالت ماندگار را می‌توان به سهولت با اعمال معادلات در مبنای

## ۳-۶-۱ روابط ولتاژ، جریان و شار دور

همچنان که در بخش ۳-۳ مطرح شد، اعمال تبدیل  $dq^0$  به جریانهای متعادل فاز آرمیچر، در حالت ماندگار منجر به جریانهای ماندگار مستقیم می‌شود. این موضوع همچنین در مورد ولتاژها و شارهای استاتور نیز صادق است. از آنجا که کمیت‌های روتور نیز در حالت ماندگار، ثابت هستند، تمام جملات مشتق از معادلات ماشین حذف می‌شوند. بعلاوه عناصر مؤلفهٔ صفر وجود ندارند و  $\omega_r = \omega_s = 1 \text{ pu}$  است.

با مساوی صفر قرار دادن جملهٔ  $p\psi$  در معادلات ۳-۱۲۴ تا ۳-۱۲۶ داریم:

$$R_{1d} i_{1d} = R_{1q} i_{1q} = R_{r1} i_{r1} = 0$$

بنابراین، تمام جریانهای سیم پیچهای میراکننده، صفر هستند. این موضوع قابل پیش بینی بود زیرا در حالت ماندگار، میدان مغناطیسی چرخان حاصل از جریانهای استاتور نسبت به روتور ایستاست. از آنجا که سیم پیچهای میراکننده‌ها، مدار بسته و بدون ولتاژ اعمال شده هستند، فقط زمانی جریان در آنها القا می‌شود که میدان مغناطیسی حاصل از سیم پیچهای استاتور یا سیم پیچ تحریک، تغییر نماید.

معادلات مبنای واحد ماشین (۳-۱۲۰ تا ۳-۱۲۴) در حالت ماندگار به صورت زیر

درمی‌آیند:

$$e_d = -\omega_r \psi_q - R_s i_d \quad (۳-۱۳۹)$$

$$e_q = \omega_r \psi_d - R_s i_q \quad (۳-۱۴۰)$$

$$e_{fd} = R_{fd} i_{fd} \quad (۳-۱۴۱)$$

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} \quad (۳-۱۴۲)$$

$$\psi_q = -L_q i_q \quad (۳-۱۴۳)$$

$$\psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} - L_{ad} i_d \quad (۳-۱۴۴)$$

$$\psi_{1d} = L_{r1d} i_{r1d} - L_{ad} i_d \quad (۳-۱۴۵)$$

$$\Psi_{fd} = L_{f1d} i_{fd} - L_{ad} i_d \quad (146-3)$$

جریان تحریک

از معادله ۱۴۲-۳ داریم:

$$i_{fd} = \frac{\Psi_d + L_{ad} i_d}{L_{ad}}$$

اگر به جای  $\Psi_d$  از معادله ۱۴۰-۳ بر حسب  $e_q$  و  $i_q$  قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$i_{fd} = \frac{e_q + R_a i_q + \omega_r L_d i_d}{\omega_r L_{ad}}$$

با جایگزینی حاصل ضرب سرعت سنکرون و اندوکتانس  $L$  با راکتانس  $X$ ، داریم:

$$i_{fd} = \frac{e_q + R_a i_q + X_d i_d}{X_{ad}} \quad (147-3)$$

معادله فوق برای محاسبه جریان تحریک حالت ماندگار در هر نقطه کار مشخص، مناسب است. اندوکتانسها (راکتانسها)ی مطرح شده در معادلات ۱۳۹-۳ تا ۱۴۷-۳، مقادیر اشباع شده هستند. در باره این موضوع در بخش ۸-۳ بحث خواهد شد.

### ۳-۶-۲ نمودار فازوری

در حالت متعادل و ماندگار، ولتاژهای فاز استاتور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$e_a = E_m \cos(\omega_s t + \alpha) \quad (148-3)$$

$$e_d = E_m \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} + \alpha\right) \quad (149-3)$$

$$e_c = E_m \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} + \alpha\right) \quad (150-3)$$

که  $\omega_s$  فرکانس زاویه‌ای و  $\alpha$  زاویه فاز  $e_a$  نسبت به مبدأ زمان است. اعمال تبدیل  $dq$ ، نتیجه زیر را می‌دهد:

$$e_d = E_m \cos(\omega_s t + \alpha - \theta) \quad (151-3)$$

$$e_q = E_m \sin(\omega_s t + \alpha - \theta) \quad (152-3)$$

زاویه  $\theta$  که نشان دهنده مقدار پیش فاز محور طولی نسبت به محور فاز  $a$  است از رابطه زیر معلوم می شود:

$$\theta = \omega_r t + \theta_0 \quad (153-3)$$

که  $\theta_0$  مقدار  $\theta$  در  $t=0$  است.

با توجه به اینکه در حالت ماندگار  $\omega_r = \omega_s$  است، با جایگزینی  $\theta$  در معادلات ۱۵۱-۳ و ۱۵۲-۳ داریم:

$$e_d = E_m \cos(\alpha - \theta) \quad (154-3)$$

$$e_q = E_m \sin(\alpha - \theta) \quad (155-3)$$

در معادلات فوق،  $E_m$  مقدار اوج ولتاژ فاز است. در تحلیل حالت ماندگار به مقادیر مؤثر<sup>۱</sup> و اختلاف فاز (و نه به مقادیر لحظه‌ای یا اوج) نیاز داریم. با نمایش مقدار مؤثر مبنای واحد ولتاژ پایانه آرمیچر و توجه به این نکته که در مبنای واحد مقادیر مؤثر و اوج، با هم مساوی هستند، خواهیم داشت:

$$e_d = E_l \cos(\alpha - \theta) \quad (156-3)$$

$$e_q = E_l \sin(\alpha - \theta) \quad (157-3)$$

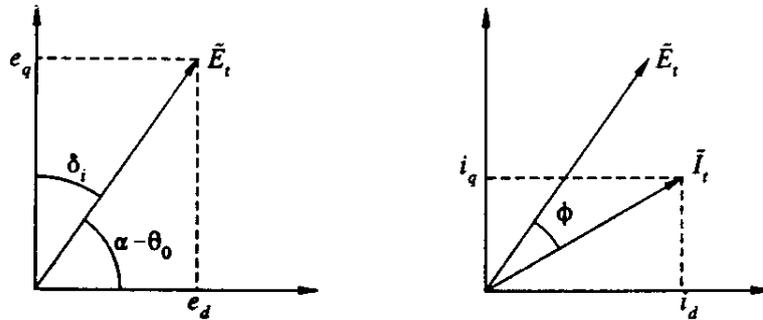
مشاهده می شود که مؤلفه‌های  $dq$  ولتاژ آرمیچر، کمیت‌های عددی هستند. اما با توجه به روابط مثلثاتی بین آنها، می توان آنها را به صورت فازوری در صفحه‌ای که دو محور آن  $d$  و  $q$  است، نمایش داد. این موضوع در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده و از لحاظ مفهومی مشابه نمایش فازوری کمیت‌های متناوب است که نسبت به زمان به صورت سینوسی تغییر می کند. از این رو، می توان ولتاژ پایانه آرمیچر را به صورت مختلط زیر بیان نمود:

$$\tilde{E}_l = e_d + je_q \quad (158-3)$$

با نمایش  $\delta_1$  به عنوان مقدار پیش‌فاز زاویه‌ای محور  $q$  نسبت به  $\vec{E}_t$ ، معادلات ۳-۱۵۶ و ۳-۱۵۷ به صورت زیر در می‌آیند:

$$e_d = E_t \sin \delta_1 \quad (3-159)$$

$$e_q = E_t \cos \delta_1 \quad (3-160)$$



شکل ۳-۲۰ نمایش مؤلفه‌های  $dq$  ولتاژ و جریان به صورت فازوری

به طور مشابه می‌توان مؤلفه‌های  $dq$  جریان پایانه آرمیچر،  $I_t$ ، را به صورت فازوری بیان نمود. اگر زاویه ضریب توان باشد، داریم:

$$i_d = I_t \sin (\delta_1 + \phi) \quad (3-161)$$

$$i_q = I_t \cos (\delta_1 + \phi) \quad (3-162)$$

و:

$$\vec{I}_t = i_d + j i_q \quad (3-163)$$

از بررسی فوق مشخص است که در شکل فازوری و با محورهای dq به عنوان محورهای مختصات، جریان و ولتاژ مؤثر فاز آرمیچر را می‌توان به همان صورتی در نظر گرفت که در نمایش فازوری ولتاژ و جریانهای متناوب به کار می‌رود. این مطلب، ارتباط بین مقادیر حالت ماندگار مؤلفه‌های dq کمیت‌های آرمیچر و نمایش فازوری مرسوم در بررسی مدارهای جریان متناوب را فراهم می‌آورد.

ارتباط بین مؤلفه‌های dq ولتاژ و جریان پایانه آرمیچر، طبق معادلات ۳-۱۳۹، ۳-۱۴۰، ۳-۱۴۲ و ۳-۱۴۳ بیان شده است، از این‌رو:

$$\begin{aligned} e_d &= -\omega_r \Psi_q - R_a i_d \\ &= \omega_r L_q i_q - R_a i_d \quad (3-164) \\ &= X_q i_q - R_a i_d \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_q &= +\omega_r \Psi_d - R_a i_q \\ &= -X_d i_d + X_{ad} i_{fd} - R_a i_q \quad (3-165) \end{aligned}$$

راکتانسهای  $X_d$  و  $X_q$ ، به ترتیب راکتانسهای سنکرون محور طولی و عرضی خوانده می‌شوند که نمایشگر تأثیر القای موج نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر، با احتساب جداگانه جهت مؤلفه‌های محور d و محور q، هستند. این راکتانسها و راکتانسهای دیگر یک ماشین سنکرون به طور مشروح در بخش دیگری بحث خواهند شد.

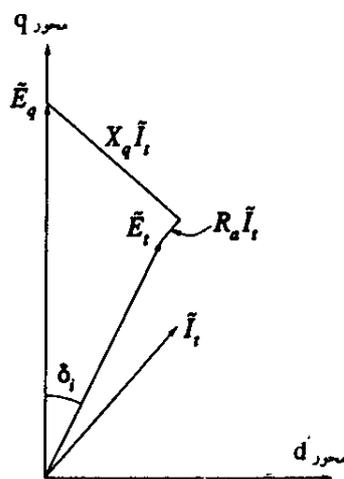
تاکنون روشی را در تعیین موقعیت محورهای d و q نسبت به  $\tilde{E}_t$  بیان ننموده‌ایم. به منظور کمک به بررسی موضوع، ولتاژی به نام  $\tilde{E}_q$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_q &= \tilde{E}_t + (R_a + jX_q) \tilde{I}_t \\ &= (e_d + je_q) + (R_a + jX_q)(i_d + ji_q) \quad (3-166) \end{aligned}$$

با جایگزینی از معادلات ۳-۱۶۴ و ۳-۱۶۵ و ساده کردن عبارت حاصل، رابطه فازوری زیر برای  $\tilde{E}_q$  (و با محورهای d و q به عنوان محورهای مختصات)، حاصل می‌شود:

$$\tilde{E}_q = j[X_{ad} i_{fd} - (X_d - X_q) i_d] \quad (3-167)$$

نمودار فازوری، در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فازور  $\tilde{E}_q$  در جهت محور  $q$  قرار می‌گیرد. از این رو می‌توان موقعیت محور  $q$  را نسبت به  $\tilde{E}_i$  با محاسبه  $\tilde{E}_q$ ، که ولتاژ قبل از  $R_a + jX_q$  است، تعیین نمود.



۳-۲۱ فازور  $\tilde{E}_q$  در صفحه مختلط dq

### ۳-۶-۳ زاویه روتور

در حالت مدار باز و بدون بار،  $i_d = i_q = 0$  است. با جایگزینی این مقدار در معادلات ۳-۱۳۹، ۳-۱۴۰، ۳-۱۴۲ و ۳-۱۴۳، روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$\psi_d = L_{ad} i_{fd}$$

$$\psi_q = 0$$

$$e_d = 0$$

$$e_q = X_{ad} i_{fd}$$

بنابراین:

$$\begin{aligned}\tilde{E}_t &= e_d + j e_q \\ &= j X_{ad} i_{fd}\end{aligned}\quad (۱۶۸-۳)$$

در حالت بی‌باری،  $\tilde{E}_t$  فقط مؤلفه محور  $q$  را دارد و بنابراین  $\delta_i = 0$  است. زمانی که ماشین بارگذاری می‌شود،  $\delta_i$  افزایش می‌یابد. بنابراین زاویه  $\delta_i$  به زاویه داخلی روتور<sup>۱</sup> یا زاویه بار<sup>۲</sup> موسوم است. رابطه بین توان خروجی و زاویه روتور، غیر خطی است و در مطالعات پایداری سیستمهای قدرت، نقش اساسی دارد. زاویه  $\delta_i$  زاویه‌ای است که محور  $q$  نسبت به ولتاژ فازوری پایانه استاتور ( $\tilde{E}_t$ )، پیش‌فاز است و از رابطه زیر معلوم می‌شود:

$$\delta_i = 90^\circ - (\alpha - \theta_e) \quad (۱۶۹-۳)$$

که  $\alpha$ ، زاویه فاز  $e_d$  و  $\theta_e$ ، مقدار زاویه  $\theta$  نسبت به مبدأ زمان است. از این رو،  $\delta_i$  به زاویه بین میدانهای مغناطیسی استاتور و روتور بستگی دارد. در هر توان خروجی ماشین، می‌توان یکی از دو زاویه  $\alpha$  یا  $\theta_e$  (و نه هر دو) را به صورت اختیاری برگزید.

### ۳-۶-۴ مدار معادل حالت ماندگار

اگر از برجستگی قطبها صرف‌نظر شود، داریم:

$$X_d = X_q = X_s$$

که  $X_s$ ، راکتانس سنکرون ماشین است. بنابراین:

$$\tilde{E}_q = \tilde{E}_t + (R_a + j X_s) \tilde{I}_t \quad (۱۷۰-۳)$$

با استفاده از تساوی  $X_d$  و  $X_q$ ، معادله ۳-۱۶۷ به صورت زیر در می‌آید:

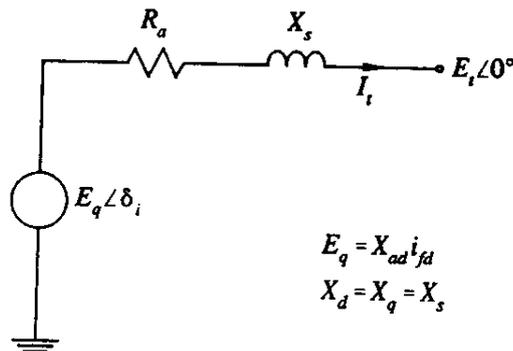
$$E_q = X_{ad} i_{fd} \quad (۱۷۱-۳)$$

مدار معادل حاصل در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است مقدار مقاومت  $R_a$  معمولاً بسیار کم

1. Internal Rotor Angle

2. Load Angle

است و می توان از آن صرف نظر کرد.



شکل ۳-۲۲ مدار معادل حالت ماندگار با چشمپوشی از برجستگی قطب

ولتاژ  $E_q$  را می توان به عنوان ولتاژ مؤثر داخلی<sup>۱</sup> فرض کرد که مقدار آن مساوی با  $X_{ad} i_{fd}$  است و بنابراین نمایشگر ولتاژ سیستم تحریک ناشی از جریان تحریک است. راکتانس سنکرون  $X_s$ ، تأثیر شار حاصل از جریانهای استاتور، یعنی تأثیر عکس العمل آرمیچر را نشان می دهد. در ماشینهای سنکرون روتور استوانه ای،  $X_d$ ، تقریباً مساوی  $X_q$  است و از این رو نمودار فوق، به طرز مناسبی عکس العمل ماشین را در حالت ماندگار نشان می دهد.

در ماشینهای سنکرون قطب برجسته،  $X_d$  مساوی  $X_q$  نیست. اما مادامی که رابطه بین ولتاژ پایانه، جریان آرمیچر، توان و تحریک در محدوده معمول کاری ماشین مطرح است، تأثیر برجستگی قطب چندان قابل توجه نیست و مدار معادل تقریبی مزبور دید مناسبی از عکس العمل حالت ماندگار ماشین را نشان می دهد. فقط در ولتاژهای پایین سیستم تحریک، تأثیر برجستگی قطب مشهود است. در تقریب، همچنین از گشتاور مقاومت مغناطیسی حاصل از برجستگی قطب، صرف نظر می شود. البته با توجه به امکانات محاسباتی مدرن امروزی، مشکل خاصی برای در نظر گرفتن تأثیر برجستگی قطب وجود ندارد. از این رو، تقریب مربوط

1. Effective Internal Voltage

به نظریه ماشینهای سنکرون روتور استوانه‌ای را در محاسبات پیچیده به کار نمی‌بندند.

توان حقیقی و راکتیو

$$\begin{aligned} S &= \vec{E}_t \vec{I}_t^* \\ &= (e_d + je_q)(i_d - ji_q) \end{aligned} \quad (172-3)$$

$$= (e_d i_d + e_q i_q) + j(e_q i_d - e_d i_q)$$

$$P_t = e_d i_d + e_q i_q \quad (173-3)$$

$$Q_t = e_q i_d - e_d i_q$$

گشتاور حالت ماندگار را می‌توان از رابطه زیر مشخص کرد:

$$\begin{aligned} T_e &= \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \\ &= (e_d i_d + e_q i_q) + R_a (i_d^2 + i_q^2) \\ &= P_t + R_a I_t^2 \end{aligned} \quad (174-3)$$

### ۳-۶-۵ روش محاسبه مقادیر حالت ماندگار

در مطالعات پایداری، لازم است که مقادیر اولیه حالت ماندگار متغیرهای ماشین را به صورت تابعی از کمیت‌های پایانه ماشین به دست آورد. فرض می‌شود که تمام کمیتها، در مبنای واحد بیان شده‌اند.

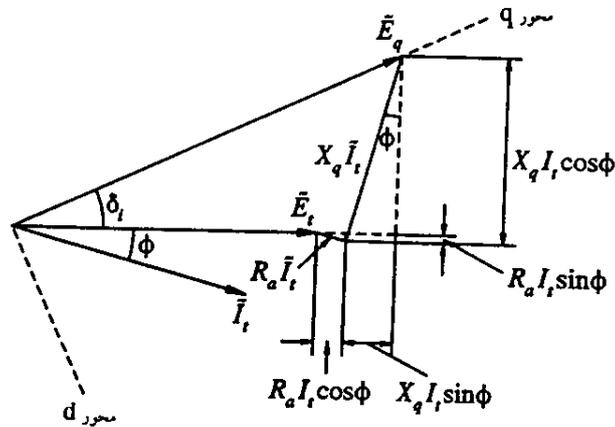
الف) معمولاً، توان حقیقی پایانه،  $P_t$ ، توان راکتیو پایانه،  $Q_t$  و دامنه ولتاژ  $E_t$ ، مشخص هستند. در این صورت جریان پایانه ( $I_t$ ) و زاویه ضریب توان ( $\phi$ ) را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$I_t = \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{E_t}$$

$$\phi = \cos^{-1} \left[ \frac{P_t}{E_t I_t} \right]$$

ب) گام بعدی، محاسبه زاویه داخلی روتور،  $\delta_i$ ، است. مطابق با شکل ۳-۲۳ و با توجه به اینکه  $\vec{E}_q$  در راستای محور  $q$  است، زاویه داخلی از رابطه زیر معلوم می‌شود:

$$\delta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{X_q I_t \cos \phi - R_a I_t \sin \phi}{E_t + R_a I_t \cos \phi + X_q I_t \sin \phi} \right]$$



شکل ۳-۲۳ نمودار فازوری حالت ماندگار

ج) با معلوم بودن  $\delta_i$ ، مؤلفه‌های محور طولی و عرضی ولتاژ و جریان استاتور، از روابط زیر معلوم می‌شوند:

$$e_d = E_t \sin \delta_i$$

$$e_q = E_t \cos \delta_i$$

$$i_d = I_t \sin(\delta_i + \phi)$$

$$i_q = I_t \cos(\delta_i + \phi)$$

د) سایر کمیت‌های ماشین را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\psi_d = e_q + R_a i_q$$

$$\psi_q = -e_d - R_a i_d$$

$$i_{fd} = \frac{e_q + R_a i_q + X_d i_d}{X_{ad}}$$

$$e_{fd} = R_{fd} i_{fd}$$

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

$$\psi_{1d} = L_{ad} (i_{fd} - i_d)$$

$$\psi_{1q} = \psi_{2q} = -L_{aq} i_q$$

$$T_e = P_r + R_a I_t^2$$

تاکنون تأثیر اشباع را مورد بحث قرار نداده‌ایم. اما باید دقت کرد که اشباع بر  $L_d$ ،  $L_{aq}$ ،  $L_{ad}$  و  $L_q$  راکتانسهای مربوطه تأثیر می‌گذارد و باید این تأثیر را در محاسبه کمیت‌های حالت ماندگار ماشین مورد توجه قرار داد. روش احتساب تأثیر اشباع در بخش ۳-۸ مورد بحث قرار خواهد گرفت.

### مثال ۲-۳

مقادیر زیر، پارامترهای یک ماشین سنکرون  $555 \text{ MVA}$ ،  $24 \text{ kV}$ ،  $0.9 \text{ pf}$ ،  $60 \text{ Hz}$ ،  $3600 \text{ RPM}$  را در مبنای واحد بر اساس مقادیر نامی ماشین، نشان می‌دهند<sup>۱</sup> ( $L_{ad}$  مساوی  $L_{ad}$  فرض می‌شود):

$$\begin{array}{llll} L_{ad} = 1/66 & L_{ad} = 1/61 & L_1 = 0/15 & R_a = 0/003 \\ L_{fd} = 0/165 & R_{fd} = 0/0006 & L_{1d} = 0/1713 & R_{1d} = 0/0284 \\ L_{1q} = 0/7252 & R_{1q} = 0/00619 & L_{2q} = 0/125 & R_{2q} = 0/02368 \end{array}$$

الف) زمانی که ژنراتور، توان ظاهری نامی خود را در ضریب توان  $0.9$  (پس‌فاز) و ولتاژ پایانه

۱. این ژنراتور، شبیه ژنراتور مثال ۱-۳ است با این تفاوت که تأثیر سیستم‌پیچهای میراکننده هم در نظر گرفته شده است. به منظور نمایش جنبه‌های گوناگون مشخصه ژنراتور و مطالعات پایداری، مشخصات این ماشین در سرتاسر کتاب مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

نامی، تحویل دهد، محاسبه کنید:

الف (۱) زاویه داخلی  $\delta_i$  بر حسب درجه؛

الف (۲) مقادیر در مبنای واحد

$$e_d, e_q, i_d, i_q, \dot{i}_d, \dot{i}_q, \dot{i}_{fd}, \dot{i}_{fq}, \psi_{fd}, \psi_{fq}, \psi_{fd}, \psi_{fq}, \psi_{fd}, \psi_{fq}, \psi_{fd}, \psi_{fq}$$

الف (۳) گشتاور فاصله هوایی،  $T_e$ ، را در مبنای واحد و بر حسب نیوتن متر؛

با فرض اینکه تأثیر اشباع مغناطیسی به گونه‌ای است که در وضعیت کاری فوق،  $L_{dq}$  و  $L_{qd}$  را

۸۳/۵٪ از مقادیر داده شده، کاهش دهد:

ب) با استفاده از مدار تقریبی معادل شکل ۳-۲۲ و با صرف نظر کردن از  $R_a$ ، زاویه داخلی  $\delta_i$  و جریان تحریک  $\dot{i}_{fd}$  را محاسبه کنید.

### حل

الف) در وضعیت کاری داده شده، مقادیر مبنای واحد کمیتهای پایانه ماشین به صورت زیر

است:

$$P=0.9 \text{ و } Q=0.436, \quad E_f=1.0, \quad I_f=1.0, \quad \phi=25.84^\circ$$

مقادیر اشباع شده اندوکتانسها برابر است با:

$$L_{ad} = 0.835 \times 1/66 = 1/386$$

$$L_{aq} = 0.835 \times 1/61 = 1/344$$

$$L_d = L_{ad} + L_l = 1/386 + 0.15 = 1/536$$

$$L_q = L_{ad} + L_l = 1/344 + 0.15 = 1/494$$

با استفاده از روش مذکور در بخش ۳-۶-۵ داریم:

الف (۱)

$$\delta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{1/494 \times 1.0 \times 0.9 - 0.003 \times 1.0 \times 0.436}{1.0 + 0.003 \times 1.0 \times 0.9 + 1/494 \times 1.0 \times 0.436} \right]$$

$$= \tan^{-1}(0.812) = 39.1 \text{ درجه الکتریکی}$$

$$e_d = E_t \sin \delta_i = 1 \cdot \sin 39/1 = 0.631 \text{ pu} \quad (\text{الف ۲})$$

$$e_q = E_t \cos \delta_i = 1 \cdot \cos 39/1 = 0.776 \text{ pu}$$

$$i_d = I_t \sin (\delta_i + \phi) = 1 \cdot \sin (39/1 + 25/84) = 0.906 \text{ pu}$$

$$i_q = I_t \cos (\delta_i + \phi) = 1 \cdot \cos (39/1 + 25/84) = 0.423 \text{ pu}$$

$$i_{fd} = \frac{e_q + R_a i_q - X_d i_d}{X_{ad}}$$

$$= \frac{0.776 + 0.003 \times 0.423 + 1/526 \times 0.906}{1/386}$$

$$= 1/565 \text{ pu}$$

$$e_{fd} = R_{fd} i_{fd} = 0.006 \times 1/565$$

$$= 0.000939 \text{ pu}$$

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

$$= (1/386 + 0/165) \times 1/565 - 1/386 \times 0.906$$

$$= 1/17 \text{ pu}$$

$$\psi_{fd} = L_{ad} (i_{fd} - i_d)$$

$$= 1/386 \times (1/565 - 0.906)$$

$$= 0.913 \text{ pu}$$

$$\psi_{1q} = \psi_{1q} = -L_{aq} i_q = -1/344 \times 0.423$$

$$= 0.569 \text{ pu}$$

در حالت ماندگار:

$$i_{1d} = i_{1q} = i_{1q} = 0$$

الف) گشتاور فاصله هوایی:

$$\begin{aligned} T_e &= P_t + I_t^2 R_a \\ &= 0.9 + 1/0.2 \times 0.003 \\ &= 0.903 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{base}} &= \frac{\text{MVA}_{\text{base}} \times 10^6}{\omega_{\text{m base}}} \\ &= \frac{555 \times 10^6}{1.77 \times 60} = 1/472 \times 10^6 \text{ N.m} \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} T_e &= 0.903 \times 1/472 \times 10^6 \\ &= 1/329 \times 10^6 \text{ N.m} \end{aligned}$$

ب) با استفاده از مقدار اشیاع شده  $X_{ad}$ ، داریم:

$$E_q = X_{ad} i_{fd} = 1/386 i_{fd}$$

و:

$$X_s = X_{ad} + X_l = 1/386 + 0.15 = 1/536$$

با استفاده از شکل ۳-۲۲ و  $\tilde{E}_t$  به عنوان فازور مبنا:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_q &= \tilde{E}_t + jX_s \tilde{I}_t \\ &= 1/0 + j1/536 (0.9 - j0.436) \\ &= 1/670 + j1/382 \\ &= 2/17 \angle 39/6^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\delta_i = 39/6^\circ$$

$$i_{fd} = \frac{E_q}{X_{ad}} = \frac{2/17}{1/386} = 1/566 \text{ pu}$$

مشاهده می‌شود که مقادیر محاسبه شده  $\delta_1$  و  $\dot{\delta}_1$  با استفاده از مدل تقریبی، بسیار نزدیک به محاسبات دقیق است. این موضوع قابل پیش‌بینی بود زیرا مقدار  $X_q$  به  $X_d$  نزدیک است و ماشین سنکرون در حالت نامی بهره‌برداری می‌شود.

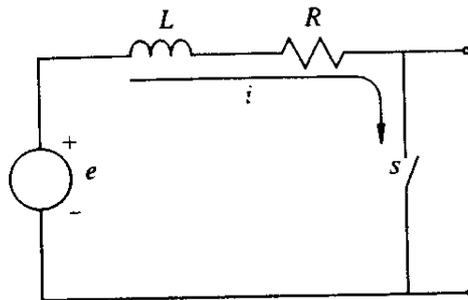
### ۳-۷ مشخصه‌های گذرای الکتریکی ماشین سنکرون

در این بخش، مشخصه‌های اساسی گذرای الکتریکی یک ماشین سنکرون را با مشاهده عکس‌العمل آن نسبت به اتصال کوتاه سه فاز در پایانه‌های ماشین، مورد بررسی قرار می‌دهیم. علاوه بر مشاهده عملکرد گذرای ماشین، این آزمایش و بررسی در تشخیص تقریبهایی که در مطالعات پایداری سیستمهای بزرگ لازم است، بسیار مفید است. در ابتدا یک مدار ساده RL را در نظر می‌گیریم زیرا بررسی آن به درک ماهیت عکس‌العمل گذرای ماشین، کمک می‌کند.

#### ۳-۷-۱ جریان اتصال کوتاه در یک مدار ساده RL

مدار ساده RL در شکل ۳-۲۴ را در نظر بگیرید که در آن:

$$e = E_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (3-175)$$



شکل ۳-۲۴ مدار RL

اگر کلید S را در لحظه  $t=0$  ببندیم، جریان  $i$  از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$e = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3-176)$$

که در نتیجه:

$$i = Ke^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (177-3)$$

که در آن داریم:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{\omega L}{R} \right]$$

در معادله ۱۷۷-۳ مقدار  $K$  به گونه‌ای است که در  $t=0^+$ ، جریان  $i$  با مقدار آن در  $t=0^-$ ، یکسان است. اگر جریان  $i$  در  $t=0^-$  مساوی  $i_0$  باشد، داریم:

$$K = i_0 - \frac{E_m}{Z} \sin(\alpha - \phi) \quad (178-3)$$

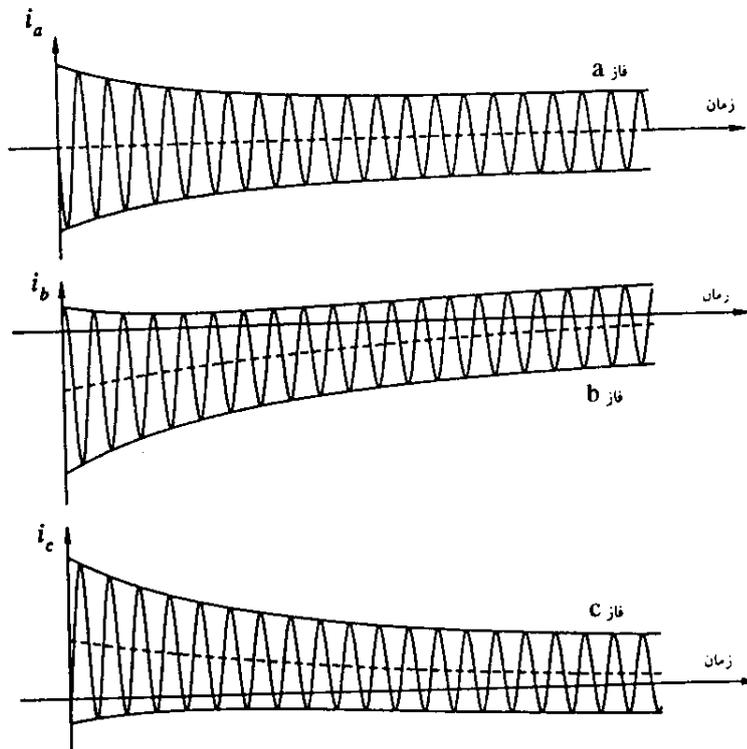
از معادله ۱۷۷-۳ مشخص است که جریان اتصال کوتاه، دو مؤلفه، یکی مؤلفه گذرای یک طرفه و دیگری مؤلفه حالت ماندگار متناوب دارد. حضور مؤلفه یکطرفه باعث می‌شود که از عدم تغییر لحظه‌ای جریان، اطمینان حاصل شود. این مؤلفه با ثابت زمانی  $L/R$  به سمت صفر میل می‌کند.

### ۳-۷-۲ اتصال کوتاه سه فاز در پایانه‌های یک ماشین سنکرون

اگر یک اتصال کوتاه ناگهانی سه فاز در پایانه‌های یک ماشین سنکرون اتفاق افتد، جریانهای سه فاز مطابق با شکل ۳-۲۵ خواهند بود. به طور کلی، جریان در هر فاز، دو مؤلفه مشخص دارد. الف) مؤلفه‌ای با فرکانس اصلی، که در ابتدا سریعاً کاهش می‌یابد (در عرض چند سیکل) و سپس به طور نسبتاً آهسته (ظرف چند ثانیه) به مقدار حالت ماندگار خود می‌رسد. ب) مؤلفه یک طرفه (یا مؤلفه جریان مستقیم) که به طور نمایی ظرف چند سیکل، به سمت صفر میل می‌کند.

این موضوع، شبیه جریان اتصال کوتاه در مدار ساده  $RL$  بخش قبل است. اما در ماشین سنکرون، دامنه مؤلفه جریان متناوب، ثابت نیست زیرا ولتاژ داخلی که تابعی از شار دور روتور است، ثابت نیست. کاهش سریع اولیه مؤلفه جریان متناوب، به علت کاهش سریع شار دورهای

مدارهای زیرگذرا<sup>۱</sup> (۱d و ۲q) در شکلهای ۱۸-۳ و ۱۹-۳ است. بخش کاهش کند مؤلفه جریان متناوب، به علت کاهش کند شاردهای مدارهای گذرا<sup>۲</sup> (تحریک و ۱q) است.



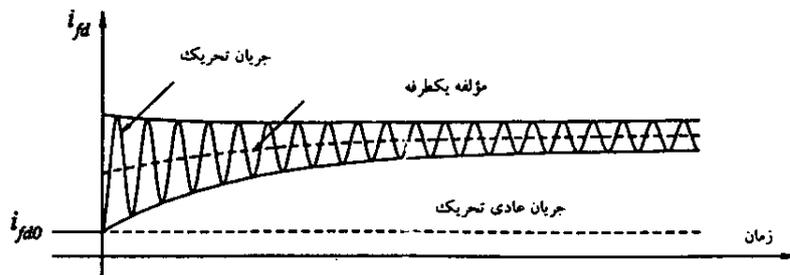
شکل ۳-۲۵ جریانهای اتصال کوتاه در سه فاز

مؤلفه‌های جریان مستقیم در سه فاز، دامنه‌های متفاوتی دارند و یا ثابت زمانی آرمیچر،  $T_a$ ، کاهش می‌یابند. مقدار ثابت زمانی برابر با نسبت اندوکتانس مؤثر آرمیچر (زمانی که جریانهای یکطرفه از آرمیچر عبور می‌کنند) به مقاومت آن است.

علاوه بر مؤلفه‌های جریان متناوب و جریان مستقیم، جریانهای اتصال کوتاه ماشین، بسته به برجستگی زیرگذرای روتور  $(X_d'' - X_d')$  [۱۰]، دارای مؤلفه‌های هارمونیک دوم نیز هستند. دامنه این مؤلفه‌ها بسیار کوچک است و معمولاً اهمیت بسیار کمی دارند.

جریانهای اتصال کوتاه (متقارن یا نامتقارن) یا جریانهای در اثر هر نوع اغتشاش دیگر را می‌توان با حل معادلات ۳-۲۶ تا ۳-۵۱ بر حسب متغیرهای فاز (abc) یا با حل معادلات ۳-۱۲۰ تا ۳-۱۳۳ بر حسب متغیرهای  $dq0$ ، به دست آورد. مؤلفه‌های فرکانس اصلی جریانهای فاز به صورت مؤلفه‌های یکطرفه (جریان مستقیم) در شکل تبدیل یافته  $i_d$  و  $i_q$ ، ظاهر می‌شوند. مؤلفه جریان مستقیم مربوط به جریانهای فاز، به صورت مؤلفه‌های فرکانس اصلی، در  $i_d$  و  $i_q$  پدیدار می‌گردند.

در شکل ۳-۲۶، جریان تحریک به دنبال بروز اتصال کوتاه نشان داده شده است. این جریان، مطابق با مؤلفه‌های جریان متناوب و جریان مستقیم مربوط به فاز آرمیچر، دارای یک مؤلفه یکطرفه و یک مؤلفه متناوب است.



شکل ۳-۲۶ پاسخ جریان تحریک پس از یک اتصال کوتاه استاتور

۳-۷-۳ حذف آفست<sup>۱</sup> جریان مستقیم در جریان اتصال کوتاه  
مطالعه عملکرد یک سیستم قدرت با در نظر گرفتن تأثیر مؤلفه‌های فرکانس اصلی و یکطرفه

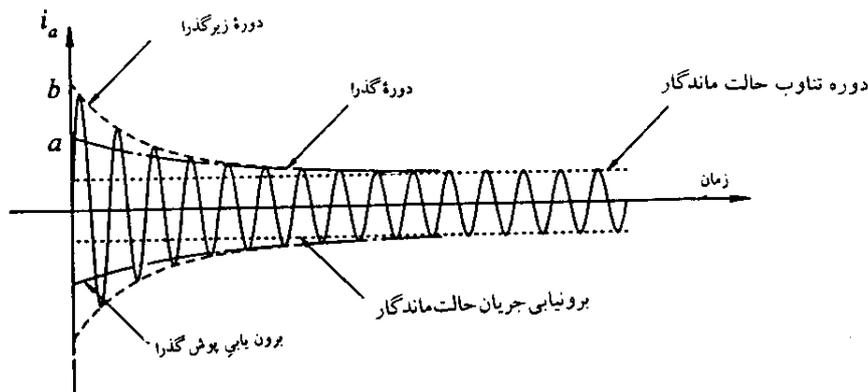
1. Offset

جریانهای فاز، پیچیده و از نظر محاسباتی مشکل است. در بسیاری از مطالعات سیستمهای قدرت، اگر از مؤلفه جریان مستقیم صرف نظر شود یا به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد، محاسبات، بسیار ساده تر خواهد شد. این کار همچنین این امکان را فراهم می سازد که عوامل مهم و بی اهمیت مؤثر در عملکرد دینامیکی سیستمهای قدرت را، مورد شناسایی قرار دهیم. تأثیر مؤلفه جریان مستقیم را می توان با حذف جملات ولتاژ ترانسفورمری ( $p\psi_q$  و  $p\psi_d$ ) در معادلات ۳-۱۲۰ و ۳-۱۲۱ ولتاژهای استاتور، از میان برد:

$$e_d = p\psi_d - \omega_r \psi_q - R_a i_d$$

$$e_q = p\psi_q + \omega_r \psi_d - R_a i_q$$

جملات ولتاژ ترانسفورمری عملکرد گذرای استاتور را نشان می دهند و از تغییر لحظه ای  $\psi_d$  و  $\psi_q$ ، جلوگیری می کنند. این موضوع است که باعث پیدایش مؤلفه های جریان مستقیم می شود. از این رو صرف نظر کردن از جمله های  $p\psi_q$  و  $p\psi_d$ ، مؤلفه جریان مستقیم و تأثیر آن را بر روی عملکرد دینامیکی ماشین، حذف می نماید. با صرف نظر کردن از عبارات فوق، فرض نمی کنیم که  $\psi_d$  و  $\psi_q$  ثابت می مانند بلکه برعکس، فرض می کنیم که به دنبال یک اغتشاش، آنها به صورت لحظه ای می توانند تغییر نمایند. اگر از عملکرد گذرای استاتور، با حذف جمله  $p\psi$ ، صرف نظر کنیم، جریان اتصال کوتاه آرمیچر، دقیق شکل ۳-۲۷ خواهد شد.



شکل ۳-۲۷ مؤلفه فرکانس اصلی جریان آرمیچر

مشاهده می‌کنیم که جریان حاصل، تنها دارای مؤلفه فرکانس اصلی است. شکل موج جریان را می‌توان به سه دوره زمانی قابل تفکیک، بخش کرد. دوره زیرگذرا<sup>۱</sup> که تنها چند سیکل اول طول می‌کشد که در طی آن جریان سریعاً کاهش می‌یابد، دوره گذرا<sup>۲</sup> که زمان وسیع تری را شامل می‌شود و جریان در طی آن به طور آهسته کاهش می‌یابد و سرانجام دوره حالت ماندگار<sup>۳</sup> که در طی آن دامنه جریان، ثابت باقی می‌ماند. پارامترهایی از ماشین سنکرون را، که تعیین کننده دامنه جریان اتصال کوتاه طی سه دوره و نیز میزان کاهش آن طی دو دوره اول هستند، در بخش آینده مورد بحث قرار خواهیم داد.

به طور خلاصه در این بخش، عملکرد مدارهای الکتریکی یک ماشین سنکرون را با در نظر گرفتن اتصال کوتاه سه فاز مورد بررسی قرار دادیم. اهمیت صرف نظر کردن از ولتاژهای ترانسفورمری ( $p\Psi_q$  و  $p\Psi_d$ ) در معادلات ولتاژ استاتور مورد تأکید قرار گرفت. این موضوع راهنمای ارزشمندی در نمایش ماشین سنکرون در مطالعات سیستمهای قدرت است و نیز به درک تأثیر پارامترهای ماشین سنکرون در مطالعات سیستم، کمک می‌کند. نیاز به و تأثیر حذف ولتاژهای ترانسفورمری در مطالعات پایداری سیستمهای قدرت، در فصل پنجم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### ۳-۸ اشباع مغناطیسی

تاکنون در به دست آوردن معادلات اساسی ماشین سنکرون و بررسی مشخصه‌های آن، از تأثیر اشباع آهن استاتور و روتور صرف نظر کرده‌ایم. همچنان که در بخش ۳-۲ مطرح شد، این کار به آن دلیل انجام شد که بررسی را ساده و امکان پذیر نماید. بررسی دقیق عملکرد ماشین سنکرون با احتساب تأثیر اشباع، کار بیهوده‌ای است. هرگونه روش عملی به منظور به حساب آوردن تأثیر اشباع، باید با توجه به سادگی ساختار مدل، در دسترس بودن اطلاعات و دقت نتایج و بر اساس منطق نیمه شهودی<sup>۴</sup> و تقریبهای معقول و منطقی، صورت پذیرد. قبل از پرداختن به روشهای نمایش اشباع در مطالعات پایداری، لازم است به طور خلاصه در حالت استاتور مدار باز و اتصال کوتاه، مروری بر مشخصه‌های ماشین سنکرون داشته باشیم.

1. Subtransient

2. Transient

3. Steady State

4. Semi - heuristic

## ۳-۸-۱ مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه

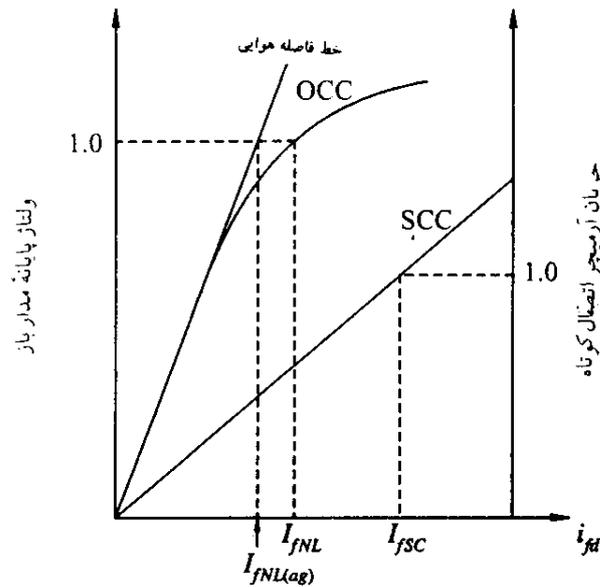
اطلاعات مدار مغناطیسی که در بررسی اشباع ضروری است به کمک مشخصه مدار باز ماشین تأمین می‌گردد. همچنان که در بخش ۳-۶-۳ مشاهده شد در حالت بی‌باری و سرعت نامی داریم:

$$i_d = i_q = \psi_q = e_d = 0$$

و:

$$E_t = e_q = \psi_d = L_{ad} i_{fd}$$

بنابراین، مشخصه مدار باز<sup>۱</sup> (OCC) ماشین که  $E_t$  و  $i_{fd}$  را به هم مرتبط می‌کند، تأثیر اشباع را در محور طولی نشان می‌دهد. نمونه‌ای از این مشخصه در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۸ مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه

خط مماس بر بخش پایینی منحنی، خط فاصله هوایی<sup>۱</sup> است که نمایانگر جریان تحریک (یا نیروی محرکه مغناطیسی) لازم برای غلبه بر مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی است. انحراف مشخصه مدار باز از خط فاصله هوایی نمایشگر حد اشباع در آهن روتور و استاتور است. در شکل ۳-۲۸، مشخصه اتصال کوتاه<sup>۲</sup> (SCC) ماشین نیز نشان داده شده است. این مشخصه جریان آرمیچر را برحسب جریان تحریک نشان می‌دهد زمانی که ژنراتور در حالت ماندگار و سرعت نامی کار می‌کند و در پایانه‌های آرمیچر آن اتصال کوتاه سه فازی رخ داده است. این مشخصه تا جریان نامی و بسیار بالاتر از آن خطی است، زیرا به علت تأثیر عکس‌العمل آرمیچر، مقدار اشباع در شرایط نامی اتصال کوتاه، ناچیز و یا صفر است.

از شکل ۳-۲۲ مشاهده می‌شود که ولتاژ تولید شده داخلی مساوی حاصل ضرب جریان اتصال کوتاه و راکتانس سنکرون است ( $R_a$  بسیار کوچکتر از  $X_s$  است و از این رو از آن صرف نظر می‌شود). زمانی که جریان اتصال کوتاه مساوی ۱ در مبنای واحد است، از شکل ۳-۲۸، این ولتاژ متناسب با  $I_{fsc}$  است. بنابراین:

$$KI_{fsc} = \sqrt{0} X_{s(unsat)}$$

زمانی که ولتاژ مساوی ۱ در مبنای واحد از خط فاصله هوایی باشد، داریم:

$$KI_{fNL(ag)} = \sqrt{0}$$

بنابراین مقدار اشباع نشده  $X_s$  مساوی است با:

$$X_{s(unsat)} = \frac{I_{fsc}}{I_{fNL(ag)}} \quad (۱۷۹-۳)$$

مقدار اشباع شده  $X_s$  در ولتاژ نامی برابر است با:

$$X_{s(sat)} = \frac{I_{fsc}}{I_{fNL}} \quad (۱۸۰-۳)$$

1. Air Gap Line

2. Short Circuit Characteristics

که  $I_{fsc}$  و  $I_{fNL}$  به ترتیب جریانهای تحریک لازم به منظور تأمین ولتاژ نامی از روی مشخصه مدار باز و جریان نامی از روی مشخصه مدار اتصال کوتاه هستند. نسبت اتصال کوتاه<sup>۱</sup> (SCR) طبق تعریف نسبت جریان تحریک لازم به منظور تولید ولتاژ نامی در سرعت نامی و حالت بدون بار به جریان تحریک لازم برای ایجاد جریان آرمیچر نامی در حالت ماندگار اتصال کوتاه سه فاز است. یعنی:

$$SCR = \frac{I_{fNL}}{I_{fsc}} = \frac{1}{X_{s(sat)}} \quad (۱۸۱-۳)$$

اگر اشباعی وجود نمی‌داشت، نسبت اتصال کوتاه، مساوی عکس مقدار اشباع نشده راکتانس سنکرون می‌بود. این نسبت، حد اشباع را می‌رساند و از این رو از بُعد عملکرد ماشین و قیمت آن، اهمیت دارد که هر چه مقدار آن کمتر باشد نشانگر این است که تغییر بزرگتری در جریان تحریک لازم است تا به ازای تغییر مشخصی در بار، ولتاژ پایانه را ثابت نگه دارد. از این رو، ماشین سنکرونی با نسبت اتصال کوتاه کوچک، نیازمند سیستم تحریکی است که قادر باشد تغییرات بزرگ جریان تحریک را به منظور پایداری سیستم، تأمین نماید. از طرف دیگر، هرچه این نسبت، کوچکتر باشد، اندازه، وزن و قیمت ماشین کمتر است. با توجه به پیشرفتهای موجود در زمینه سیستمهای تحریک و کنترل‌کننده‌های مربوطه، امروزه تمایل به استفاده از ژنراتورهایی با نسبت اتصال کوتاه کوچکتر و در نتیجه قیمت کمتر، افزایش یافته است.

### ۳-۸-۲ نمایش اشباع در مطالعات پایداری

در نمایش اشباع مغناطیسی در مطالعات پایداری، معمولاً فرض می‌شود که:

الف) اندوکتانسهای ناشی، مستقل از اشباع هستند. شارهای ناشی در بخش عمده‌ای از مسیر خود از هوا عبور می‌کنند و از این رو، اشباع آهن نباید تأثیر زیادی بر آنها داشته باشد. بنابراین تنها اجزایی از مدارهای معادل شکل ۳-۱۸ که تحت تأثیر اشباع قرار می‌گیرند، اندوکتانسهای متقابل  $L_{dq}$  و  $L_{hd}$  است.

ب) شارهای ناشی به اشباع آهن کمک نمی‌کنند. این شارها معمولاً کوچک هستند و مسیر

آنها فقط در بخش کوچکی بر مسیر شار اصلی منطبق است. با این فرض، اشباع از روی شار دور فاصله هوایی تعیین می شود.

ج) رابطه اشباع بین شار حاصل فاصله هوایی و نیروی محرکه مغناطیسی، در حالت بدون بار و بارگذاری شده ماشین، یکسان است. این فرض، اجازه می دهد که مشخصه اشباع را با استفاده از منحنی اشباع مدار باز، که معمولاً تنها منحنی اشباع قابل دسترسی است، بررسی کنیم. د) در نتیجه تأثیر غیر خطی حاصل از اشباع، هیچ تزویج مغناطیسی بین محورهای طولی و عرضی ایجاد نمی شود یعنی جریان در سیم پیچهای یک محور، هیچ شاری را از سیم پیچهای محور دیگر عبور نمی دهد.

با توجه به فرضیات فوق، تأثیر اشباع را می توان به صورت زیر مدل نمود:

$$L_{ad} = K_{sd} L_{adu} \quad (182-3)$$

$$L_{aq} = K_{sq} L_{aqu} \quad (183-3)$$

که  $L_{adu}$  و  $L_{aqu}$  مقادیر اشباع نشده  $L_{ad}$  و  $L_{aq}$  هستند.  $K_{sd}$  و  $K_{sq}$  به ترتیب تأثیر حد اشباع را در دو محور طولی و عرضی نشان می دهند. ابتدا بحث را بر اشباع در محور طولی و سپس بر محور عرضی استوار می کنیم. با توجه به فرض «ج» فوق، اشباع در محور  $d$  را می توان از مشخصه مدار باز ماشین به دست آورد. با توجه به شکل ۳-۲۹، در حالت کاری "a" (روی مشخصه مدار باز)، ضریب اشباع  $K_{sd}$  از رابطه زیر تعیین می شود:

$$K_{sd} = \frac{\Psi_{at}}{\Psi_{at0}} \quad (184-3)$$

با یک تناسب ساده می توان نشان داد که:

$$K_{sd} = \frac{I_c}{I} \quad (185-3)$$

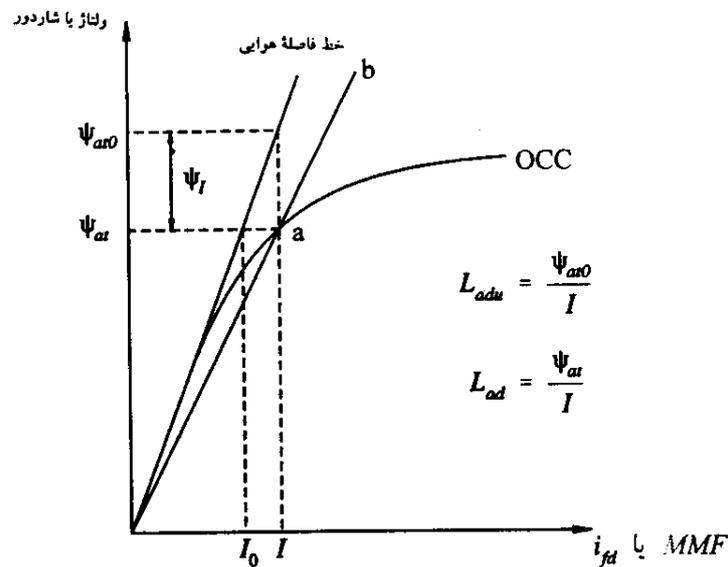
در نمایش اشباع، از عبارت معادله ۳-۱۸۴ استفاده می کنیم. این معادله، حد اشباع را برای هر مقدار مشخص شار دور فاصله هوایی یا ولتاژ نشان می دهد. گام بعدی این است که روش مناسبی را برای نمایش ریاضی حد انحراف مشخصه مدار باز از خط فاصله هوایی، ارائه نماییم.

با تعریف:

$$\Psi_1 = \Psi_{at0} - \Psi_{at} \quad (۱۸۶-۳)$$

عبارت ضریب اشباع به صورت زیر در می آید:

$$K_{sd} = \frac{\Psi_{at}}{\Psi_{at} + \Psi_1}$$



شکل ۳-۲۹ مشخصه مدار باز با نمایش تأثیرات اشباع

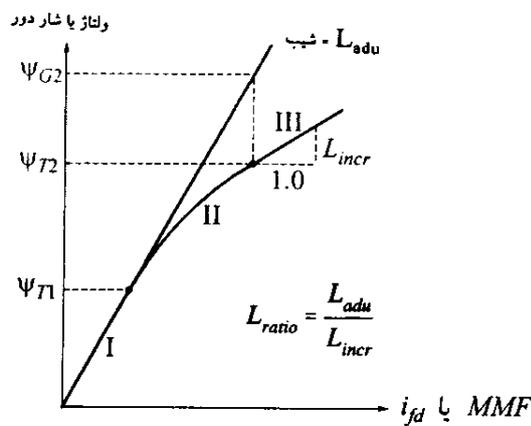
منحنی اشباع را می توان به سه بخش تقسیم کرد: بخش اشباع نشده I، بخش غیر خطی II و بخش خطی کاملاً اشباع شده III. مقادیر  $\Psi_{T1}$  و  $\Psi_{T2}$ ، مطابق با شکل ۳-۳۰ مرزهای بین سه بخش را تعیین می کنند. در بخش I که  $\Psi_{at} \leq \Psi_{T1}$  است داریم:

$$\Psi_1 = 0 \quad (۱۸۸-۳)$$

در بخش II که  $\Psi_{T1} \leq \Psi_{at} \leq \Psi_{T2}$  است،  $\Psi_1$  را می توان به صورت یک تابع مناسب ریاضی، بیان

نمود. در اینجا، از یک تابع نمایی به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$\Psi_I = A_{sat} e^{B_{sat}(\Psi_{at} - \Psi_{T1})} \quad (189-3)$$



شکل ۳-۳۰ نمایش مشخصه اشباع

که  $A_{sat}$  و  $B_{sat}$  ضرایب ثابتی هستند که به مشخصه اشباع در بخش II، بستگی دارند. زمانی که  $\Psi_{at} = \Psi_{T1}$  باشد، از معادله ۳-۱۸۹،  $\Psi_I = A_{sat}$  نتیجه می‌شود. از این رو، این نحوه نمایش، انفصال کوچکی را در محل تلاقی بخشهای I و II پدید می‌آورد. با وجود این، معمولاً  $A_{sat}$  بسیار کوچک است و انفصال، اهمیتی ندارد. در بخش III که  $\Psi_{at} > \Psi_{T2}$  است، داریم:

$$\Psi_I = \Psi_{G2} + L_{ratio}(\Psi_{at} - \Psi_{T2}) - \Psi_{at} \quad (190-3)$$

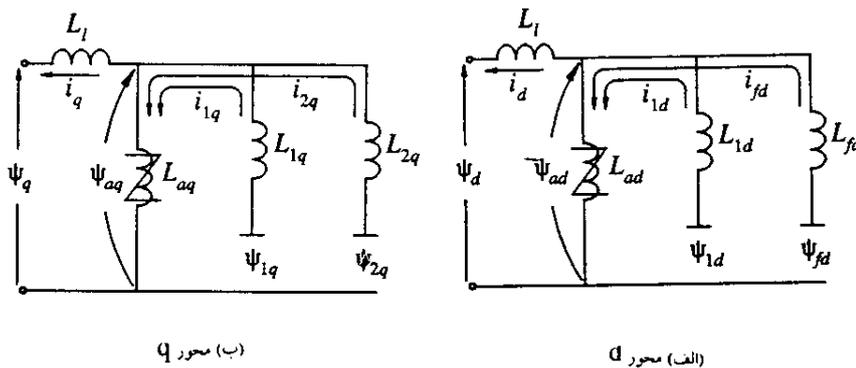
که  $L_{ratio}$  مطابق با آنچه که در شکل ۳-۳۰ تعریف شده، نسبت شیب خط فاصله هوایی به شیب افزایشی بخش III مشخصه مدار باز است. با نحوه نمایش مذکور، مشخصه اشباع هر ماشین را می‌توان با مشخص کردن  $\Psi_{T1}$ ،  $\Psi_{T2}$ ،

$\Psi_{G2}$ ،  $A_{sat}$ ،  $B_{sat}$  و  $L_{ratio}$ ، تعیین کرد.

مقدار  $K_{sd}$  را می‌توان در هر نقطه کار به صورت تابعی از شار دور مربوطه فاصله هوایی یعنی:

$$\Psi_{at} = \sqrt{\Psi_{ad}^2 + \Psi_{aq}^2} \quad (191-3)$$

محاسبه نمود که  $\Psi_{aq}$  و  $\Psi_{ad}$  مؤلفه‌های محوره‌های طولی و عرضی شار دور فاصله هوایی یا متقابل هستند که در شکل ۳-۳۱ مشخص شده‌اند. شار دورهای محوره‌های طولی و عرضی فاصله هوایی از روابط زیر مشخص می‌شوند:



شکل ۳-۳۱ مدارهای معادل با نمایش عناصر غیرخطی و شار دورهای فاصله هوایی

$$\Psi_{ad} = \Psi_d + L_1 i_d = (e_q + R_a i_q) + L_1 i_d \quad (192-3)$$

$$\Psi_{aq} = \Psi_q + L_1 i_q = (-e_d - R_a i_d) + L_1 i_q \quad (193-3)$$

از این رو، در مبنای واحد،  $\Psi_{at}$  مساوی ولتاژ فاصله هوایی یعنی:

$$\tilde{E}_a = \tilde{E}_t + (R_a + jX_l) \tilde{I} \quad (194-3)$$

است. بنابراین  $K_{sd}$  را می‌توان برای هر مقدار مشخص ولتاژ و جریان پایانه، ابتدا با محاسبه  $\tilde{E}_a$  و سپس با استفاده از معادلات ۳-۱۸۷، ۳-۱۸۸، ۳-۱۸۹ یا ۳-۱۹۰ تعیین کرد.

در ماشینهای سنکرون قطب برجسته، از آنجا که بخش عمده‌ای از مسیر شارِ محور عرضی از هوا می‌گذرد،  $L_{\text{ه}}$  به مقدار زیادی با اشباع در بخش آهنی مسیر، تغییر نمی‌نماید. از این رو، در تمام حالت‌های بارگذاری،  $K_{\text{ه}}$  مساوی  $1/0$  فرض می‌شود.

در حالت ماشینهای سنکرون روتور استوانه‌ای، اشباع مغناطیسی در هر دو محور وجود دارد. بنابراین باید  $K_{\text{ه}}$  را از مشخصه بی‌باری اشباع در محور عرضی به دست آورد. اما معمولاً، اطلاعات مربوط به اشباع در محور  $q$  وجود ندارد. از این رو،  $K_{\text{ه}}$  را مساوی  $K_{\text{د}}$  فرض می‌کنیم. این فرض بدان معنی است که مقاومت مغناطیسی مسیر پیرامون روتور، یکسان است. در بخش آینده، روش اصلاح شده‌ای برای مدل‌سازی مشخصه اشباع محور  $q$  که با استفاده از روش بررسی اجزای محدود<sup>۱</sup> یا آزمایش بر روی ماشین بارگذاری شده به دست می‌آید، مطرح خواهد گردید.

### ۳-۸-۳ مدل‌سازی اصلاح شده اشباع

روش مذکور در بخش قبل برای نمایش اشباع بر فرضیاتی ایده‌آل استوار بود که این فرضیات همواره در تمام حالت‌های بارگذاری ماشین، صادق نیست. از این رو برای نمایش دقیقتر اشباع، در تحقیقات منتشره، روش‌های اصلاح شده‌ای به منظور غلبه بر این محدودیتها مطرح شده است. این روشها شامل توجه به تأثیرات زیر است:

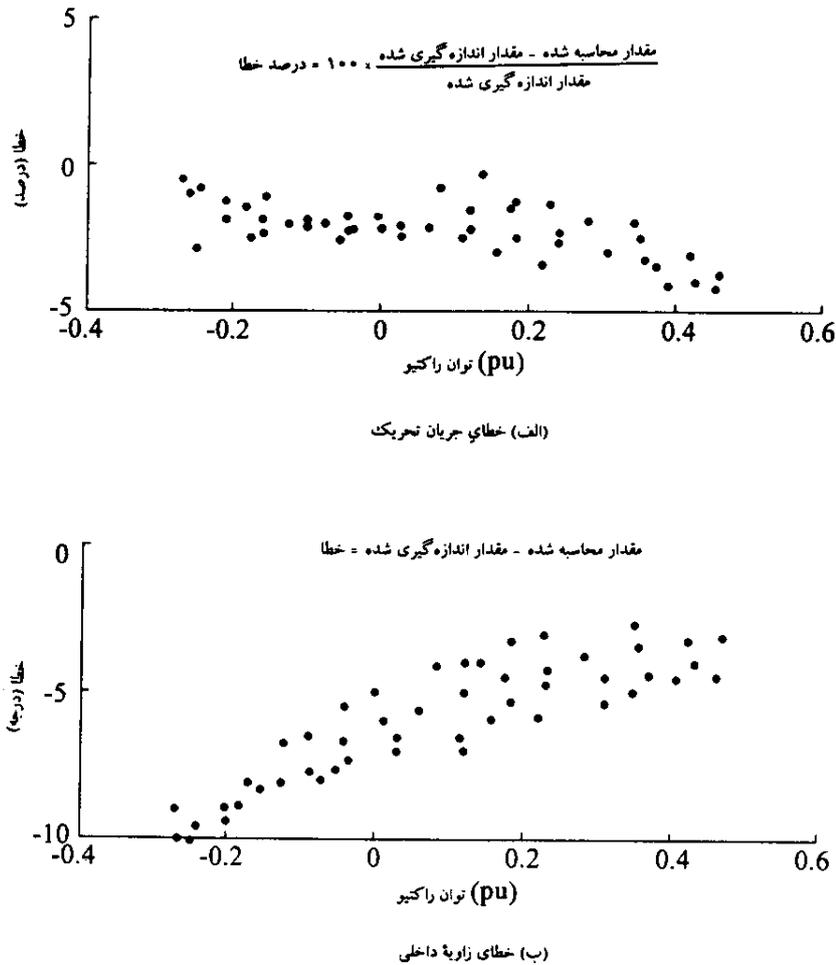
الف) وابستگی توان و زاویه روتور به اشباع در محورهای طولی و عرضی [۴، ۷، ۲۲]. این تغییر به آن دلیل رخ می‌دهد که در حالت بارگذاری شده، اشباع بیشتری در آهن روتور اتفاق می‌افتد و مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی با زاویه روتور تغییر می‌کند. شارهای متقابل استاتور در حالت بی‌باری و بارگذاری شده با هم مشابه است زیرا ولتاژ استاتور در هر دو حالت نزدیک به مقدار نامی است. از طرف دیگر، به علت تحریک قوی در حالت بارگذاری شده، بخصوص زمانی که ماشین در حالت فوق تحریک<sup>۲</sup> کار می‌کند، شار روتور به میزان زیادی متراکمتر است و بنابراین اشباع نسبت به حالت بی‌باری، شدیدتر است. در ولتاژ پایانه استاتور و

توان خروجی مشخص،  $L_{eq}$  در حالت فوق تحریک، کوچکتر و در حالت زیر تحریک<sup>۱</sup>، بزرگتر است. در مقابل،  $L_{eq}$  در حالت زیر تحریک، کوچکتر است زیرا زاویه بار مربوطه، بزرگتر است. نمایش دقیق اشباع با در نظر گرفتن وابستگی توان و زاویه روتور، نیازمند افزایش چشمگیر بار محاسباتی است که در مطالعات پایداری، توجیه پذیر نیست.

ب) تزویج متقابل بین محورهای طولی و عرضی [۶، ۹، ۲۳]. به علت شرایط غیر خطی حاصل از تأثیر اشباع، الگوی نفوذپذیری<sup>۲</sup> در اطراف محور طولی، متقارن نیست. این موضوع منجر به عدم تقارن در شاردهورها می شود یعنی جریانهای هر محور در محور دیگر، شاردهور ایجاد می نماید. در حقیقت، تزویج متقابل باعث می شود که فرض اساسی در تبدیل  $dq$  پارک، بی اعتبار شود. با اینهمه، استفاده از مدل بسیار دقیق ماشین با در نظر گرفتن تأثیرات غیر خطی نه عملی و نه توجیه پذیر است. تأثیرات تزویج متقابل از درجه دوم اهمیت برخوردار است و ممکن است آن را به صورت تقریبی مدل نمود یا به طور کلی از آن صرف نظر کرد.

ج) اشباع محور عرضی [۵، ۶، ۹، ۲۴]. تجربه نشان داده که در ماشینهای سنکرون روتور استوانه‌ای، اشباع در محور عرضی به میزان زیادی بیشتر از اشباع در محور طولی است. این موضوع به دلیل وجود دندانهای روتور در مسیر مغناطیسی محور عرضی است. برای پیش بینی دقیق زاویه روتور و تحریک در حالت ماندگار، لازم است که با مشخصه اشباع در محور  $q$  به طور جداگانه‌ای نسبت به مشخصه در محور  $d$ ، برخورد شود. در شکل ۳-۳۲، خطای ایجاد شده، با فرض تساوی منحنی مشخصه مدار باز محور  $q$  با محور  $d$ ، نشان داده شده است. در این شکل، تفاوت بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده زاویه روتور و جریان تحریک برحسب تابعی از توان خروجی راکتیو یک ژنراتور ۵۰۰ مگاواتی در نیروگاه سوخت ذغال سنگ لامتن<sup>۳</sup> در انتاریو کانادا، نشان داده شده است [۵]. خطا در جریان تحریک در منطقه فوق تحریک، بیشتر است و حداکثر به حدود ۴٪ می رسد. خطا در زاویه روتور در منطقه زیر تحریک، بیشتر است و حداکثر به حدود  $10^\circ$  می رسد.

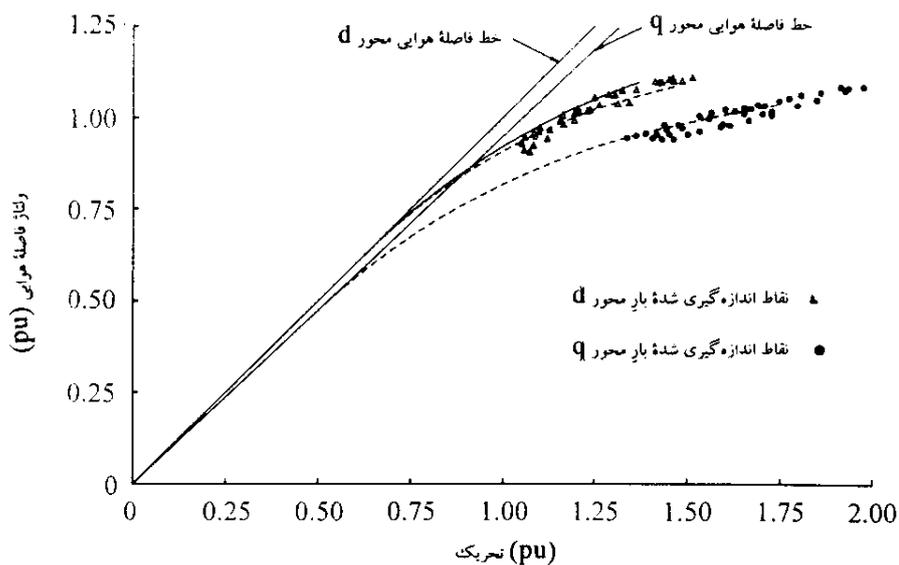
مشخصه اشباع محور  $q$  به سهولت از طرف سازندگان ژنراتور در اختیار قرار نمی گیرد. اما می توان آن را به آسانی با اندازه گیری جریان تحریک و زاویه روتور در مقادیر مختلف ولتاژ و



شکل ۳-۳۲ خطاهای جریان تحریک و زاویه داخلی با نمایش معمولی اشباع

توانهای حقیقی و راکتیو خروجی پایانه، در حالت ماندگار تعیین نمود. این اندازه گیریها همچنین مشخصه اشباع محور  $d$  در حالت بارگذاری شده را نشان می دهد که باید از منحنیهای اشباع مدار باز، دقیقتر باشد. شکل ۳-۳۳ مشخصه های اشباع محور  $d$  در حالت بارگذاری شده را نشان می دهد که باید از منحنیهای اشباع مدار باز، دقیقتر باشد. شکل ۳-۳۳ مشخصه های اشباع محور

$d$  و  $q$  را با استفاده از اندازه‌گیریهای حالت ماندگار بر روی واحد موجود در لامتن نشان می‌دهد [۵].



شکل ۳-۳۳ منحنیهای اشباع لامتن که از اندازه‌گیریهای حالت ماندگار جریان تحریک و زاویه روتور به دست آمده‌اند.

روش دقیقی برای نمایش اشباع با در نظر گرفتن تأثیرات تزویج متقابل و اشباع محور  $q$ ، با استفاده از روش اجزای محدود در مراجع ۶ و ۹ بیان شده است. ارزیابی تأثیر کلی این روش نمایش اصلاح شده بر پایداری سیستم در مرجع ۸ آمده است. به نظر می‌رسد که برای مورد تحت بررسی استفاده از چنین روش حُسن کمی داشته باشد. به طور کلی در مطالعات پایداری، مدل‌های بسیار پیچیده اشباع که بر اساس داده‌های خاصی پایه‌گذاری می‌شوند، توجه پذیر نیستند. در اغلب حالتها، روش مذکور در بخش ۳-۸-۲ که با استفاده از داده‌های قابل دسترس شکل می‌گیرد، کفایت می‌کند. در حالت‌های خاص، بهترین روش، استفاده از مشخصه اشباع محور  $d$  و  $q$  است که با اندازه‌گیریهای ساده در حالت ماندگار و بارگذاری شده به دست می‌آید (مانند آنچه که در شکل ۳-۳۳ نشان داده شده است).

استفاده از راکتانس پوتیر<sup>۱</sup>

اغلب، از ولتاژ  $E_p$  به دنبال راکتانس پوتیر  $X_p$ ، به جای  $E_a$  استفاده می‌شود تا حد اشباع را نشان دهد. عقیده بر این است که استفاده از  $X_p$  به جای  $X_l$  می‌تواند به صورت تجربی تفاوت بین مشخصه اشباع در حالت بارگذاری شده و بدون بار را اعمال نماید<sup>۲</sup>. عامل مهمی که اختلاف بین اشباع در حالت بارگذاری شده و بدون بار را ایجاد می‌نماید، تفاوت بین شارنشتی تحریک در دو حالت مزبور است. راکتانس پوتیر این تفاوت را به حساب می‌آورد و از راکتانس نشتی استاتور به علت شارنشتی بزرگتر تحریک در حالت بارگذاری شده، بزرگتر است. به دلیل روش محاسبه  $X_p$ ، استفاده از  $E_p$ ، مقادیر دقیق جریان تحریک را در وضعیت بارگذاری شده حالت ماندگار، تعیین می‌نماید. اما استفاده از آن به منظور نمایش اشباع در حالت گذرا، که سیم‌پیچهای میراکننده مؤثر هستند، در بعضی حالات منجر به نتایج غیر واقعی می‌شود. از این رو، استفاده از آن در مطالعات پایداری، توصیه نمی‌شود.

## مثال ۳-۳

منحنی اشباع مدار باز ژنراتور ۵۵۵ مگاوات آمپری مثالهای ۱-۳ و ۲-۳، در شکل ۳-۱م نشان داده شده است. مقادیر مبنای واحد مقاومتها و راکتانسهای مربوط به مدارهای استاتور به صورت زیر است:

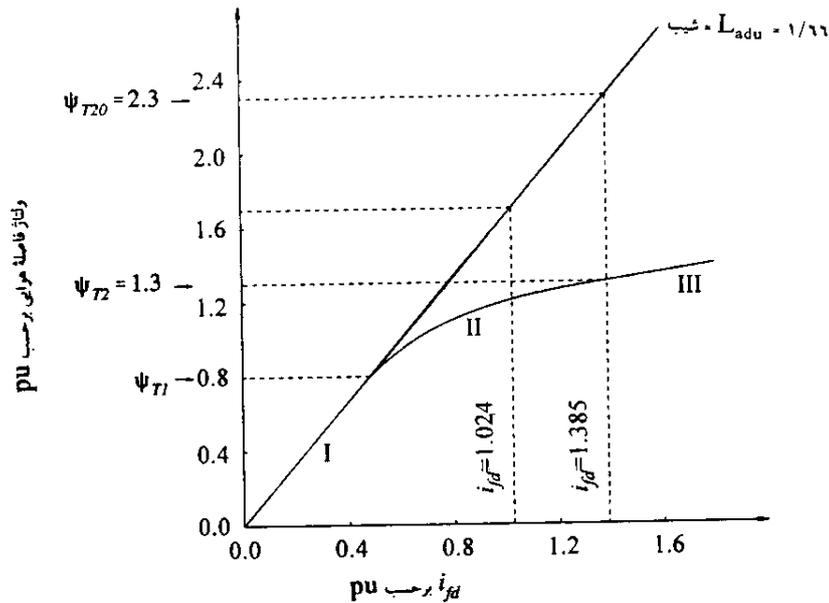
$$R_a = 0.003 \quad L_l = 0.15 \quad L_{adu} = 1/66 \quad L_{aqu} = 1/61$$

الف) اگر جریان تحریک لازم به منظور تولید ولتاژ  $E_t$  نامی روی خط فاصله هوایی، ۱۳۰۰ آمپر باشد، مقادیر پایه جریان و ولتاژ تحریک را تعیین کنید. این مقادیر را با مقادیر محاسبه شده در مثال ۳-۱ مقایسه نمایید.

ب) اگر بخش II منحنی اشباع به وسیله تابع معادله ۳-۱۸۹ تعریف شده باشد، ثابتهای  $A_{sat}$  و  $B_{sat}$  را تعیین کنید.

## 1. Pottier

۲. به منظور شرح راکتانس پوتیر و مفهوم فیزیکی آن به مراجع ۱۲ و ۱۴ مراجعه شود.



شکل ۳-۱ منحنی مدار باز اشباع

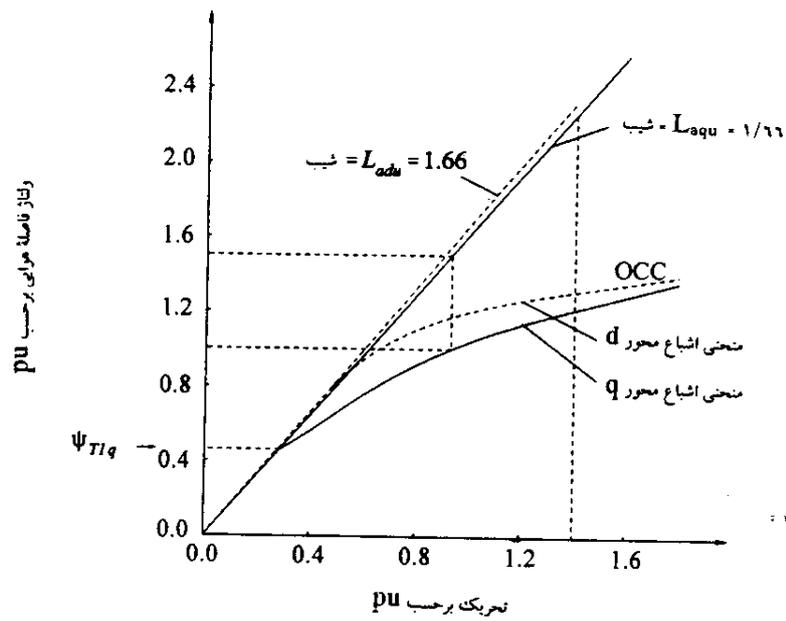
ج) زمانی که ولتاژ پایانه آرمیچر، مقدار نامی باشد برای هر یک از حالت‌های خروجی زیر ژنراتور که در مبنای واحد محاسبه شده:

۱.  $P_t = 0$  و  $Q_t = 0$
۲.  $P_t = 0/4$  و  $Q_t = 0/2$  (فوق تحریک)
۳.  $P_t = 0/9$  و  $Q_t = 0/436$
۴.  $P_t = 0/9$  و  $Q_t = 0$
۵.  $P_t = 0/9$  و  $Q_t = -0/2$  (زیر تحریک)

ولتاژ خط هوایی  $E_a$ ، ضریب اشباع  $K_{ad}$ ، زاویه داخلی روتور  $\delta$  و جریان تحریک  $i_{fd}$  را محاسبه کنید. فرض کنید که منحنی مشخصه مدار باز، مشخصه اشباع را در هر دو محور  $d$  و  $q$  نشان دهد. در مورد تأثیر توان راکتیو خروجی بر  $\delta$  و  $i_{fd}$ ، اظهار نظر نمایید.

د) اگر منحنی مشخصه اشباع محور  $q$ ، مطابق با شکل ۳-۲ باشد، نتایج بند "ج" چگونه

خواهد بود؟



شکل ۳-۲ مشخصه‌های اشباع محور d و q

حل

الف) همچنان که در بخش ۳-۸-۱ مطرح شد، در حالت بی‌باری و سرعت نامی داریم:

$$E_t = e_q = L_{ad} i_{fd}$$

شیب خط فاصله هوایی، نمایشگر مقدار اشباع نشده  $L_{ad}$  است. بنابراین، جریان تحریک لازم به منظور تولید  $E_t = 1/0$  در مبنای واحد و بر روی خط فاصله هوایی برابر است با:

$$i_{fd} = \frac{V_0}{L_{adu}} \text{ مبنای واحد}$$

$$= \frac{V_0}{1/66} \text{ مبنای واحد}$$

از آنجا که این مقدار مساوی ۱۳۰۰ آمپر است، جریان پایه تحریک برابر است با:

$$i_{fd \text{ base}} = 1300 \times 1/66 = 2158 \text{ A}$$

$$e_{fd \text{ base}} = \frac{VA \text{ نامی}}{i_{fd \text{ base}}} = \frac{555 \times 10^6}{2158} \text{ V}$$

$$= 257/183 \text{ kV}$$

همچنان که انتظار می‌رفت، این نتیجه با مقدار محاسبه شده در مثال ۳-۱ مطابقت دارد.

ب) از معادله ۳-۱۸۹ داریم:

$$\psi_1 = A_{sat} e^{B_{sat}(\psi_{at} - \psi_{T1})}$$

برای محاسبه  $A_{sat}$  و  $B_{sat}$ ، دو نقطه  $\psi_{at} = 1/2$  و  $\psi_{at} = 1/3$  را روی منحنی اشباع شکل ۳-۱ م در نظر می‌گیریم. زمانی که  $\psi_{at} = 1/2$  باشد،  $\psi_1 = 1/7 - 1/2 = 0/5$  باشد، زمانی که  $\psi_{at} = 1/3$  باشد،  $\psi_1 = 2/3 - 1/3 = 1/0$  است، بنابراین:

$$0/5 = A_{sat} e^{B_{sat}(1/2 - 0/8)}$$

و:

$$1/0 = A_{sat} e^{B_{sat}(1/3 - 0/8)}$$

که در نتیجه:

$$A_{sat} = 0/03125$$

$$B_{sat} = 6/931$$

ج) با استفاده از معادلات حالت ماندگار در بخش ۳-۶-۵ داریم:

$$I_t = \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{E_t}$$

$$\phi = \cos^{-1} \left[ \frac{P_t}{I_t E_t} \right]$$

$$\tilde{E}_a = \tilde{E}_t + (R_a + jX_l) \tilde{I}_t$$

$$\Psi_{at} = E_a$$

از شکل ۳-۱۱،  $\Psi_{T1} = 0/8$  و  $\Psi_{T2} = 1/3$  است. برای  $0/8 < \Psi_{at} < 1/3$  داریم:

$$\Psi_1 = 0.3125 e^{0.871(\Psi_{at} - 0/8)}$$

$$K_{sd} = K_{sq} = \frac{\Psi_{at}}{\Psi_{at} + \Psi_1}$$

$$X_{ad} = K_{sd} X_{adu}; \quad X_d = X_{ad} + X_l$$

$$X_{aq} = K_{sq} X_{aqu}; \quad X_q = X_{aq} + X_l$$

$$\delta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{X_q I_t \cos \phi - R_a I_t \sin \phi}{E_t + R_a I_t \cos \phi + X_q I_t \sin \phi} \right]$$

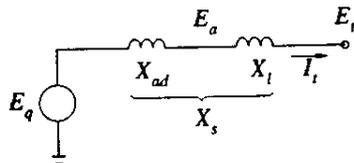
$$e_q = E_t \cos \delta_i$$

$$i_d = I_t \sin (\delta_i + \phi)$$

$$i_q = I_t \cos (\delta_i + \phi)$$

$$i_{fd} = \frac{e_q + R_a i_q + X_d i_d}{X_{ad}}$$

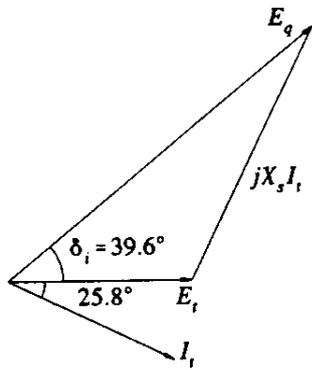
جدول ۳-۱ م، نتایج را برای حالت‌های کاری داده شده خلاصه کرده است. از نتایج، مشاهده می‌شود که توان راکتیو خروجی تأثیر فراوانی هم بر  $\delta_i$  و هم بر  $i_{fd}$  دارد. دلیل را می‌توان بسهولت با توجه به نمودارهای فازوری شکل ۳-۳ متوجه شد. این نمودارها بر اساس مدل ساده شده شکل ۳-۲۲ است که از برجستگی قطبها صرف نظر شده است.



$$X_{ad} = K_{sd} X_{adu}$$

$$E_q = X_{ad} i_{fd}$$

(الف) مدل ساده شده حالت ماندگار



$$X_{ad} = 0.835 \times 1.66 = 1.386$$

$$X_s = 1.386 + 0.15 = 1.536$$

$$I_t = 0.9 - j0.436$$

$$= 1.0 \angle -25.8^\circ$$

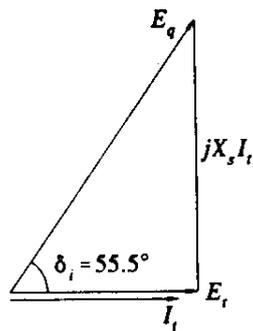
$$E_q = 1.0 + j1.536(0.9 - j0.436)$$

$$= 2.17 \angle 39.6^\circ$$

$$i_{fd} = 1.564$$

$$\delta_i = 39.6^\circ$$

(ب) نمودار فازوری با  $P = 0.9$  ،  $Q = 0.436$  ،  $E_t = 1.0$



$$X_{ad} = 0.882 \times 1.66 = 1.464$$

$$X_s = 1.614$$

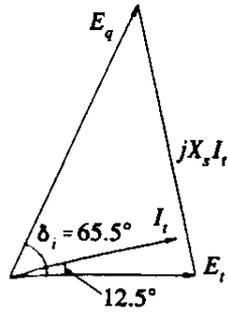
$$I_t = 0.9 \angle 0^\circ$$

$$E_q = 1.764 \angle 55.5^\circ$$

$$i_{fd} = 1.205$$

$$\delta_i = 55.5^\circ$$

(ج) نمودار فازوری با  $P = 0.9$  ،  $Q = 0$  ،  $E_t = 1.0$



$$X_{sd} = 0.899 \times 1.66 = 1.492$$

$$X_s = 1.64$$

$$I_t = 0.92 \angle 12.5^\circ$$

$$E_q = 1.62 \angle 65.5^\circ$$

$$i_{fd} = 1.086$$

$$\delta_i = 65.5^\circ$$

(د) نمودار فازوری با  $P = 0.9$ ،  $Q = -0.2$ ،  $E_t = 1.0$

شکل ۳-۳ م (ادامه) نمودارهای فازوری با نمایش تأثیر تغییر  $Q$  بر  $i_{fd}$  و  $\delta_i$

جدول ۱-۳ م

$P_t$	$Q_t$	$E_a$ (pu)	$K_{sd}$	$\delta_i$ (deg)	$i_{fd}$ (pu)
0	0	1/0	0/889	0	0/678
0/4	0/2	1/033	0/868	25/3	1/016
0/9	0/436	1/076	0/835	39/1	1/565
0	0	1/012	0/882	54/6	1/206
0/9	-0/2	0/982	0/899	64/6	1/089

(د) با استفاده از دو نقطه  $\Psi_{at} = 1/0$  و  $\Psi_{at} = 1/2$  بر روی منحنی اشباع محور  $q$  در

شکل ۳-۲ م (بخش II)، ضرایب ثابت زیر تعیین می شوند:

$$A_{\text{satq}} = 0/077$$

$$B_{\text{satq}} = 3/465$$

مقدار آستانه‌ای که شروع بخش II را تعیین می‌نماید، مساوی است با:

$$\Psi_{T1q} = 0/46$$

برای هر ولتاژ فاصله هوایی  $E_a = \Psi_{at}$ ، ضریب اشباع محور q برابر است با:

$$K_{sq} = \frac{\Psi_{at}}{\Psi_{at} + \Psi_{1q}}$$

که:

$$\Psi_{1q} = 0/077e^{3/265(\Psi_{at} - 0/46)}$$

نمایش اشباع محور d، شبیه قسمت "ج" است. جدول ۳-۲ م، نتایج را برای زمانی که اشباع در دو محور، متفاوت فرض شده، خلاصه کرده است. با توجه به نتایج و مقایسه آنها با نتایج جدول ۳-۱ م، مشخص است که تأثیر افزایش محور q، کاملاً مشهود است. این موضوع بخصوص در محدوده کاری زیر تحریک چشمگیر است.

جدول ۳-۲ م

$P_t$	$Q_t$	$E_a$	$K_{sd}$	$K_{sq}$	$\delta_i$ (deg)	$i_{fd}$ (pu)
0	0	1/0	0/886	0/667	0	0/678
0/4	0/2	1/033	0/868	0/648	21/0	1/013
0/9	0/436	1/076	0/835	0/623	34/6	1/559
0/9	0	1/012	0/882	0/660	47/5	1/194
0/9	-0/2	0/982	0/899	0/676	55/9	1/074

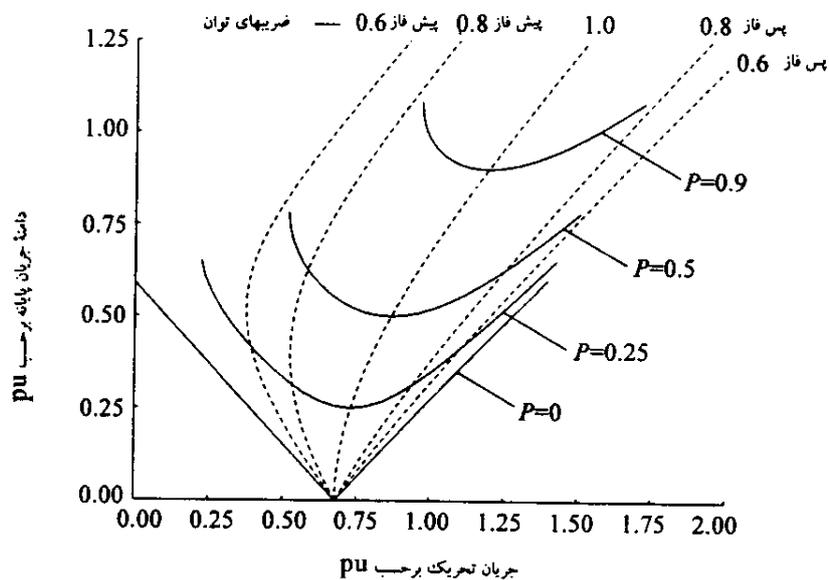
#### مثال ۳-۴

برای ژنراتور مثال ۳-۳، رابطه حالت ماندگار بین جریان آرمیچر و جریان تحریک را پیدا کنید زمانی که ولتاژ پایانه در مقدار نامی خود حفظ شود و:

الف) توان حقیقی در مقدار صفر،  $0.25 \text{ pu}$ ،  $0.5 \text{ pu}$  و  $0.9 \text{ pu}$  ثابت باشد.  
 ب) ضریب توان در مقدار  $0.6$  و  $0.8$  پیش فاز،  $1.0$ ،  $0.8$  و  $0.6$  پس فاز، ثابت باشد.  
 فرض کنید که مشخصه‌های اشباع دو محور  $d$  و  $q$ ، شبیه شکل ۳-۲ باشد. در مورد مشخصه‌های به دست آمده بحث کنید.

## حل

الف) در هر مقدار داده شده  $P$ ،  $Q$  را بین  $-0.6$  تا  $+0.6$  تغییر می‌دهیم. برای هر مقدار  $Q$ ،  $I_d$ ،  $I_q$ ،  $e_q$ ،  $\delta$ ،  $K_{sd}$ ،  $E_a$ ،  $I_t$  و  $i_{fd}$  را مطابق با مثال ۳-۲ به دست می‌آوریم. منحنیهای نمایشگر رابطه جریان آرمیچر و جریان تحریک برای مقادیر داده شده  $P$  در شکل ۳-۴ آمده است. این منحنیها به دلیل شکل خاص خود به منحنیهای  $V$  شکل، موسومند.



شکل ۳-۴ م رابطه میان جریان آرمیچر و تحریک با تغییر مقادیر  $P$  و ضرایب توان

ب) در هر مقدار داده شده ضریب توان،  $I_L$  را بین  $0/0$  و  $1/5$  تغییر می‌دهیم. مطابق با روش بند "الف" مقادیر  $P$ ،  $Q$  و  $\theta$  را برای هر حالت محاسبه می‌کنیم. مکان هندسی نقاط با ضریب توان ثابت، به صورت خط چین در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. این مشخصه‌ها معمولاً به منحنی‌های ترکیبی<sup>۱</sup> موسومند.

در هر توان حقیقی  $P$ ، جریان آرمیچر در ضریب توان  $1/0$ ، حداقل است. در چنین وضعی، تحریک، تمام جریان مغناطیس‌کننده لازم را فراهم می‌آورد و جریان آرمیچر فقط تأمین‌کننده توان حقیقی است. ژنراتور، توان راکتیو را نه جذب می‌کند و نه تحویل می‌دهد. اگر جریان تحریک را از مقداری که در حالت ضریب توان  $1/0$  دارد، افزایش دهیم، تمام جریان تحریک برای مغناطیسی کردن ژنراتور، لازم نیست. جریان استاتور که اکنون یک مؤلفه راکتیو علاوه بر مؤلفه حقیقی دارد، افزایش می‌یابد و نسبت به ولتاژ پایانه استاتور، پس‌فاز قرار می‌گیرد. توان راکتیو خروجی  $Q$ ، مثبت است و ضریب توان، پس‌فاز است. در چنین حالتی گفته می‌شود ژنراتور، فوق تحریک است.

اگر در مقابل، جریان تحریک را از مقداری که در حالت ضریب توان  $1/0$  دارد، کاهش دهیم، جریان تحریک برای مغناطیسی کردن ژنراتور کفایت نمی‌کند و مقدار اضافه لازم از سیستمی که ژنراتور به آن متصل است، اخذ می‌شود. هرچه، جریان تحریک بیشتر کاهش یابد، این مؤلفه جریان استاتور که از سیستم کشیده می‌شود، افزایش می‌یابد. از این‌رو، دامنه جریان استاتور، افزایش می‌یابد. در این حالت، ژنراتور،  $Q$  جذب می‌کند یعنی  $Q$  خروجی، منفی است و جریان استاتور نسبت به ولتاژ آن، پیش‌فاز قرار می‌گیرد. از این‌رو، ضریب توان، پیش‌فاز است در چنین حالتی گفته می‌شود ژنراتور، زیر تحریک است.

### ۳-۹ معادلات حرکت

معادلاتی که اهمیت اساسی در مطالعات پایداری سیستمهای قدرت دارند، معادلات لختی<sup>۲</sup> چرخشی است که تأثیر عدم تعادل بین گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور مکانیکی هر ماشین

1. Compounding Curves

2. Inertia

سنکرون را بیان می‌نمایند. در این بخش، این معادلات را به شکل مبنای واحد خود به دست می‌آوریم و پارامترهایی را که به منظور نمایش مشخصه‌های مکانیکی ماشینهای سنکرون در مطالعات پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرند، تعریف می‌کنیم.

### ۳-۹-۱ مروری بر مکانیزم حرکت

قبل از پرداختن به موضوع معادلات حرکت یک ماشین سنکرون، مفید است که بر کمیتها و روابط مربوط به مکانیزم حرکت نظری بیفکنیم. این کمیتها و روابط در جدول ۱-۳ خلاصه شده‌اند. از آنجا که تجسم کمیتهای مربوط به چرخش با مقایسه آنها در حالت حرکت خطی، آسانتر صورت می‌پذیرد، کمیتها و معادلات حرکت خطی نیز در جدول نشان داده شده است.

جدول ۱-۳

چرخش			حرکت خطی		
واحد MKS	نشانه و یا معادله	کمیت	واحد MKS	نشانه و یا معادله	کمیت
رادیان (rad)	$\theta$	جابجایی زاویه‌ای	متر (m)	s	طول
$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$J = \int r^2 dm$	گشتاور لختی	کیلوگرم (kg)	M	جرم
rad/s	$\omega = d\theta/dt$	سرعت زاویه‌ای	متر بر ثانیه (m/s)	$v = ds/dt$	سرعت
$\text{rad/s}^2$	$\alpha = d\omega/dt$	شتاب زاویه‌ای	$\text{m/s}^2$	$a = dv/dt$	شتاب
$\text{rad/s}^2$	$T = J\alpha$	گشتاور	نیوتن (N)	$a = dv/dt$	نیرو
J, or W.s	$W = \int Tdq$	کار	ژول (J)	$W = \int Fds$	کار
W	$p = dW/dt$ $= T\omega$	توان	وات (W)	$p = dW/dt$ $= Fv$	توان

### ۳-۹-۲ معادله نوسان (تاب)<sup>۱</sup>

از آنجا که معادلات و پارامترهای جدیدی را در مبنای واحد می‌خواهیم بیان کنیم مجدداً از

1. Swing Equation

بالانویس - به منظور نمایش مقادیر در مبنای واحد استفاده می‌کنیم. زمانی که عدم تعادل بین گشتاورهای اعمال شده بر روی روتور وجود داشته باشد، گشتاور خالص اعمال شده، باعث شتاب گرفتن (یا کند شدن حرکت) می‌شود. این گشتاور برابر است با:

$$T_a = T_m - T_e \quad (195-3)$$

$T_a$  : گشتاور شتاب دهنده بر حسب نیوتن متر؛

$T_m$  : گشتاور مکانیکی بر حسب نیوتن متر؛

و  $T_e$  : گشتاور الکترو مغناطیسی بر حسب نیوتن متر؛

است. در معادله فوق، برای یک ژنراتور،  $T_m$  و  $T_e$ ، مثبت و برای یک موتور، منفی است. لختی ترکیبی ژنراتور و محرک (توربین) به کمک  $T_a$ ، که عدم تعادل بین گشتاورهای اعمال شده را نشان می‌دهد، شتاب می‌گیرد. از این رو، معادله حرکت به صورت زیر است:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (196-3)$$

که:

$J$  : گشتاور لختی ترکیبی ژنراتور و توربین بر حسب  $\text{kg.m}^2$ ؛

$\omega_m$  : سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه؛

و  $t$  : زمان بر حسب ثانیه؛

است.

معادله فوق را می‌توان بر حسب ثابت لختی  $H$  در مبنای واحد، نرمالیزه کرد.  $H$  طبق تعریف برابر با انرژی جنبشی بر حسب وات - ثانیه در سرعت نامی، تقسیم بر ولت آمپر پایه است. اگر سرعت زاویه‌ای نامی را بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه با  $\omega_m$  نشان دهیم، ثابت لختی برابر است با:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_m^2}{VA_{base}} \quad (197-3)$$

گشتاور لختی  $J$  برحسب  $H$  برابر است با:

$$J = \frac{\gamma H}{\omega_m^2} VA_{base}$$

و با جایگزینی آن در معادله ۳-۱۹۶ داریم:

$$\frac{\gamma H}{\omega_m^2} VA_{base} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e$$

که در نتیجه:

$$\gamma H \frac{d}{dt} \left( \frac{\omega_m}{\omega_{\bullet m}} \right) = \frac{T_m - T_e}{VA_{base}/\omega_{\bullet m}}$$

با توجه به اینکه  $T_{base} = VA_{base} / \omega_{\bullet m}$  است، معادله حرکت، در شکل مبنای واحد به صورت زیر درخواهد آمد:

$$\gamma H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (3-198)$$

در معادله فوق،

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{\bullet m}} = \frac{\omega_r/p_f}{\omega_{\bullet}/p_f} = \frac{\omega_r}{\omega_{\bullet}}$$

که  $\omega_r$ ، سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب رادیان الکتریکی بر ثانیه؛  $\omega_{\bullet}$ ، مقدار نامی آن و  $p_f$ ، تعداد قطب تحریک است. اگر  $\delta$ ، موقعیت زاویه‌ای روتور برحسب رادیان الکتریکی نسبت به چارچوبی که با سرعت سنکرون می‌چرخد و  $\delta_{\bullet}$  مقدار آن در  $t=0$  باشد، داریم:

$$\delta = \omega_r t - \omega_{\bullet} t + \delta_{\bullet} \quad (3-199)$$

با گرفتن مشتق زمانی، خواهیم داشت:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_{\bullet} = \Delta\omega_r \quad (3-200)$$

و

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} \quad (3-201)$$

$$= \omega_{\bullet} \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_{\bullet} \frac{d(\Delta\bar{\omega}_r)}{dt}$$

با جایگزینی  $d\bar{\omega}_r/dt$  از معادله فوق در معادله ۳-۱۹۸ خواهیم داشت:

$$\frac{\gamma H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (202-3)$$

اغلب لازم است که مؤلفه‌ای از گشتاور میراکننده را که در محاسبه  $T_e$  در نظر گرفته نشده به حساب آوریم. این موضوع را می‌توان با افزودن جمله‌ای متناسب با سرعت، در معادله فوق به شکل زیر تأمین نمود:

$$\frac{\gamma H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e - K_D \Delta \bar{\omega}_r \quad (203-3)$$

از معادله ۳-۲۰۰، داریم:

$$\Delta \bar{\omega}_r = \frac{\Delta \omega_r}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \frac{d\delta}{dt}$$

معادله ۳-۲۰۳، معادله حرکت ماشین سنکرون است. اغلب از این معادله به نام معادله نوسان (تاب) یاد می‌شود زیرا که نمایشگر نوسان در زاویه روتور ( $\delta$ ) هنگام بروز اغتشاش است.

#### گشتاور لختی در مبنای واحد

با جایگزینی در معادله ۳-۲۰۳ داریم:

$$\frac{\gamma H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e - \frac{K_D}{\omega_s} \frac{d\delta}{dt} \quad (204-3)$$

$K_D$  ضریب میراکننده برحسب گشتاور مبنای واحد بر انحراف سرعت مبنای واحد است. اگر لازم باشد که از مقدار مبنای واحد زمان ( $\bar{t}$ )، استفاده کنیم، معادله ۳-۲۰۴ به صورت زیر در می‌آید:

$$\gamma H \omega_s \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e - K_D \frac{d\delta}{d\bar{t}} \quad (205-3)$$

بعضی نویسندگان (مانند مرجع ۱۹)، از  $\gamma H \omega_s$  به نام گشتاور لختی مبنای واحد  $\bar{J}$  یاد می‌کنند.

۳-۹-۳ زمان شروع حرکت مکانیکی<sup>۱</sup>

از معادله ۳-۱۹۸ داریم:

$$\frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \frac{1}{\gamma H} \bar{T}_a$$

با انتگرال گیری نسبت به زمان، خواهیم داشت:

$$\bar{\omega}_r = \frac{1}{\gamma H} \int_0^t \bar{T}_a dt \quad (3-206)$$

اگر  $T_M$  زمانی باشد که لازم است تا گشتاور نامی، روتور را از حالت سکون به سرعت نامی برساند، در این صورت از معادله ۳-۲۰۶ با  $\bar{\omega}_r = 1/0$  و  $\bar{T}_a = 1/0$  در لحظه شروع، داریم:

$$1/0 = \frac{1}{\gamma H} \int_0^{T_M} 1/0 dt = \frac{T_M}{\gamma H}$$

$$T_M = \gamma H \quad s \quad \text{بنابراین:}$$

که  $T_M$  به زمان شروع حرکت مکانیکی موسوم است. معمولاً در مقالات از  $M$  به منظور نمایش این زمان استفاده می شود.

## ۳-۹-۴ محاسبه ثابت لختی

طبق تعریف در بخش ۳-۹-۲، ثابت لختی برابر است با:

$$H = \frac{\text{انرژی ذخیره شده در سرعت نامی بر حسب مگاوات - ثانیه}}{\text{مگاوات آمپرنامی}}$$

محاسبه H در سیستم MKS با استفاده از گشتاور لختی

انرژی جنبشی = انرژی ذخیره شده

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad \text{W.s} \\ &= \frac{1}{2} J \omega_m^2 \times 10^{-6} \quad \text{MW.s} \end{aligned}$$

که:

J : گشتاور لختی بر حسب  $\text{kg.m}^2$

$\omega_m$  : سرعت نامی بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه مساوی با  $\frac{2\pi}{60}$  دور بر دقیقه است، بنابراین:

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{2} \frac{J \omega_m^2 \times 10^{-6}}{\text{MVA نامی}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{J (2\pi \text{RPM}/60)^2 \times 10^{-6}}{\text{MVA نامی}} \quad (207-3) \\ &= 5/48 \times 10^{-9} \frac{J (\text{RPM})^2}{\text{MVA نامی}} \end{aligned}$$

محاسبه H در سیستم انگلیسی از  $\text{WR}^2$

گاهی گشتاور لختی روتور بر حسب  $\text{WR}^2$  داده می شود که مساوی حاصل ضرب وزن اجرام چرخان و مربع شعاع چرخش<sup>۱</sup> است. بنابراین، گشتاور لختی بر حسب  $\text{slug.ft}^2$  مساوی  $\frac{\text{WR}^2}{32/2}$  است.

روابط زیر بین واحدهای MKS و انگلیسی در تبدیل  $\text{WR}^2$  به J، مفید است:

$$\begin{aligned} 1 \text{ m} &= 3/281 \text{ ft} \\ 1 \text{ kg} &= 2/205 \text{ lb جرم} = 0/0685 \text{ slug} \\ 1 \text{ slug.ft}^2 &= \frac{1}{0/0685 \times 3/281^2} = 1/356 \text{ kg.m}^2 \end{aligned}$$

گشتاور لختی  $J$  برحسب  $\text{kg. m}^2$  با  $WR^2$  به صورت زیر مرتبط است:

$$J = \frac{WR^2}{32/2} \times 1/356$$

با جایگزینی رابطه فوق به جای  $J$  در معادله ۳-۲۰۷ نتیجه می‌شود:

$$H = \frac{5/48 \times 10^{-9} \times 1/356 (WR^2) (RPM)^2}{\text{نامی MVA} \times 32/2}$$

$$= \frac{2/31 \times 10^{-10} (WR^2) (RPM)^2}{\text{نامی MVA}} \text{ MW.s/MVA}$$

مقادیر نمونه  $H$

جدول ۳-۲ برای واحدهای حرارتی و آبی، محدوده معمول مقدار ثابت لختی  $H$  را نشان می‌دهد. مقادیر نشان داده شده، نشانگر لختی ترکیبی ژنراتور و توربین است و برحسب مگاوات-ثانیه بر مگاوات آمپر نامی ژنراتور بیان شده‌اند.

جدول ۳-۲

H	نوع واحد تولیدی
۲/۵ به ۶/۰	واحد حرارتی (الف) ۳۶۰۰ r/min (دوقطبیه)
۴/۰ به ۱۰/۰	(ب) ۱۸۰۰ r/min (چهارقطبیه)
۴/۰ به ۲/۰	واحد آبی

مثال ۳-۵

اگر  $WR^2$  ترکیبی روتور و توربین واحد ۵۵۵ مگاوات آمپری مثالهای ۳-۱ و ۳-۲ مساوی  $1b.ft^2$  باشد، محاسبه کنید:

(الف) گشتاور لختی  $J$  برحسب  $\text{kg.m}^2$ ؛

- (ب) ثابت لختی  $H$  بر حسب  $MW.s/MVA_{base}$ ؛
- (ج) انرژی ذخیره شده در سرعت نامی بر حسب  $MW.s$ ؛
- (د) زمان شروع حرکت مکانیکی بر حسب ثانیه.

حل

(الف) با استفاده از روابط بخش ۳-۹-۴ داریم:

$$J = \frac{WR^2}{32/2} \times 1/356 = \frac{654158 \times 1/356}{32/2}$$

$$= 27547/8 \text{ kg.m}^2$$

(ب) ثابت لختی:

$$H = \frac{5/48 \times 10^{-9} J (RPM)^2}{\text{نامی MVA}}$$

$$= \frac{5/48 \times 10^{-9} \times 27547/8 \times 3600^2}{\text{نامی 555}}$$

$$= 3/525 \text{ MW.s/MVA}$$

(ج) انرژی ذخیره شده در سرعت نامی:

$$E = H \times \text{نامی MVA} = 3/525 \times 555$$

$$= 1956/4 \text{ MW.s}$$

(د) زمان شروع حرکت مکانیکی:

$$T_M = 2H = 2 \times 3/525$$

$$= 7/05 \text{ s}$$

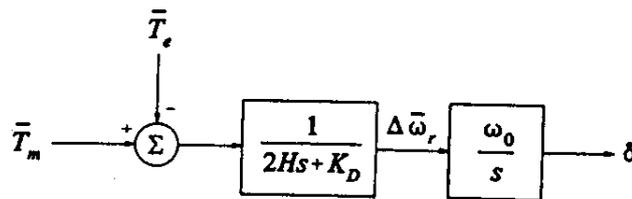
## ۳-۹-۵ نمایش اجزا در مطالعات سیستم

در بررسی عملکرد دینامیکی سیستمهای قدرت، مدل اجزا به شکل فضای حالت<sup>۱</sup> (به فصل دوازدهم، بخش ۱-۱۲ مراجعه کنید) یا به صورت نمودار بلوکی بیان می‌شود. شکل فضای حالت نیازمند آن است که مدل اجزا به صورت مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل درجه اول بیان گردد. معادلهٔ نوسان ۳-۲۰ را می‌توان به صورت دو معادلهٔ دیفرانسیل درجه اول زیر بیان نمود:

$$-\frac{d\Delta\bar{\omega}_r}{dt} = \frac{1}{2H}(\bar{T}_m - \bar{T}_e - K_D\Delta\bar{\omega}_r) \quad (3-209)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_s \Delta\bar{\omega}_r \quad (3-210)$$

در معادلات فوق،  $t$  بر حسب زمان، زاویهٔ روتور  $\delta$  بر حسب رادیان الکتریکی و  $\omega_s$  مساوی با  $2\pi f$  است. در فصول بعدی، زمانی که از معادلات فوق استفاده می‌کنیم از بالانویس -چشمپوشی می‌کنیم با این فرض که مقادیر فوق ( $\bar{T}_e$  و  $\bar{T}_m$ ،  $\Delta\bar{\omega}_r$ ) در مبنای واحد بیان شده‌اند. اما زمان ( $t$ ) را بر حسب ثانیه و  $\omega_s$  را بر حسب رادیان الکتریکی بر ثانیه استفاده می‌نماییم. نمودار بلوکی که نمایشگر معادلات ۳-۲۰۹ و ۳-۲۱۰ است در شکل ۳-۳۴ آمده است. در این شکل،  $s$ ، عملگر لاپلاس است که در معادلات ۳-۲۰۹ و ۳-۲۱۰ به جای  $d/dt$  قرار می‌گیرد. همچنان که قبلاً ذکر شد، به جای  $2H$ ، غالباً از  $M$  یا  $T_M$  استفاده می‌شود.



شکل ۳-۳۴ نمودار بلوکی با نمایش معادلات نوسان

## منابع

- [1] A. Blondel, "The Two-Reaction Method for Study of Oscillatory Phenomena in Coupled Alternators," *Revue Générale de L'Electricité*, Vol. 13, pp. 235-251, February 1923; pp. 515-531, March 1923.
- [2] R.E. Doherty and C.A. Nickle, "Synchronous Machine I and II," *AIEE Trans.*, Vol. 45, pp. 912-942, 1926.
- [3] R.H. Park, "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines - Generalized Method of Analysis - Part I," *AIEE Trans.*, Vol. 48, pp. 716-727, 1929; Part II, Vol. 52, pp. 352-355, 1933.
- [4] G. Shackshaft and P.B. Henser, "Model of Generator Saturation for Use in Power System Studies," *Proc. IEE (London)*, Vol. 126, No. 8, pp. 759-763, 1979.
- [5] EPRI Report EL-1424, "Determination of Synchronous Machine Stability Constants," Vol. 2, prepared by Ontario Hydro, December 1980.
- [6] EPRI Report EL-3359, "Improvement in Accuracy of Prediction of Electrical Machine Constants, and Generator Model for Subsynchronous Resonance Conditions," Final Report of EPRI Projects RP 1288-1 and RP, Vols. 1, 2 and 3, prepared by General Electric Company, 1984.
- [7] D.C. Macdonald, A.B.J. Reece, and P.J. Turner, "Turbine-Generator Steady-State Reactances," *Proc. IEE (London)*, Vol. 132, No. 3, pp. 101-108, 1985.
- [8] R.P. Schulz, et al., "Benefit Assessment of Finite-Element Based Generator Saturation Model," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-2, pp. 1027-1033, November 1987.
- [9] S.H. Minnich et al., "Saturation Functions for Synchronous Generators from Finite Elements," *IEEE Trans.*, Vol. EC-2, pp. 680-692, December 1987.
- [10] C. Concordia, *Synchronous Machines*. John Wiley & Sons, 1951.
- [11] E.W. Kimbark, *Power System Stability, Vol. III: Synchronous Machines*. John Wiley & Sons, 1956.
- [12] A.E. Fitzgerald and C. Kingsley, *Electric Machinery*, Second Edition, McGraw-Hill, 1961.

- [13] B. Adkins, *The General Theory of Electrical Machines*, Chapman and Hall, 1964.
- [14] G.R. Slemon, *Magnetolectric Devices*, John Wiley & Sons, 1966.
- [15] ANSI/IEEE Standard 100-1977, *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*.
- [16] IEEE Committee Report, "Recommended Phasor Diagram for Synchronous Machines," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-88, pp. 1593-1610, 1969.
- [17] P.M. Anderson and A.A Fouad, *Power System Control and Stability*, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [18] A.W. Rankin, "Per-Unit Impedances of Synchronous Machines," *AIEE Trans.*, Vol. 64, Part I, pp. 569-573, August 1945; Part II, pp. 839-845, December 1945.
- [19] M.R. Harris, P.J. Lawrenson, and J.M. Stephenson, "Per-Unit Systems with Special Reference to Electric Machines," IEE Monograph, Cambridge University Press, 1970.
- [20] W.A. Lewis, "A Basic Analysis of Synchronous Machine - Part I," *AIEE Trans.*, Vol. 77, pp. 436-456, 1958.
- [21] I.M. Canay, "Causes of Discrepancies on Calculation of Rotor Quantities and Exact Equivalent Diagram of Synchronous Machines," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-88, pp. 1114-1120, July 1969.
- [22] E.F. Fuchs and E.A. Erdelyi, "Non-linear Theory of Turbine-Alternators," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-91, pp. 583-599, 1972.
- [23] El-Serafi et al., "Experimental Study of the Saturation and the Cross-Magnetizing Phenomenon in Saturated Synchronous Machines," *IEEE Trans.*, Vol. EC-3, pp. 815-823, 1988.
- [24] I.M. Canay, "Extended Synchronous Machine Model for the Calculation of Transient Processes and Stability," *Electrical Machines & Electromechanics*, Vol. 1, pp. 137-150, 1977.





## فصل چهارم

### پارامترهای ماشین سنکرون

در معادلات ماشین سنکرون در فصل سوم، اندوکتانسها و مقاومتهای مدارهای استاتور و روتور به صورت پارامتر ظاهر شدند. این پارامترها موسوم به پارامترهای اصلی یا اساسی ماشین هستند و به صورت اجزای مدارهای معادل دو محور  $d$  و  $q$  در شکل ۳-۱۸، قابل تشخیص هستند. هرچند که این پارامترها به طور کامل مشخصه‌های الکتریکی ماشین را بیان می‌کنند، اما آنها را نمی‌توان از عکس‌العملهای قابل اندازه‌گیری ماشین به دست آورد. از این رو، روش سنتی در تعیین اطلاعات ماشین این است که آنها را بر حسب پارامترهایی بیان کنیم که از رفتار قابل مشاهده ماشین در پایانه‌های آن و در تحت حالت‌های مناسب آزمایش، قابل اندازه‌گیری هستند. در این فصل، این پارامترهای قابل اندازه‌گیری و ارتباط آنها را پارامترهای اساسی ماشین، بیان خواهیم کرد.

#### ۴-۱ پارامترهای عملیاتی<sup>۱</sup>

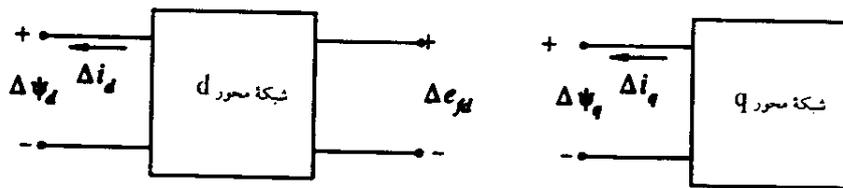
روش مناسبی در تعیین مشخصه‌الکتریکی ماشین بر حسب پارامترهای عملیاتی آن که کمیتهای آرمیچر و تحریک را به هم مربوط می‌سازد، قابل بیان است. با مراجعه به شکل ۴-۱ ارتباط بین تغییرات در مقادیر کمیتهای پایانه ماشین را می‌توان به صورت عملیاتی زیر بیان نمود:

---

1. Operational Parameters

$$\Delta \Psi_d(s) = G(s)\Delta e_{fd}(s) - L_d(s)\Delta i_d(s) \quad (1-4)$$

$$\Delta \Psi_d(s) = -L_q(s)\Delta i_q(s) \quad (2-4)$$



شکل ۱-۴ شبکه‌های محور و d ، q نمایانگر کمیت‌های پایانه

که:

$G(s)$  : تابع تبدیل استاتور به تحریک ؛

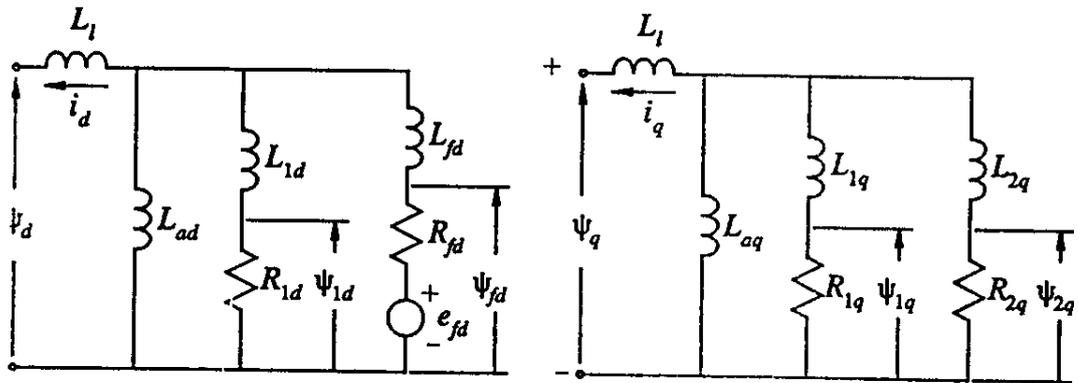
$L_d(s)$  : اندوکتانس عملیاتی محور d ؛

و  $L_q(s)$  : اندوکتانس عملیاتی محور q

است. در مطالعات فوق، s عملگر لاپلاس و پیشوند  $\Delta$  نشان‌دهنده تغییرات مقادیر است. معادلات ۱-۴ و ۲-۴ برای هر تعداد مدار روتور صدق می‌کنند. در حقیقت، پارک در مقاله اولیه خود [۱] معادلات شار استاتور را بدون مشخص کردن تعداد مدارهای روتور، بیان نمود. در شکل عملیاتی معادلات، روتور را می‌توان به صورت سیستمی با پارامترهای گسترده محسوب کرد. پارامترهای عملیاتی را می‌توان از طریق محاسبات طراحی، یا آسانتر از طریق آزمایشهای پاسخ فرکانسی به دست آورد.

زمانی که تعداد محدودی مدار برای روتور فرض شود، می‌توان پارامترهای عملیاتی را به صورت نسبت دو چند جمله‌ای بر حسب s، بیان نمود. درجه چند جمله‌ایهای صورت و مخرج مربوط به  $L_d(s)$  و  $L_q(s)$  برابر با تعداد مدار فرض شده برای روتور در محورهای مربوطه است.  $G(s)$  دارای مخرجی مشابه مخرج  $L_d(s)$  است اما صورت آن یک درجه کمتر از درجه مخرج است.

در این مقطع، هدف آن است که پارامترهای عملیاتی مدل نشان داده شده در مدارهای معادل شکل ۲-۴ را به دست آوریم. این مدل معمولاً برای مطالعات پایداری کفایت می‌کند و در برنامه‌های پایداری سیستم‌های بسیار بزرگ قدرت استفاده می‌شود. مشخصه‌های روتور، به کمک سیم‌پیچ تحریک و یک سیم‌پیچ میراکننده در محور طولی و دو سیم‌پیچ میراکننده در محور عرضی بیان شده است. فرض می‌شود اندوکتانسهای متقابل  $L_{fd}$  و  $L_{ad}$  مساوی هستند.



شکل ۲-۴ ساختار مدل مرسوم

این موضوع باعث می‌شود که تمام اندوکتانسهای متقابل محور  $d$ ، مساوی شوند. در بخش آینده، تأثیر چشمپوشی از این فرض را بیان خواهیم کرد. با تساوی اندوکتانسهای متقابل، معادلات شاررور محور  $d$  (معادلات ۳-۳، ۳-۳، ۳-۳ و ۳-۳) در شکل عملیاتی به صورت زیر است:

$$\Psi_d(s) = -L_d i_d(s) + L_{ad} i_{fd}(s) + L_{ad} i_{1d}(s) \quad (۳-۴)$$

$$\Psi_{fd}(s) = -L_{ad} i_d(s) + L_{ffd} i_{fd}(s) + L_{ad} i_{1d}(s) \quad (۴-۴)$$

$$\Psi_{1d}(s) = -L_{ad} i_d(s) + L_{ad} i_{fd}(s) + L_{11d} i_{1d}(s) \quad (۵-۴)$$

شکل عملیاتی معادلات ۳-۳ و ۳-۳ مربوط به ولتاژهای روتور به صورت زیر

خواهد بود:

$$e_{fd}(s) = s\Psi_{fd}(s) - \Psi_{fd}(0) + R_{fd} \dot{i}_{fd}(s) \quad (6-4)$$

$$0 = s\Psi_{fd}(s) - \Psi_{fd}(0) + R_{fd} \dot{i}_{fd}(s) \quad (7-4)$$

که  $\Psi_{fd}(0)$ ،  $\Psi_{fd}(s)$  و  $\Psi_{fd}(0)$  مقادیر اولیه شار دورها را نشان می‌دهند. به منظور تسهیل در انجام عملیات ریاضی در معادلات عملیاتی، بهتر است معادلات فوق را بر حسب تغییرات مقادیر حول نقطه کار اولیه بیان نمود تا مقادیر اولیه حذف شوند. با جایگزینی به جای تغییرات شار دور بر حسب تغییرات جریان، معادلات تغییرات ولتاژ ژنراتور به صورت زیر در می‌آید:

$$\Delta e_{fd}(s) = s \Delta \Psi_{fd}(s) + R_{fd} \Delta \dot{i}_{fd}(s) \quad (8-4)$$

$$= -sL_{ad} \Delta \dot{i}_d(s) + (R_{fd} + sL_{ffd}) \Delta \dot{i}_{fd}(s) + sL_{ad} \Delta \dot{i}_{fd}(s)$$

$$0 = s \Delta \Psi_{fd}(s) + R_{fd} \Delta \dot{i}_{fd}(s) \quad (9-4)$$

$$= -sL_{ad} \Delta \dot{i}_d(s) + sL_{ad} \Delta \dot{i}_{fd}(s) + (R_{fd} + sL_{ffd}) \Delta \dot{i}_{fd}(s)$$

هدف این است که معادلات محور طولی را به شکل معادله ۴-۱ در آوریم. انجام این کار با حذف جریانهای روتور که بر حسب کمیت‌های پایانه  $e_{fd}$  و  $\dot{i}_d$  قابل بیان هستند، میسر است. از این رو، از حل معادلات ۴-۸ و ۴-۹ نتیجه می‌شود:

$$\Delta \dot{i}_{fd}(s) = \frac{1}{D(s)} \left[ (R_{fd} + sL_{ffd}) \Delta e_{fd}(s) + sL_{ad} (R_{fd} + sL_{ffd}) \Delta \dot{i}_d(s) \right] \quad (10-4)$$

$$\Delta \dot{i}_d(s) = \frac{1}{D(s)} \left[ -sL_{ad} \Delta e_{fd}(s) + sL_{ad} (R_{fd} + sL_{ffd}) \Delta \dot{i}_d(s) \right] \quad (11-4)$$

که:

$$D(s) = s^2 (L_{ffd} L_{ad} - L_{ad}^2) + s(L_{ffd} R_{fd} + L_{ffd} R_{fd}) + R_{fd} R_{fd} \quad (12-4)$$

با این فرض که:

$$L_d = L_{ad} + L_l$$

$$L_{ffd} = L_{ad} + L_{fd}$$

$$L_{ffd} = L_{ad} + L_{fd}$$

با جایگزینی معادلات ۴-۱۰ و ۴-۱۱ در معادله ۴-۳، رابطه مطلوب بین کمیت‌های محور طولی به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$\Delta\Psi_d(s) = G(s)\Delta e_{fd}(s) - L_d(s)\Delta i_d(s)$$

معادلات مربوط به پارامترهای عملیاتی محور طولی به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$L_d(s) = L_d \frac{1 + (T_r + T_\delta)s + T_r T_f s^2}{1 + (T_1 + T_r)s + T_1 T_r s^2} \quad (13-4)$$

$$G(s) = G_0 \frac{(1 + sT_{kd})}{1 + (T_1 + T_r)s + T_1 T_r s^2} \quad (14-4)$$

که:

$$G_0 = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} \quad T_{kd} = \frac{L_{1d}}{R_{1d}}$$

$$T_1 = \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}} \quad T_r = \frac{L_{ad} + L_{1d}}{R_{1d}} \quad (15-4)$$

$$T_r = \frac{1}{R_{1d}} \left[ L_{1d} + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right] \quad T_f = \frac{1}{R_{fd}} \left[ L_{fd} + \frac{L_{ad} L_1}{L_{ad} + L_1} \right]$$

$$T_\delta = \frac{1}{R_{1d}} \left[ L_{1d} + \frac{L_{ad} L_1}{L_{ad} + L_1} \right] \quad T_f = \frac{1}{R_{1d}} \left[ L_{1d} + \frac{L_{ad} L_{fd} L_1}{L_{ad} L_1 + L_{ad} L_{fd} + L_{fd} L_1} \right]$$

معادلات ۱۳-۴ و ۱۴-۴ را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \quad (16-4)$$

$$G(s) = G_0 \frac{(1 + sT_{kd})}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \quad (17-4)$$

عبارت مربوط به اندوکتانس عملیاتی محور q را می‌توان با توجه به تشابه بین مدارهای طولی و عرضی، به صورت زیر نوشت:

$$L_q(s) = L_q \frac{(1 + sT'_q)(1 + sT''_q)}{(1 + sT'_{q0})(1 + sT''_{q0})} \quad (18-4)$$

همچنان که در بخش آینده خواهیم دید، ثابتهای زمانی عبارات  $L_h(s)$ ،  $L_q(s)$  و  $G(s)$  در معادلات ۴-۱۶ تا ۴-۱۸، پارامترهای مهم ماشینهای سنکرون هستند.

#### ۴-۲ پارامترهای استاندارد

به دنبال بروز اغتشاش، جریانهایی در مدارهای روتور ماشین، القا می‌شود. همچنان که در بخش ۳-۷ مشاهده شد، برای اغتشاش اتصال کوتاه، بعضی از این جریانهایی القا شده نسبت به دیگر جریانهایی سریعتر میرا می‌شوند. پارامترهایی از ماشین که به مؤلفه‌های سریع میرا شونده تأثیر می‌گذارند به پارامترهای زیرگذرا<sup>۱</sup> و آنهایی که بر مؤلفه‌های کند میرا شونده تأثیر می‌گذارند به پارامترهای گذرا<sup>۲</sup> موسومند.

مشخصه‌های مورد توجه ماشین سنکرون شامل اندوکتانسهای (یا راکتانسهای) مؤثر آن از دیدگاه پایانه‌های ماشین و مربوط به جریانهایی فرکانس اصلی در حالت ماندگار، گذرا و زیرگذراست. علاوه بر این اندوکتانسها، ثابتهای زمانی مربوطه که میزان میرایی جریانهایی و لذا آنها را مشخص می‌کنند، پارامترهای استاندارد ماشین را تشکیل می‌دهند که جمعاً مشخصه‌های الکتریکی را تعیین می‌نمایند. همچنان که نشان خواهیم داد، این پارامترهای استاندارد را می‌توان از معادلات مربوط به پارامترهای عملیاتی  $L_h(s)$ ،  $G(s)$  و  $L_q(s)$  به دست آورد.

ثابتهای زمانی اصلی محور طولی، شامل  $T'_d$ ،  $T''_d$ ،  $T'_e$  و  $T''_e$  است. رابطه آنها را با پارامترهای اصلی می‌توان با مساوی قرار دادن صورت و مخرج کسرها در معادلات ۴-۱۳ و ۴-۱۶ به دست آورد. بنابراین:

$$(1+sT'_e)(1+sT''_e) = 1+s(T_1+T_2)+s^2(T_1T_2) \quad (19-4)$$

$$(1+sT'_d)(1+sT''_d) = 1+s(T_3+T_4)+s^2(T_3T_4) \quad (20-4)$$

روابط دقیق چهار ثابت زمانی فوق را می‌توان با حل معادلات بالا به دست آورد. اما نتایج

حاصل، بسیار پیچیده خواهد بود. با استفاده از تقریبهای معقول، می توان به عبارات ساده تری دست یافت.

#### پارامترها بر اساس تعاریف کلاسیک

با توجه به اینکه مقدار  $R_{fd}$  بسیار بزرگتر از  $R_{fd}$  است می توان حل معادلات ۴-۱۹ و ۴-۲۰ را تا حد زیادی ساده کرد. این موضوع باعث می شود  $T_p$  و  $T_r$  از  $T_1$  و  $T_2$  بسیار کوچکتر و  $T_p$  از  $T_r$  بسیار کوچکتر شود. در نتیجه:

$$(1+sT'_{d.})(1+sT''_{d.}) \approx (1+sT_1)(1+sT_r) \quad (21-4)$$

$$(1+sT'_d)(1+sT''_d) \approx (1+sT_r)(1+sT_p) \quad (22-4)$$

بنابراین روابط تقریبی زیر به دست می آیند:

$$T'_{d.} \approx T_1$$

$$T''_{d.} \approx T_r$$

$$T'_d \approx T_r$$

$$T''_d \approx T_p$$

(۲۳-۴)

معادله ۴-۱۵ روابط  $T_1$  تا  $T_p$  را بر حسب پارامترهای اصلی نشان می دهد. این ثابتهای زمانی بر حسب مبنای واحد (رادیان) هستند. اگر مقادیر آنها را بر حسب ثانیه بخواهیم، باید آنها را بر فرکانس زاویه ای نامی ( $\omega_s = 2\pi f$ ) تقسیم کرد. باید اشاره کرد که در یک سیستم ۶۰ Hz،  $\omega_s = 377/99 \approx 377$  رادیان بر ثانیه است.

زمانی که پایانه های استاتور باز باشد ( $\Delta i_d = 0$ )، از معادلات ۴-۱ و ۴-۱۷ داریم:

$$\Delta \Psi_d(s) = G \frac{1+sT_{kd}}{(1+sT'_{d.})(1+sT''_{d.})} \Delta e_{fd} \quad (24-4)$$

عبارت فوق نشان می دهد که در حالت مدار باز، شار محور طولی استاتور (و در نتیجه ولتاژ نامی)، در مقابل تغییری در ولتاژ تحریک، با ثابتهای زمانی  $T'_{d.}$  و  $T''_{d.}$ ، از خود عکس العمل نشان می دهد. از آنجا که  $R_{fd} \gg R_{fd}$ ، است،  $T'_{d.}$  از  $T''_{d.}$  بسیار کوچکتر خواهد بود. بنابراین

$T_d''$  مربوط به تغییر اولیه است و به ثابت زمانی زیرگذرای مدار باز<sup>۱</sup> موسوم است.  $T_d'$  نمایشگر تغییرات کند دوره گذرا است و به ثابت زمانی گذرای مدار باز<sup>۲</sup> موسوم است. ثابتهای زمانی  $T_d''$  و  $T_d'$  به ترتیب به ثابت زمانی گذرای اتصال کوتاه<sup>۳</sup> و ثابت زمانی زیرگذرای اتصال کوتاه<sup>۴</sup> موسومند.

اکنون مقادیر مؤثر  $L_d(s)$  را در سه دوره ماندگار، گذرا و زیرگذرا مورد بررسی قرار می‌دهیم. در حالت ماندگار، در معادله ۴-۱۶،  $s=0$  است، در نتیجه،

$$L_d(0) = L_d \quad (25-4)$$

که  $L_d$ ، اندوکتانس سنکرون محور طولی است. در دوره زیرگذرا،  $s$  به سمت بینهایت میل می‌کند. در نتیجه مقدار حدی  $L_d(s)$  به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} L_d'' &= L_d(\infty) \\ &= L_d \left[ \frac{T_d' T_d''}{T_d' T_d''} \right] \end{aligned} \quad (26-4)$$

رابطه فوق اندوکتانس مؤثر  $\Delta \psi_d / \Delta i_d$  را بلافاصله پس از وقوع تغییری شدید نشان می‌دهد و به راکتانس زیرگذرای<sup>۵</sup> محور طولی موسوم است. در حالتی که سیم‌پیچ میراکننده وجود نداشته باشد، مقدار حدی اندوکتانس برابر است با:

$$\begin{aligned} L_d' &= L_d(\infty) \\ &= L_d \left[ \frac{T_d'}{T_d'} \right] \end{aligned} \quad (27-4)$$

1. Open – circuit Subtransient Time Constant
2. Open – circuit Transient Time Constant
3. Short – circuit Transient Time Constant
4. Short – circuit Subtransient Time Constant
5. Subtransient Reactance

که به راکتانس گذرای<sup>۱</sup> محور طولی موسوم است. با جایگزینی عبارات مربوط به ثابتهای زمانی از معادلات ۴-۱۵ و ۴-۲۳ در معادلات ۴-۲۶ و ۴-۲۷، روابط جایگزین زیر جهت  $L'_d$  و  $L''_d$  بر حسب اندوکتانسهای نشتی و متقابل به دست می‌آید:

$$L''_d = L_1 + \frac{L_{ad} L_{fd} L_{1d}}{L_{ad} L_{fd} + L_{ad} L_{1d} + L_{fd} L_{1d}} \quad (28-4)$$

و:

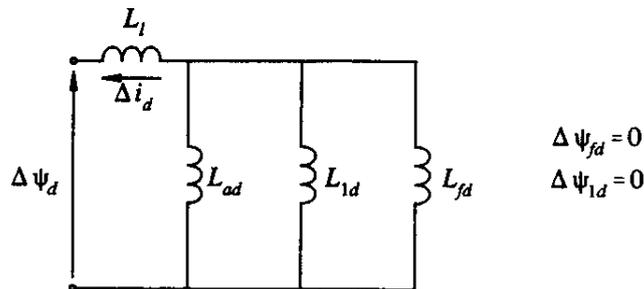
$$L'_d = L_1 + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \quad (29-4)$$

روابط مربوط به اندوکتانسهای گذرا و زیرگذرا را نیز می‌توان با استفاده از اصل ثابت ماندن شاردها به دست آورد که بیان می‌کند که شاردهای یک مدار القایی با یک مقاومت و نیروی محرکه الکتریکی محدود، نمی‌تواند لحظه‌ای تغییر نماید. از این رو، به دنبال بروز اغتشاش، شاردهای روتور به طور لحظه‌ای تغییر نمی‌کند. بلافاصله پس از بروز اغتشاش، با مساوی صفر قرار دادن تغییرات شاردهای روتور ( $\Delta\psi_{fd}$  و  $\Delta\psi_{1d}$ ) در شکل ۳-۱۷، مدار معادلی مطابق با شکل ۴-۳ به دست می‌آید. از روی این شکل متوجه می‌شویم که اندوکتانس مؤثر  $\Delta\psi_d/\Delta i_d$  ( $L''_d$ ) همان مقداری است که از معادله ۴-۲۸ به دست می‌آید. زمانی که سیم‌پیچ میراکنده وجود نداشته باشد ( $L_{1d}=\infty$ )، اندوکتانس مؤثر مساوی مقدار  $L'_d$  از معادله ۴-۲۹ خواهد شد.

با توجه به تشابه مدارهای دو محور  $d$  و  $q$  معادلات مربوط به پارامترهای  $q$  را می‌توان بسهولت نوشت. از این رو، ثابتهای زمانی گذرا و زیرگذرای مدار باز محور  $q$  از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$T'_{q0} = \frac{L_{aq} + L_{1q}}{R_{1q}} \quad (30-4)$$

$$T_{q0}'' = \frac{1}{R_{\tau q}} \left[ L_{\tau q} + \frac{L_{aq} L_{1q}}{L_{aq} + L_{1q}} \right] \quad (31-4)$$



شکل ۳-۴ مدار معادل برای مقادیر افزایشی، بلافاصله پس از بروز اغتشاش

و اندوکتانسهای گذرا و زیرگذرا از دو رابطه زیر قابل محاسبه هستند:

$$L_q'' = L_1 + \frac{L_{aq} L_{1q} L_{\tau q}}{L_{aq} L_{1q} + L_{aq} L_{\tau q} + L_{1q} L_{\tau q}} \quad (32-4)$$

$$L_q' = L_1 + \frac{L_{aq} L_{1q}}{L_{aq} + L_{1q}} \quad (33-4)$$

مشاهده می شود که اندوکتانس سنکرون محور  $q$  ( $L_q$ )، مساوی مقدار  $L_q(s)$  در حالت ماندگار است.

روابط به دست آمده برای پارامترهای استاندارد ماشین با این فرض بود که در دوره زیرگذرا،  $R_{fd} = R_{1q} = 0$  و در دوره گذرا  $R_{fd} = R_{\tau q} = \infty$  است. این فرضیات در نظریه کلاسیک ماشینهای سنکرون استفاده می شود [۳ و ۲]. در سالهای اخیر نگرانیهایی در این مورد پیش آمده که استفاده از فرضیات فوق ممکن است منجر به خطای زیادی در مقادیر پارامترها نسبت به مقادیری شود که از طریق آزمایشهایی نظیر آنچه در استاندارد شماره ۱۹۸۳ - ۱۱۵ مؤسسه

IEEE بیان شده، به دست می‌آیند. از این رو عبارت دقیقتری را جهت پارامترهای استاندارد، بیان می‌کنیم.

عبارات دقیق پارامترهای استاندارد

مقادیر دقیق  $T_{d0}'$  و  $T_{d0}''$  مساوی قطبهای  $L_d(s)$  و مقادیر دقیق  $T_d'$  و  $T_d''$  مساوی صفراهای آن است. به عبارت دیگر لازم است که حل دقیق معادلات ۴-۱۹ و ۴-۲۰ به دست آید. از معادله ۴-۱۹، قطبهای  $L_d(s)$  به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$s^2 + \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} s + \frac{1}{T_1 T_2} = 0 \quad (4-34)$$

از آنجا که حل دقیق این معادله، بسیار مشکل و پیچیده است با توجه به اینکه  $4T_1 T_2$  بسیار کوچکتر از  $(T_1 + T_2)^2$  است، بدون تأثیر زیاد بر دقت، می‌توان ریشه‌های معادله ۴-۳۴ را به صورت زیر به دست آورد:

$$s_1 = -\frac{1}{T_1 + T_2}$$

$$s_2 = -\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}$$

ثابت‌های زمانی مدار باز مساوی با قرینه عکس ریشه‌هاست یعنی:

$$T_{d0}' = T_1 + T_2 \quad (4-35)$$

$$T_{d0}'' = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \quad (4-36)$$

به طور مشابه، ریشه‌های صورت  $L_d(s)$  به صورت زیر است:

$$T_d' = T_2 + T_d \quad (4-37)$$

$$T_d'' = \frac{T_2 T_d}{T_2 + T_d} \quad (4-38)$$

با جایگزینی ثابتهای زمانی فوق در معادلات ۴-۲۶ و ۴-۲۷، اندوکتانسهای گذرا و زیرگذرا به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$L'_d = L_d \frac{T_r + T_d}{T_1 + T_r} \quad (۳۹-۴)$$

$$L''_d = L_d \frac{T_r T_f}{T_1 T_r} \quad (۴۰-۴)$$

نتایج روشهای دقیق و تقریبی (کلاسیک) پارامترهای استاندارد در جدول ۴-۱ خلاصه شده است. این نتایج برای مدلی از ماشین سنکرون مطابق با شکل ۴-۲ است که در هر محور روتور، دو مدار در نظر گرفته شده و اندوکتانسهای متقابل نیز با هم مساوی فرض شده است. باید توجه کرد که اغلب برنامه‌های مربوط به مطالعات پایداری بر این فرض استوار است که اطلاعات ورودی بر حسب پارامترهای گذرا و زیرگذرا، بر اساس مدل حالت کلاسیک است. با وجود این، داده‌هایی که از طرف بعضی از سازندگان ژنراتور داده می‌شود یا به کمک آزمایشهای استاندارد به دست می‌آید، بر اساس مقادیر دقیق این پارامترهاست. از این رو ممکن است تناقضهایی در مورد تعریف و استفاده از پارامترهای استاندارد وجود داشته باشد. همچنان که در مثال ۴-۱ خواهیم دید، تفاوت بین مقادیر دقیق و تقریبی بیشتر در مورد پارامترهای محور  $q$ ، خودنمایی می‌کند. در این کتاب اگر ذکری به میان نیاید، روش کلاسیک مد نظر است.

جدول ۴-۱ روابط پارامترهای استاندارد ماشین سنکرون

پارامتر	عبارت کلاسیک	عبارت دقیق
$T'_{do}$	$T_1$	$T_1 + T_r$
$T'_d$	$T_r$	$T_r + T_\delta$
$T''_d$	$T_r$	$T_r [T_1 / (T_1 + T_r)]$
$T''_d$	$T_\delta$	$T_\delta [T_r / (T_r + T_\delta)]$
$L'_d$	$L_d (T_r / T_1)$	$L_d (T_r + T_\delta) / (T_1 + T_r)$
$L''_d$	$L_d (T_r T_\delta) / (T_1 T_r)$	$L_d (T_r T_\delta) / (T_1 T_r)$

که

$$T_1 = \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}} \qquad T_r = \frac{L_{ad} + L_{ld}}{R_{ld}}$$

$$T_r = \frac{1}{R_{ld}} \left[ L_{ld} + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right] \qquad T_r = \frac{1}{R_{fd}} \left[ L_{fd} + \frac{L_{ad} L_1}{L_{ad} + L_1} \right]$$

$$T_\delta = \frac{1}{R_{ld}} \left[ L_{ld} + \frac{L_{ad} L_1}{L_{ad} + L_1} \right] \qquad T_\delta = \frac{1}{R_{ld}} \left[ L_{ld} + \frac{L_{ad} L_1 L_{fd}}{L_{ad} L_1 + L_{ad} L_{fd} + L_{fd} L_1} \right]$$

توجه: ۱. عبارتهای مشابهی در مورد پارامترهای محور  $q$  صادق است.

۲. تمام پارامترها در مبنای واحد بیان شده‌اند.

۳. ثابتهای زمانی برحسب ثانیه، با تقسیم مقادیر در مبنای واحد مذکور در جدول بر  $\omega_s = 2\pi f$  به

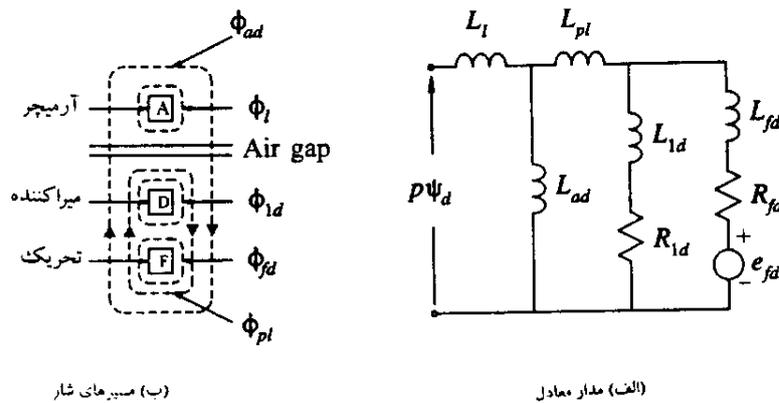
دست می‌آیند.

۴. تمام اندوکتانسهای محور  $d$ ، مساوی فرض شده‌اند.

#### پارامترهای ماشین با توجه به عدم تساوی تأثیر القای متقابل

در به دست آوردن پارامترهای استاندارد، فرض شد که اندوکتانسهای متقابل محور  $d$  با هم مساوی هستند. سیستم متقابل مبنای واحد مورد استفاده، موجب تساوی اندوکتانسهای بین آرمیچر و تحریک و بین آرمیچر و سیم‌پیچ میراکننده شد. اما اندوکتانس متقابل بین تحریک و سیم‌پیچ میراکننده می‌تواند با این اندوکتانسهای متقابل، متفاوت باشد. هرچند که این فرض،

نتایج خوبی را در محاسبه کمیت‌های آرمیچر ارائه می‌دهد، ممکن است به خطای چشمگیری در محاسبه جریان تحریک در حالت گذرا منجر شود [۶]. مدار معادل محور طولی با در نظر گرفتن تأثیر متقابل و شارهای گوناگون متقابل و نشی در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



(ب) مسیرهای شار

(الف) مدار معادل

شکل ۴-۴ تأثیر متقابل نامساوی در محور d

اندوکتانس سری  $L_{pl} = L_{f1d} - L_{ad}$  مربوط به شار پیرامونی نشی ( $\phi_{pl}$ ) است که سیم پیچ تحریک و میراکننده و نه آرمیچر را به هم مربوط می‌سازد. با توجه به روشی که قبلاً استفاده شد و با این فرض که در دوره زیرگذرا،  $R_{fd} = 0$  و در دوره گذرا،  $R_{1d} = \infty$  است، از مدار معادل، روابط ذیل برای پارامترهای استاندارد ماشین به دست می‌آیند:

$$L_d = L_{ad} + L_l$$

$$L'_d = L_l + \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd} + L_{pl}}} = L_l + \frac{L_{ad}(L_{fd} + L_{pl})}{L_{ad} + L_{fd} + L_{pl}}$$

$$L''_d = L_l + \frac{L_{1d}L_{fd}L_{ad} + L_{1d}L_{pl}L_{ad} + L_{ad}L_{fd}L_{pl}}{L_{ad}L_{fd} + L_{ad}L_{1d} + L_{1d}L_{fd} + L_{1d}L_{pl} + L_{fd}L_{pl}}$$

$$T_{d0}' = \frac{L_{ad} + L_{fd} + L_{pl}}{R_{fd}} \quad (41-4)$$

$$T_{d0}'' = \frac{1}{R_{fd}} \left[ L_{fd} + \frac{L_{fd}(L_{ad} + L_{pl})}{L_{pl} + L_{fd} + L_{ad}} \right]$$

$$T_d' = \frac{1}{R_{fd}} \left[ L_{fd} L_{pl} + \frac{L_{ad} L_1}{L_{ad} + L_1} \right]$$

$$T_d'' = \frac{1}{R_{fd}} \left[ L_{fd} + \frac{L_{ad} L_{pl} L_{fd} + L_1 L_{fd} L_{ad} + L_1 L_{fd} L_{pl}}{L_{fd} L_{ad} + L_{fd} L_1 + L_{pl} L_1 + L_{ad} L_1} \right]$$

عبارات فوق بر اساس تقریبهایی است که در مورد پارامترها در روش کلاسیک فرض شد. عبارات دقیق مدل پیچیده‌تری که شامل این مدارهای روتور در هر محور باشد و عدم تساوی بین اندوکتانسهای متقابل محور طولی را نیز در نظر بگیرد، در مرجع ۷ آمده است.

#### پارامترهای ماشین سنکرون قطب برجسته

تاکنون در به دست آوردن پارامترهای استاندارد، دو مدار بر روی هر محور روتور فرض شد. این موضوع در مورد ماشینهای سنکرون روتور استوانه‌ای صادق است اما برای ماشینهای سنکرون قطب برجسته فقط یک سیم‌پیچ میراکننده بر روی محور  $q$  وجود دارد. از این رو می‌توان فقط یک سیم‌پیچ میراکننده را (به نام  $1q$ ) در نظر گرفت. پارامترهای این مدار روتور به گونه‌ای است که نمایشگر تأثیر زیرگذرای سریعاً میرا شونده است. از مدار دوم روتور (به نام  $2q$ ) چشمپوشی می‌کنیم و تفاوتی را بین حالت‌های گذرا و ماندگار قائل نمی‌شویم. از این رو، عبارات مربوط به پارامترهای محور  $q$  ماشین سنکرون قطب برجسته به صورت زیر است:

$$L_q = L_1 + L_{aq}$$

$$L_q'' = L_1 + \frac{L_{aq} L_{1q}}{L_{aq} + L_{1q}} \quad (42-4)$$

$$T_{q0}'' = \frac{L_{aq} + L_{1q}}{R_{1q}}$$

در این حالت پارامترهای  $L'_q$  و  $T'_{q0}$  مطرح نیستند. در محور  $d$ ، مناسب است که دو مدار روتور (یک تحریک و دیگری میراکننده) را در نظر گرفت. از این رو، روابط به دست آمده قبلی در مورد ماشین سنکرون قطب برجسته هم صادق است.

### راکتانسها

در سیستم مبنای واحد، مقادیر راکتانسهای زیرگذرا، گذرا و سنکرون با اندوکتانسهای مربوطه مساوی است. اما معمول است که پارامترهای ماشین سنکرون را بر حسب راکتانسها (و نه اندوکتانسها) بیان نمایند.

### مقادیر نمونه پارامترهای استاندارد

جدول ۴-۲، محدوده مقادیر نمونه پارامترهای ژنراتور سنکرون را نشان می دهد. با توجه به عبارات جدول ۴-۱، به آسانی مشخص می شود که:

$$X_d \geq X_q > X'_q \geq X'_d > X''_q \geq X''_d \quad (۴۳-۴)$$

$$T'_{d0} > T'_d > T''_{d0} > T''_d > T_{kd} \quad (۴۴-۴)$$

$$T'_{q0} > T'_q > T''_{q0} > T''_q \quad (۴۵-۴)$$

جدول ۲-۴

واحد‌های حرارتی	واحد‌های آبی	پارامتر	
۱/۰-۲/۳	۰/۶-۱/۵	$X_d$	راکتانس
۱/۰-۲/۳	۰/۴-۱/۰	$X_q$	سنکرون
۰/۱۵-۰/۴	۰/۲-۰/۵	$X'_d$	راکتانس
۰/۳-۱/۰	-	$X'_q$	گذرا
۰/۱۲-۰/۲۵	۰/۱۵-۰/۳۵	$X''_d$	راکتانس
۰/۱۲-۰/۲۵	۰/۲-۰/۴۵	$X''_q$	زیرگذرا
۳/۰-۱۰/۰ s	۱/۵-۹/۰ s	$T'_{d0}$	ثابت زمانی
۰/۵-۲/۰ s	-	$T''_{d0}$	گذرای مدار باز
۰/۰۲-۰/۰۵ s	۰/۰۱-۰/۰۵ s	$T'_{q0}$	ثابت زمانی
۰/۰۲-۰/۰۵ s	۰/۰۱-۰/۰۹ s	$T''_{q0}$	زیرگذرای مدار باز
۰/۱-۰/۲	۰/۱-۰/۲	$X_f$	اندوکتانس نشتی استاتور
۰/۰۰۱۲-۰/۰۰۵	۰/۰۰۲-۰/۰۲	$R_a$	مقاومت استاتور

توجه: ۱. مقادیر راکتانس برحسب مبنای واحد و بر پایه تساوی مقادیر استاتور با مقادیر متناظر نامی ماشین بیان شده است.

۲. ثابت‌های زمانی برحسب ثانیه هستند.

## مثال ۱-۴

مقادیر در مبنای واحد پارامترهای استاندارد توربوژنراتور مثالهای فصل ۳ (واحد ۵۵۵ مگاوات آمپری، ۶۰ هرتز و ضریب توان ۰/۹) به این صورت است:

$$\begin{aligned}
 L_d &= 1/81 & L_q &= 1/76 & L_f &= 0/15 & R_a &= 0/0.3 \\
 L'_d &= 0/3 & L'_q &= 0/65 & L''_d &= 0/23 & L''_q &= 0/25 \\
 T'_{d0} &= 8/0 \text{ s} & T'_{q0} &= 1/0 \text{ s} & T''_{d0} &= 0/0.3 \text{ s} & T''_{q0} &= 0/0.7 \text{ s}
 \end{aligned}$$

پارامترهای گذرا و زیرگذرا بر اساس تعاریف کلاسیک است. پارامترها مطابق با مقادیر اشباع نشده  $L_{aq}$  و  $L_{ad}$  داده شده‌اند.

الف) با این فرض که  $L_{ad} = L_{ad}$  است، مقادیر در مبنای واحد پارامترهای اساسی (یعنی اجزای مدارهای معادل دو محور  $d$  و  $q$ ) را تعیین کنید.

ب) با استفاده از پارامترهای اساسی بند الف و بدون استفاده از فرضیات ساده‌سازی تعاریف کلاسیک، مقادیر دقیق پارامترهای گذرا و زیرگذرا را پیدا کرده، آنها را با مقادیر به دست آمده بر اساس تعاریف کلاسیک، مقایسه کنید.

ج) اگر در حالت خروجی نامی ماشین، اشباع مغناطیسی باعث کاهش مقادیر  $L_{ad}$  و  $L_{aq}$  به  $0.83/5$  مقادیر اشباع نشده آنها شود، مقادیر پارامترهای استاندارد را بر اساس تعاریف کلاسیک محاسبه کنید.

### حل

الف) اندوکتانسهای اشباع نشده متقابل به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$L_{ad} = L_d - L_l = 1/81 - 0/15 = 1/66 \text{ pu}$$

$$L_{aq} = L_q - L_l = 1/76 - 0/15 = 1/61 \text{ pu}$$

حال، اندوکتانسهای نشتی روتور را از عبارات مربوط به اندوکتانسهای گذرا و زیرگذرا محاسبه می‌کنیم. از معادله ۴-۲۹، عبارت مربوط به  $L'_d$  بر اساس تعریف کلاسیک به صورت زیر است:

$$L'_d = L_l + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}}$$

با جایگذاری عددی داریم:

$$0/3 = 0/15 + \frac{1/66 \times L_{fd}}{1/66 + L_{fd}}$$

که در نتیجه:

$$L_{fd} = 0/165 \text{ pu}$$

به طور مشابه، از معادله ۴-۳۳ عبارت مربوط به  $L_q$  به صورت زیر در می‌آید:

$$0.65 = 0.15 + \frac{1/61 \times L_{1q}}{1/61 + L_{1q}}$$

که در نتیجه، مقدار  $L_{1q}$  به صورت زیر خواهد بود:

$$L_{1q} = 0.7252 \text{ pu}$$

از معادله ۴-۲۸ داریم:

$$L_d'' = L_1 + \frac{L_{ad} L_{fd} L_{1d}}{L_{ad} L_{fd} + L_{ad} L_{1d} + L_{fd} L_{1d}}$$

که با جایگذاری عددی خواهیم داشت:

$$0.23 = 0.15 + \frac{1/66 \times 0.165 \times L_{1d}}{1/66 \times 0.165 + 1/66 \times L_{1d} + 0.165 \times L_{1d}}$$

و در نتیجه:

$$L_{1d} = 0.1713 \text{ pu}$$

به طور مشابه، با استفاده از عبارت  $L_q''$  از معادله ۴-۳۲ خواهیم داشت:

$$0.25 = 0.15 + \frac{1/61 \times 0.7252 \times L_{1q}}{1/61 \times 0.7252 + (1/61 + 0.7252) L_{1q}}$$

و در نتیجه:

$$L_{1q} = 0.125 \text{ pu}$$

اینک، با استفاده از عبارات مربوط به ثابتهای زمانی مدار باز، مقادیر مقاومتهای روتور را محاسبه می‌کنیم. از معادلات ۴-۱۵ و ۴-۲۳ بر اساس تعاریف کلاسیک، عبارات مربوط به  $T_{d0}'$  و  $T_{d0}''$  به صورت زیر است:

$$T_{d0}' = \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}} \text{ pu}$$

$$T_{d0}'' = \frac{1}{R_{fd}} \left[ L_{fd} + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right] \text{ pu}$$

با جایگذاری عددی و توجه به این نکته که در مبنای واحد، ثابت زمانی مساوی ۳۷۷ برابر ثابت زمانی بر حسب ثانیه است، داریم:

$$R_{fd} = \frac{1/66 + 0/165}{\sqrt{0} \times 377}$$

$$= 0/000605 \text{ pu}$$

و:

$$R_{id} = \frac{1}{0/03 \times 377} \left[ 0/1713 + \frac{1/66 \times 0/165}{1/66 + 0/165} \right]$$

$$= 0/0284 \text{ pu}$$

به طور مشابه، با استفاده از معادلات ۴-۳۰ و ۴-۳۱، مقادیر مقاومت‌های محور q روتور به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$R_{iq} = 0/0062 \text{ pu}$$

و

$$R_{rq} = 0/0237 \text{ pu}$$

در اینجا، مقادیر در مبنای واحد پارامترهای اساسی خلاصه شده‌اند:

$$\begin{array}{llll} R_a = 0/003 & L_1 = 0/15 & L_{ad} = 1/66 & L_{aq} = 1/61 \\ L_{fd} = 0/165 & R_{fd} = 0/0006 & L_{id} = 0/1713 & R_{id} = 0/0284 \\ L_{iq} = 0/7252 & R_{iq} = 0/0062 & L_{rq} = 0/125 & R_{rq} = 0/0237 \end{array}$$

ب) عبارات دقیق مربوط به ثابتهای گذرا و زیرگذرای محور طولی، در جدول ۴-۱ آمده است. با استفاده از مقادیر محاسبه شده پارامترهای اساسی در بند الف در عبارات ثابتهای زمانی  $T_1$  تا  $T_6$  و تقسیم آنها بر ۳۷۷ (به منظور تبدیل کردن به ثانیه)، خواهیم داشت:

$$\begin{array}{lll} T_1 = 8/0 \text{ s} & T_2 = 0/171 \text{ s} & T_3 = 0/03 \text{ s} \\ T_4 = 1/326 \text{ s} & T_5 = 0/0288 \text{ s} & T_6 = 0/023 \text{ s} \end{array}$$

مقدار دقیق اندوکتانس گذرای محور طولی برابر است با:

$$\begin{aligned} L'_d &= L_d \frac{T_r + T_\delta}{T_1 + T_r} \\ &= 1/81 \left[ \frac{1/326 + 0/288}{1/0 + 0/171} \right] \\ &= 0/3 \text{ pu} \end{aligned}$$

و مقادیر دقیق ثابتهای زمانی مدار بازگذرا و زیرگذرا به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} T'_{d0} &= T_1 + T_r = 1/0 + 0/171 \\ &= 1/171 \text{ s} \\ T''_{d0} &= \frac{T_1 T_r}{T_1 + T_r} \\ &= \frac{1/0 \times 0/3}{1/0 + 0/3} \\ &= 0/0294 \text{ s} \end{aligned}$$

به طور مشابه، برای محور  $q$ ، داریم:

$$\begin{aligned} T_1 &= 1/0 \text{ s} & T_r &= 0/1934 \text{ s} & T_r &= 0/07 \text{ s} \\ T_r &= 0/3693 \text{ s} & T_\delta &= 0/0294 \text{ s} & T_p &= 0/0269 \text{ s} \end{aligned}$$

مقدار دقیق اندوکتانس گذرای محور  $q$  برابر است با:

$$\begin{aligned} L'_q &= L_q \frac{T_r + T_\delta}{T_1 + T_r} \\ &= 1/76 \frac{0/3693 + 0/0294}{1/0 + 0/1934} \\ &= 0/5875 \text{ pu} \end{aligned}$$

و مقادیر دقیق ثابتهای زمانی مدار باز در محور  $q$  به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} T'_{q_0} &= T_1 + T_r = 1/0 + 0/1943 \\ &= 1/1943 \text{ s} \\ T''_{q_0} &= T_r \frac{T_1}{T_1 + T_r} = 0/07 \frac{1/0}{1/1943} \\ &= 0/0586 \text{ s} \end{aligned}$$

مشاهده می‌شود که تقریبی در تعاریف کلاسیک اندوکتانسهای زیرگذرا به کار نرفته است و از این رو، مقادیر دقیق  $L''_d$  و  $L''_q$  مساوی مقادیر داده شده است. در جدول زیر مقایسه‌ای بین مقادیر دقیق و تقریبی پارامترها آورده شده است.

پارامتر	مقدار براساس تعریف کلاسیک	مقدار دقیق
$L'_d$	0/3	0/3
$T'_{d_0}$	8/0	8/171
$T''_{d_0}$	0/03	0/0294
$L'_q$	0/65	0/5875
$T'_{q_0}$	1/0	1/1943
$T''_{q_0}$	0/07	0/0586

مشاهده می‌شود که تقریب، فقط برای مقادیر محور عرضی حاوی تفاوت‌های چشمگیری است.

ج) در حالت خروجی نامی، مقادیر اشباع شده اندوکتانسهای متقابل برابر است با:

$$\begin{aligned} L_{ad} &= 0/835 \times L_{adu} = 0/835 \times 1/66 \\ &= 1/386 \text{ pu} \\ L_{aq} &= 0/835 \times L_{aqu} = 0/835 \times 1/61 \\ &= 1/344 \text{ pu} \end{aligned}$$

و در نتیجه، بر اساس تعاریف کلاسیک، مقادیر پارامترهای استاندارد به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$L_d = 1/386 + 0/15 = 1/536 \text{ pu}$$

$$L_q = 0/844 + 0/15 = 1/494 \text{ pu}$$

$$L'_d = 0/15 + \frac{1/386 \times 0/165}{1/386 + 0/165}$$

$$L''_d = 0/15 + \frac{1/386 \times 0/165 \times 0/1713}{1/386 \times 0/165 + 1/386 \times 0/1713 + 0/165 \times 0/1713}$$

$$= 0/2292 \text{ pu}$$

$$L'_q = 0/15 + \frac{1/344 \times 0/7252}{1/344 + 0/7252}$$

$$= 0/621 \text{ pu}$$

$$L''_q = 0/15 + \frac{1/344 \times 0/7252 \times 0/125}{1/344 \times 0/7252 + 1/344 \times 0/125 + 0/7252 \times 0/125}$$

$$= 0/2488 \text{ pu}$$

$$T'_{d0} = \frac{1/386 + 0/165}{0/006 \times 377} = 6/86 \text{ s}$$

$$T''_{d0} = \frac{1}{0/284 \times 377} \left[ 0/1713 + \frac{1/386 \times 0/165}{1/386 + 0/165} \right]$$

$$= 0/298 \text{ s}$$

$$T'_{q0} = \frac{1/344 + 0/7252}{0/062 \times 377} = 0/885 \text{ s}$$

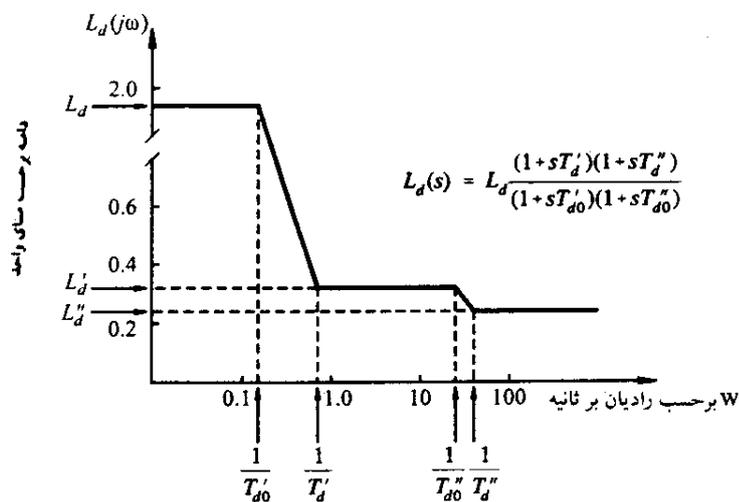
$$T''_{q0} = \frac{1}{0/237 \times 377} \left[ 0/125 + \frac{1/344 \times 0/7252}{1/344 + 0/7252} \right]$$

$$= 0/667 \text{ s}$$

### ۳-۴ مشخصه‌های پاسخ فرکانسی

لازم است که مشخصه‌های پاسخ فرکانسی مربوط به پارامترهای عملیاتی مورد مطالعه قرار گیرند و به پارامترهای استاندارد ربط داده شوند. چنین مشخصه‌هایی دیدی مناسب از مشخصه‌های دینامیکی ماشین را عرضه می‌دارند و می‌توان آنها را به سهولت با استفاده از تقریب مجانبی<sup>۱</sup> رسم کرد.

زمانی که تأثیر روتور در محور طولی به کمک دو مدار نشان داده شود،  $L_d(s)$  و  $G(s)$  به ترتیب با معادلات ۱۶-۴ و ۱۷-۴ بیان می‌شوند. شکل ۴-۵، دامنه  $L_d(s)$  را برحسب تابعی از فرکانس نشان می‌دهد. اندوکتانسها و ثابتهای زمانی گذرا و زیرگذرا به منظور تعیین گوشه‌های تقریب مجانبی به کار رفته‌اند. تصویر نشان داده شده، برای ژنراتور مثال ۱-۴ است اما شکل کلی مشخصه پاسخ فرکانسی، در مورد هر ماشین سنکرون صدق می‌کند. اندوکتانس مؤثر، مساوی اندوکتانس سنکرون  $L_d$  در فرکانسهای زیر  $0.2\text{ Hz}$ ، اندوکتانس گذرای  $L_d'$  در بازه فرکانسی  $0.2\text{ Hz}$  تا  $2\text{ Hz}$  و اندوکتانس

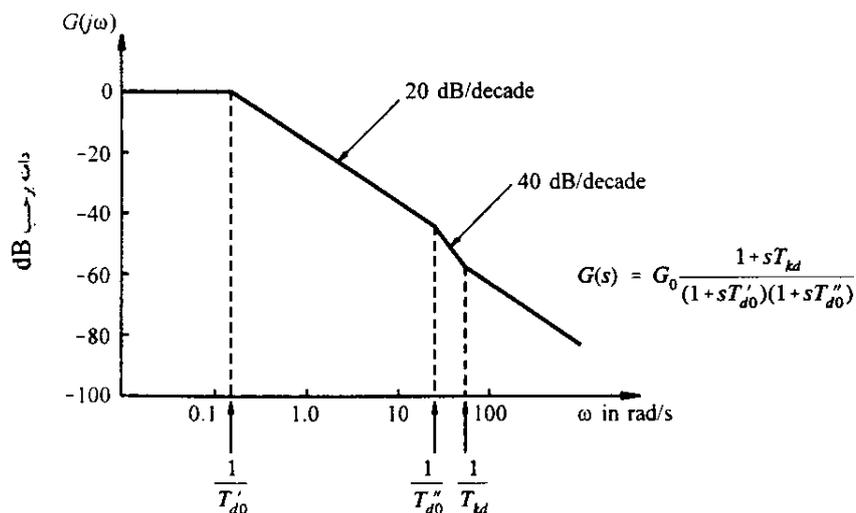


شکل ۴-۵ تغییر دامنه  $L_d(s)$

1. Asymptotic

زیرگذرای  $L''$  در بازه فرکانسی بالاتر از  $10\text{ Hz}$  است. در مطالعات پایداری، بازه فرکانسی مورد نظر مربوط به اندوکتانس  $L'$  است.

شکل ۴-۶ دامنه  $G(s)$  را بر حسب تابعی از فرکانس و برای همان ماشین نشان می‌دهد که  $G$  به نحوی نرمالیزه شده که مساوی  $1/0$  باشد. از این شکل، مشخص است که دامنه مؤثر در فرکانسهای بالا به میزان زیادی افت می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات فرکانس بالای ولتاژ تحریک در شار دور استاتور (و بنابراین در سایر کمیت‌های استاتور) تأثیر نمی‌گذارد.



شکل ۴-۶ تغییر دامنه  $G(s)$  با فرکانس

#### ثابت زمانی آرمیچر

در بخش ۳-۷-۲ مطرح شد که ثابت زمانی آرمیچر،  $T_a$  میزان میرایی مؤلفه یکطرفه (جریان مستقیم) جریانهای فاز آرمیچر را به دنبال بروز اتصال کوتاه سه فاز در پایانه‌های آن نشان می‌دهد. مؤلفه‌های یکطرفه جریان که در سه فاز، دامنه‌های نامساوی دارند، یک موج نیروی محرکه مغناطیسی ایستا ایجاد می‌کنند. این موج، با ثابت حفظ کردن

شارهایی که از مدارهای روتور می‌گذرد، جریانهای فرکانس اصلی را در آنها القا می‌کند. مسیر شار دور آرمیچر به علت این مؤلفه جریان مستقیم، مشابه مسیر مربوط به راکتانسهای زیرگذرای  $L_d''$  و  $L_q''$  است. از آنجا که روتور نسبت به موج نیروی محرکه مغناطیسی حاصل از جریانهای مستقیم در استاتور، با سرعت سنکرون می‌چرخد، این موج، متناوباً، حالتیهای مربوط به  $L_d''$  و  $L_q''$  را مشاهده می‌کند. از این رو، اندوکتانس مؤثری که به وسیله جریانهای مستقیم در آرمیچر دیده می‌شود بین  $L_d''$  و  $L_q''$  واقع است. بعداً نشان خواهیم داد که این اندوکتانس، همچنین مساوی  $L_r$  (اندوکتانسی که به وسیله جریانهای مؤلفه منفی اعمال شده به سیم‌پیچهای استاتور، دیده می‌شود)، است. بنابراین:

$$T_a = \frac{1}{R_a} \left[ \frac{L_d'' + L_q''}{2} \right] \text{ مبنای واحد} \quad (4-46)$$

مقدار  $T_a$  بین  $0.03$  تا  $0.35$  ثانیه است.

#### ۴-۴ تعیین پارامترهای ماشین سنکرون

روش سنتی به دست آوردن پارامترهای ماشین سنکرون مبتنی بر آزمایشهای اتصال کوتاه در ماشین بدون بار است. روش آزمایش در استاندارد شماره ۱۹۸۳-۱۱۵ [۸] مؤسسه IEEE بیان شده است. این آزمایشها، پارامترهای  $X_d$ ،  $X_q$ ،  $X_d'$ ،  $X_q'$ ،  $T_d''$ ،  $T_q''$ ،  $T_d'$  و  $T_q'$  را تعیین می‌کنند اما پارامترهای گذرا و زیرگذرای محور  $q$  را مشخص نمی‌کنند. به علاوه در آزمایشهای اتصال کوتاه، اندازه‌گیری کمیت‌های مدار روتور را در نظر نمی‌گیرند و از این رو، مدار تحریک به طور مشخص، شناسایی نمی‌شود. چندی است که محدودیتهای این روشها در تأمین داده‌های مورد نیاز مطالعات پایداری، مشخص شده است.

از این روشهای مبتنی بر آزمایش و نیز محاسباتی جایگزینی در به دست آوردن

مدلهای بهتر، پیشنهاد و مورد استفاده واقع شده است:

● آزمایشهای تقویت شده اتصال کوتاه ناگهانی؛

- آزمایش باربرداری از استاتور<sup>۱</sup>؛
- آزمایشهای پاسخ فرکانسی شامل:
  - پاسخ فرکانسی ماشین در حالت سکون<sup>۲</sup> (SSFR)؛
  - پاسخ فرکانسی مدار باز ماشین<sup>۳</sup> (OCFR)؛
  - پاسخ فرکانسی با ماشین در حال کار<sup>۴</sup> (OLFR)؛
- بررسی داده‌های طراحی ماشین؛
- اندازه‌گیری اشباع محور q.

در اینجا ویژگیهای هر روش به طور خلاصه مطرح می‌شود. اما شرح مفصل آنها از حوصله این کتاب خارج است. خوانندگان می‌توانند به مراجع ذکر شده مربوط مراجعه کنند.

#### آزمایشهای تقویت شده اتصال کوتاه

در مراجع ۹ و ۱۰، روشهای اصلاح شده‌ای به منظور تعیین دقیقتر پارامترهای محور طولی از آزمایشهای اتصال کوتاه ناگهانی، بیان شده‌است. مهمترین ویژگی این روشها، استفاده از اندازه‌گیریهای جریان روتور در طی آزمایشهای اتصال کوتاه، به منظور تعیین دقیقتر مشخصه‌های مدار تحریک است. از نقاط ضعف روش اتصال کوتاه، ناتوانی آن در تعیین دقیق پارامترهای محور عرضی و نیاز به وارد کردن شوکی شدید به ماشین است.

#### آزمایشهای باربرداری از استاتور

این آزمایشها، از این نظر که عکس‌العملهای زمانی متغیرهای ماشین به دنبال بروز اغتشاش ناگهانی در تعیین مشخصه‌های آن به کار می‌رود، شبیه آزمایشهای اتصال کوتاه است. در مراجع ۱۰، ۱۱ و ۱۲ از این روش استفاده شده است. در این شیوه، ابتدا وضعیت کاری به نحوی ترتیب داده می‌شود که جریان فقط از محور طولی عبور کند

1. Stator Decrement Test

2. Standstill Frequency Response

3. Open — circuit Frequency Response

4. On — line Frequency Response

( $i_q = 0$ ) در این حالت، واحد از مدار خارج می‌شود و از سیر نزولی ولتاژ پایانه و جریان تحریک به منظور تعیین پارامترهای مدل، بسیار شبیه آنچه در آزمایش اتصال کوتاه انجام گرفت، استفاده می‌شود. آزمایش مشابهی برای تعیین پارامترهای محور  $q$  در حالتی که ماشین فقط جریانی در محور عرضی دارد ( $i_d = 0$ )، انجام می‌پذیرد. برای تأمین وضعیت غیر اشباع، این آزمایشها در بار کم و ولتاژ کاهش یافته اجرا می‌شود. هر چند که این آزمایشها، پارامترهای هر دو محور را تعیین می‌کنند، اجرای آنها تا حدی مشکل و هزینه‌بر است. زیرا برای اغلب ماشینها، مشکل و حتی غیر ممکن است که وضعیت غیر اشباع را تأمین کرد که این موضوع متأسفانه، آزمایش و بررسی نتایج را با دشواری مواجه می‌کند. انجام آزمایش نیازمند برنامه‌ریزی مجدد<sup>۱</sup> تولید و از مدار خارج کردن چندین واحد است که اغلب عملی نیست.

#### آزمایش پاسخ فرکانسی

الف) پاسخ فرکانسی در حالت سکون. در این روش، تمام آزمایشها در حالتی انجام می‌شود که واحد، در حالت سکون (روتور بدون حرکت) و از سیستم جداست. هنگام آزمایشها باید روتور را در دو جهت مشخص نسبت به استاتور قرار داد. زمانی که استاتور از یک منبع ولتاژ ضعیف ( $\pm 60A$  و  $\pm 20V$ ) در بازه فرکانسی بین  $1mHz$  تا  $1kHz$  تغذیه می‌شود، عکس‌العملهای زیر اندازه‌گیری می‌شود:

زمانی که تحریک، اتصال کوتاه و سیم‌پیچ استاتور تحریک شده است، داریم:

$$sG(s) = \frac{\Delta i_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \quad (47-4)$$

و:

$$Z_d(s) = \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)} \quad (48-4)$$

و زمانی که استاتور، تحریک شده است (وضعیت سیم پیچ تحریک اهمیتی ندارد):

$$Z_q(s) = - \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_d(s)} \quad (49-4)$$

$Z_d(s)$  و  $Z_q(s)$ ، امپدانسهای عملیاتی محورهای طولی و عرضی از دیدگاه پایانه‌های آرمیچر هستند. اندوکتانسهای عملیاتی را می‌توان به صورت زیر و با کم کردن مقاومت آرمیچر از این امپدانسها به دست آورد:

$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_a}{s} \quad (50-4)$$

و:

$$L_q(s) = \frac{Z_q(s) - R_a}{s} \quad (51-4)$$

که  $R_a$  مقاومت جریان مستقیم فاز آرمیچر و  $s=j\omega$  است.

پارامترهای مدار معادل محور  $d$  را می‌توان از توابع تبدیل تقریبی تابعهای  $L_d(s)$  و  $L_q(s)$  به دست آورد. از تابع  $sG(s)$  به جای  $G(s)$  استفاده می‌شود زیرا می‌توان آن را هنگامی که تحریک، اتصال کوتاه است و همزمان با  $Z_d(s)$ ، به دست آورد. پارامترهای محور  $q$  را با استفاده از تابع تبدیل  $L_q(s)$  محاسبه می‌کنند. درجه هر تابع تبدیل بستگی به در نظر گرفتن تعداد مدار روتور در محور مربوطه دارد. از آنجا که آزمایشها در سطوح کم شار انجام می‌شود، باید نتایج را به گونه‌ای تصحیح کرد که آنها را از پایین منحنی اشباع به سطوح اشباع نشده معمولی منتقل نماید. این کار با تعدیل جزئی در راکتانس متقابل هر محور عملی می‌شود.

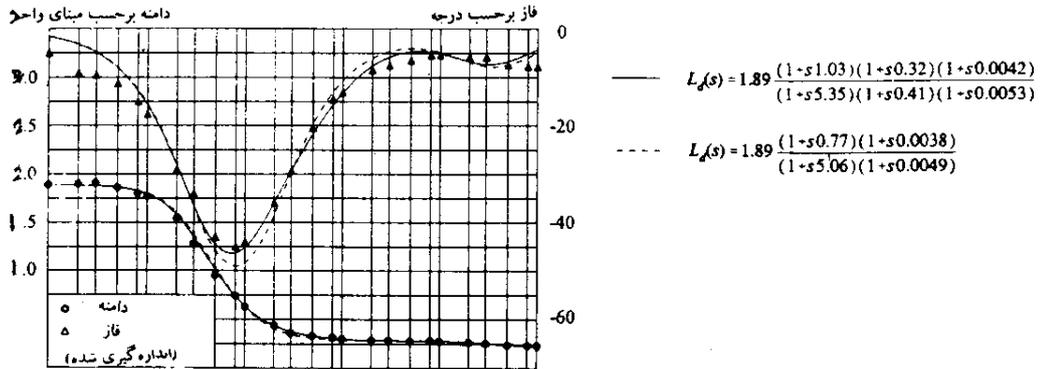
از این روش در مراجع ۷، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ استفاده شده است. بعلاوه، اکنون یکی از روشهای استاندارد "استفاده آزمایشی" مؤسسه IEEE است [۱۶]. انجام آزمایش پاسخ فرکانسی حالت سکون نسبتاً آسان است و می‌توان آن را در کارخانه یا در دوره تعمیر یک واحد انجام داد. اما علاوه بر نیاز به تعدیل وضعیت غیر اشباع، دو محدودیت دیگر برای این روش وجود دارد که هر دو شامل تأثیرات چرخشی است. زمانی که از سیم پیچهای میراکننده استفاده می‌شود، آنها اغلب همپوشانی دارند و ممکن است اتصال

خوبی در شرایط سکون تشکیل نگردد. بعلاوه حدی که چرخش باعث می شود تا گوه های<sup>۱</sup> شکافها مسیر امیدانس کمی را برای روتور تشکیل دهند، به میزان زیادی ناشناخته است. انتظار این است که در فرکانسهای کم و زیاد نتایج به دست آمده، منطقی باشند. در فرکانسهای میانی نیز نتایج، برای بیشتر ماشینهایی که هیچ سیم پیچ میراکننده مشخص یا معادل آن یا حلقه های نگهدارنده غیر مغناطیسی ندارند، خوب است.

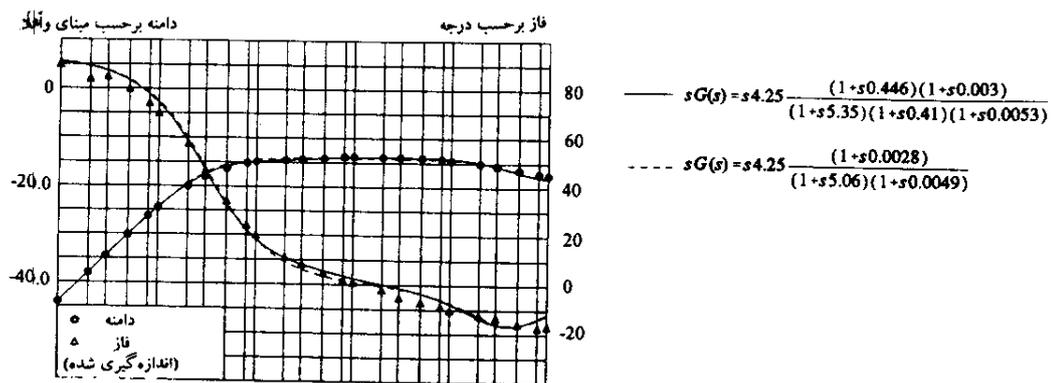
مشروح مدلهای به دست آمده از آزمایشهای پاسخ فرکانسی در حال سکون برای سه ژنراتور بزرگ در مراجع ۷ و ۱۴ آمده است. نتایج اندازه گیری شده  $L_h(s)$ ،  $sg(s)$  و  $L_h(s)$  برای یکی از این سه ژنراتور (ژنراتور ۵۰۰ MW، ۳۸۰۰ RPM در لامتن ایالت انتاریوی کانادا) در شکلهای ۴-۷ تا ۴-۹ نشان داده شده است. توابع تبدیل تقریبی درجه دوم و سوم هر یک نیز در شکلها نشان داده شده است. برای این ژنراتور به نظر می رسد که تقریب درجه دوم برای هر دو محور، تقریب مناسبی باشد. اما ممکن است همیشه موضوع چنین نباشد و در بعضی حالات، توابع تبدیل درجه سوم، مناسبتر باشد [۷ و ۱۴].

ب) پاسخ فرکانسی مدار باز. آزمایش پاسخ فرکانسی مدار باز این امکان را فراهم می سازد که بعضی از اطلاعات پاسخ فرکانسی در حالت سکون در بازه میانی فرکانس فقط برای محور طولی مورد تأیید قرار گیرد [۷]. در انجام این آزمایش، واحد در حالت مدار باز و در ولتاژ کاهش یافته ای مورد بهره برداری قرار می گیرد. سیم پیچ تحریک در فرکانسهای مختلف تحریک می شود و پاسخ فرکانسی تحریک به استاتور، اندازه گیری می شود. تفاوت بین این پاسخ و پاسخ معادل آن از آزمایشهای در حالت سکون، معیاری را برای نمایش تأثیرات چرخشی ارائه می دهد. معمولاً آزمایش در بیش از یک ولتاژ انجام می پذیرد تا تأثیرات اشباع مورد مطالعه قرار گیرد. با انجام آزمایش با سیگنالهای با دامنه های متفاوت، تأثیرات گوه های شکافها مورد ارزیابی قرار می گیرد.

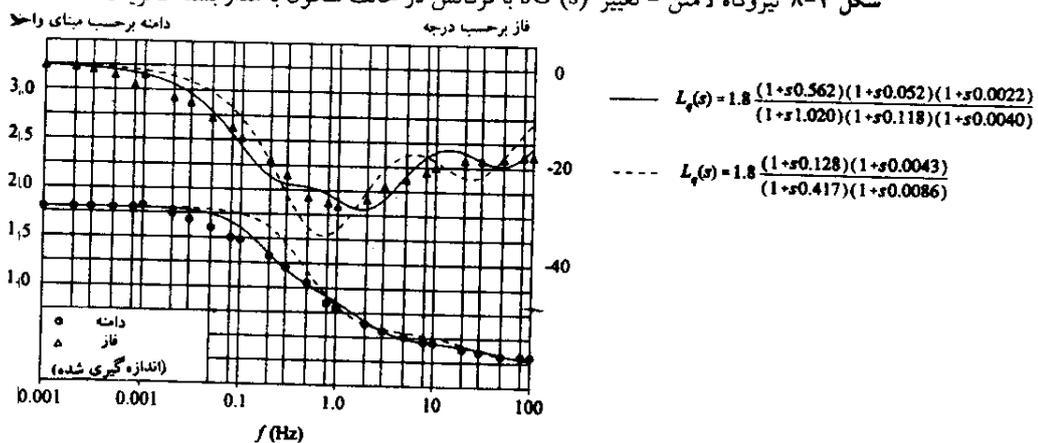
ج) پاسخ فرکانسی با ماشین در حال کار. تا جایی که صحت مدل ماشین در حالت اغتشاشهای با دامنه کم مورد نظر است، پاسخ فرکانسی ماشین در حال کار روش بسیار



شکل ۷-۴ نیروگاه لامتن - تغییر (s) با فرکانس در حالت سکون با مدار بسته تحریک



شکل ۸-۴ نیروگاه لامتن - تغییر (s) با فرکانس در حالت سکون با مدار بسته تحریک



شکل ۹-۴ نیروگاه لامتن - تغییر (s) با فرکانس در حالت سکون

مناسبی را ارائه می‌دهد. در این آزمایش، ماشین در همان حالتی قرار می‌گیرد که از مدل، انتظار می‌رود، هر چند که حوزه کاری را محدود می‌کنند.

در این آزمایش، ماشین، نزدیک به بار نامی (یا بار کمتر) و از طریق امپدانس زیادی متصل به سیستم، مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. تحریک با یک موج سینوسی یا نویز اتفاقی<sup>۱</sup> مدوله می‌شود. مؤلفه‌ها بر دو محور، تجزیه می‌شوند و داده‌هایی شبیه آنچه در پاسخ فرکانسی در حالت سکون استفاده شد، برای به دست آوردن مدلی مناسب مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در این حالت، حوزه فرکانسی داده‌های مورد استفاده، نسبت به آزمایشهای در حال سکون، محدودتر است اما انتظار، این است که داده‌های روش در حالت سکون در دو انتهای بازه فرکانسی، دقیق باشد. روش پاسخ فرکانسی با ماشین در حال کار، این امکان را فراهم می‌سازد که محدوده میانی فرکانس، با داده‌هایی برای هر دو محور پر شود که تأثیرات چرخشی را نیز شامل می‌شود. عیب این روش، آن است که آزمایش باید بر روی ماشینی صورت گیرد که به سیستم، متصل است و احتمالاً تحت وضعیت خاصی از سیستم یا واحد واقع است. بعلاوه این روش، اطلاعاتی را در باره عکس‌العمل در مقابل سیگنال بزرگ فراهم نمی‌آورد.

مشروح تکنیکهای اندازه‌گیری و شناسایی مدل با این روش، در مرجع ۱۸ آمده است. نتایج حاصل بر روی دو واحد بزرگ و مدل‌های اصلاح شده حاصل از آزمایش، در مراجع ۷ و ۱۹ بیان شده است. در مرجع ۲۰، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و عکس‌العمل‌های واقعی اندازه‌گیری شده شامل کلیدزنی خط، مدل‌های به دست آمده برای سه ژنراتور بزرگ، با استفاده از روشهای پاسخ فرکانسی در حالت سکون و با ماشین در حال کار، ارزیابی و مورد تصدیق قرار گرفته است. برای یک ژنراتور، مدل‌های به دست آمده از آزمایشهای اتصال کوتاه و آزمایشهای باربرداری از استاتور نیز بررسی شده است.

#### محاسبه پارامترهای ماشین از داده‌های طراحی

در مرجع ۲۱، مدل‌های اصلاح شده ژنراتور با استفاده از اطلاعات طراحی ماشین، شرح

داده شده است. مرجع ۲۲، مدلسازی با استفاده از روش بررسی اجزای محدود را بیان می‌کند. تحقیقات انجام شده در خصوص استفاده از مدل‌های دو بعدی و سه بعدی اجزای محدود، تطابق خوبی را بین مدل‌ها و نتایج اندازه‌گیری شده در حالت ماندگار، نشان می‌دهد. بعلاوه مدل‌های به دست آمده دو بعدی اجزای محدود، اطلاعات پاسخ فرکانسی، بسیار شبیه به پاسخهای فرکانسی اندازه‌گیری شده را، نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد حدی که هدایت در طرفین گوه‌های شکافها رخ می‌دهد، تأثیر زیادی بر مدل به دست آمده، در فرکانسهای بالا داشته باشد. اهمیت تأثیرات چرخشی و تأثیر دامنه اغتشاش بر مدل، از موضوعاتی است که به تحقیق بیشتر نیاز دارد.

## منابع

- [1] R.H. Park, "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines," *AIEE Trans.*, Part I, Vol. 48, pp. 716-730, 1929; Part II, Vol. 52, pp. 352-355, 1933.
- [2] C. Concordia, *Synchronous Machines - Theory and Performance*, John Wiley & Sons, 1952.
- [3] B. Adkins, *The General Theory of Electric Machines*, Chapman and Hall, 1964.
- [4] G. Shackshaft, "New Approach to the Determination of Synchronous Machine Parameters from Tests," *Proc. IEE (London)*, Vol. 121, No. 11, pp. 1385-1392, 1974.
- [5] IEEE Committee Report, "Supplementary Definitions and Associated Test Methods for Obtaining Parameters for Synchronous Machine Stability Simulations," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, pp. 1625-1633, July/August 1980.
- [6] I.M. Canay, "Causes of Discrepancies on Calculation of Rotor Quantities and Exact Equivalent Diagram of Synchronous Machines," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-88, pp. 1114-1120, July 1969.
- [7] EPRI Report EL-1424, "Determination of Synchronous Machine Stability Constants." Vol. 2, prepared by Ontario Hydro, December 1980.
- [8] ANSI/IEEE Standard 115-1983, *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines*.
- [9] Y. Takeda and B. Adkins, "Determination of Synchronous Machine Parameters Allowing for Unequal Mutual Inductances," *Proc. IEE (London)*, Vol. 121, No. 12, pp. 1501-1504, December 1974.
- [10] G. Shackshaft and A.T. Poray, "Implementation of New Approach to Determination of Synchronous Machine Parameters from Tests," *Proc. IEE (London)*, Vol. 124, No. 12, pp. 1170-1178, 1977.
- [11] F.P. deMello and J.R. Ribeiro, "Derivation of Synchronous Machine Parameters from Tests," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-96, pp. 1211-1218, July/August 1977.
- [12] F.P. deMello and L.N. Hannett, "Validation of Synchronous Machine Models and Determination of Model Parameters from Tests," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 662-672, February 1981.

- [13] M.E. Coultres and W. Watson, "Synchronous Machine Models by Standstill Frequency Response Tests," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 1480-1489, April 1981.
- [14] P.L. Dandeno and A.T. Poray, "Development of Detailed Turbogenerator Equivalent Circuits from Standstill Frequency Response Measurements," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 1646-1653, April 1981.
- [15] M.E. Coultres, "Standstill Frequency Response Tests," Presented at the IEEE Symposium on Synchronous Machine Modelling for Power System Studies, IEEE Publication 83TH0101-6-PWR, pp. 26-30.
- [16] IEEE Standard 115A-1984, *IEEE Trial Use Standard Procedures for Obtaining Synchronous Machine Parameters by Standstill Frequency Response Testing.*
- [17] A.G. Jack and T.J. Bedford, "A Study of the Frequency Response of Turbogenerators with Special Reference to Nanticoke GS," *IEEE Trans.*, Vol. EC-2, pp. 496-505, September 1987.
- [18] M.E. Coultres, P. Kundur and G.J. Rogers, "On-Line Frequency Response Tests and Identification of Generator Models," *IEEE Trans.*, Vol. EC-2, pp. 38-42, September 1987.
- [19] P.L. Dandeno, P. Kundur, A.T. Poray, and H.M. Zein El-Din, "Adaptation and Validation of Turbogenerator Model Parameters through On-Line Frequency Response Measurements," *IEEE Trans.*, Vol. EC-2, pp. 1656-1661, September 1987.
- [20] P.L. Dandeno, P. Kundur, A.T. Poray, and M.E. Coultres, "Validation of Turbogenerator Stability Models by Comparison with Power System Tests," *IEEE Trans.*, Vol. EC-2, pp. 1637-1645, September 1987.
- [21] R.P. Schulz, W.D. Jones, and D.N. Ewart, "Dynamic Models of Turbine Generators Derived from Solid Rotor Equivalent Circuits," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-92, pp. 926-933, May/June 1973.
- [22] J.W. Dougherty and S.M. Minnich, "Finite Element Modelling of Large Turbine Generators: Calculations versus Load Test Data," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 3921-3929, August 1981.



## فصل پنجم

### نمایش ماشینهای سنکرون در مطالعات پایداری

معادلات در مبنای واحد مورد بحث در بخش ۳-۴-۹ به طور کامل عملکرد الکتریکی دینامیکی یک ماشین سنکرون را بیان می‌کنند. اما جز در مورد سیستمهای بسیار کوچک، این معادلات را نمی‌توان به طور مستقیم برای معادلات پایداری سیستم به کاربرد. در این فصل، ساده‌سازیهایی لازم به منظور نمایش ماشینهای سنکرون در مطالعات پایداری مورد بحث واقع می‌شود. همچنین درجات مختلف تقریب به منظور ساده کردن مدل ماشین، حداقل کردن اطلاعات مورد نیاز و زمان محاسباتی، بیان خواهد گردید.

#### ۵-۱ ساده‌سازیهایی ضروری در مطالعات سیستمهای بزرگ

در بررسی پایداری سیستمهای بزرگ، لازم است که نکات زیر در مورد معادلات ۳-۱۲۰ و

۳-۱۲۱ مربوط به ولتاژ استاتور، مد نظر قرار گیرد:

● از عبارات ولتاژ ترانسفورمری ( $p\psi_e$  و  $p\psi_q$ ) چشمپوشی شود.

● تأثیر تغییرات سرعت، لحاظ نشود.

اینک دلایل و تأثیر این ساده‌سازیهایی را مورد بحث قرار می‌دهیم.

#### ۵-۱-۱ چشمپوشی از عبارات ولتاژ ترانسفورمری استاتور

همچنان که در بخش ۳-۷ بحث شد، عبارات  $p\psi_e$  و  $p\psi_q$ ، نمایشگر عکس‌العمل گذرای

استاتور هستند. با چشمپوشی از عبارات فوق، کمیت‌های استاتور فقط دارای مؤلفه فرکانس اصلی هستند و معادلات ولتاژ استاتور، به صورت معادلات جبری در می‌آیند. این موضوع اجازه می‌دهد که روابط حالت ماندگار برای نمایش شبکه انتقال به هم پیوسته به کار رود.

عکس‌العمل‌های گذرای مربوط به شبکه، سریعاً میرا می‌شوند و توجیهی برای مدل کردن این تأثیرات در مطالعات پایداری وجود ندارد. اما این عکس‌العمل‌ها را نمی‌توان چشمپوشی کرد مگر اینکه از عکس‌العمل‌های گذرای استاتور نیز چشمپوشی شود زیرا در غیر این صورت، با مجموعه‌ای از معادلات اجزای سیستم قدرت روبرو هستیم که با یکدیگر همخوانی ندارند. لحاظ کردن عکس‌العمل‌های گذرای شبکه، درجه مدل کلی سیستم را به میزان زیادی افزایش می‌دهد و از این‌رو اندازه سیستم تحت شبیه‌سازی را محدود می‌کند. بعلاوه، سیستمی که در آن عکس‌العمل‌های گذرای استاتور ماشین و شبکه در نظر گرفته شده باشد، دارای عکس‌العمل‌های گذرای فرکانس بالا خواهد بود. این موضوع باعث نیاز به انتخاب گام انتگرال‌گیری بسیار کوچکی در محاسبات می‌شود که خود زمان محاسبات را بشدت افزایش می‌دهد. همچنین بررسی و تفسیر عکس‌العمل زمانی سیستم که دارای مؤلفه‌های فرکانس بالا می‌باشند، از دیدگاه مطالعات پایداری مشکل است. به این دلایل است که بررسی پایداری شبکه‌های قدرت واقعی که از هزاران شین و صدها ژنراتور تشکیل شده، بدون چشمپوشی از عکس‌العمل‌های گذرای استاتور، غیر ممکن است. هرچند دلیل حذف عبارات  $p\psi$  از معادلات استاتور بیان شد، اما تاکنون عکس‌العمل محاسبه شده ماشین با چشمپوشی از این عبارات و نیز اینکه آیا عکس‌العمل مشاهده شده از نظر مطالعات پایداری قابل قبول است یا خیر، مورد بحث قرار نگرفته است. این موضوع در مراجع ۱ تا ۳ بررسی شده است و در اینجا نتایج یکی از حالت‌های مطرح شده در مرجع ۱ را مورد بحث قرار می‌دهیم.

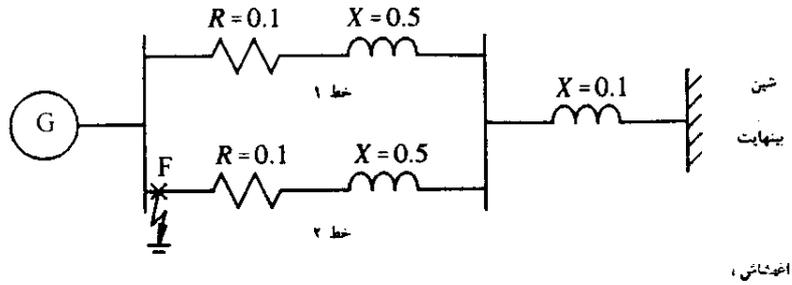
شکل ۵-۱، سیستم تحت مطالعه را نشان می‌دهد که شامل یک ژنراتور قطب برجسته است که از طریق دو خط انتقال به یک شین بینهایت متصل است. اغتشاش مورد بررسی، یک اتصال کوتاه سه فاز است که در طرف ارسال یکی از این خطوط رخ می‌دهد و ظرف  $0.09 \text{ Sec}$  با خارج کردن مدار مربوطه، رفع می‌شود. عکس‌العمل متغیرهای سیستم با و بدون در نظر گرفتن عبارت  $p\psi$  استاتور، در شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳ و ۵-۴ با هم مقایسه شده‌اند. با چشمپوشی از عبارات فوق، از شکل ۵-۲ مشخص است که  $i_h$  و  $i_q$  فقط دارای مؤلفه‌های یکطرفه هستند که مطابق با

مؤلفه‌های فرکانس اصلی جریانهای فاز است. گشتاور حاصل فاصله هوایی، یکطرفه و دارای دامنه کم است که به علت تلفات مقاومتی استاتور است. از طرف دیگر، با در نظر گرفتن عبارات  $p\psi$ ،  $i_h$  و  $i_q$  دارای مؤلفه‌های فرکانس اصلی (۶۰ Hz) هستند که مطابق با مؤلفه‌های یکطرفه (جریان مستقیم) در جریانهای فاز است (در بخش ۳-۷ مورد بحث واقع شد). این مؤلفه‌ها، به نوبه خود منجر به مؤلفه‌های زیرگشتاور فاصله هوایی می‌شوند:

- یک مؤلفه نوسانی با فرکانس اصلی، به علت تأثیر متقابل با تحریک روتور؛
- یک مؤلفه یکطرفه، به علت تلفات مقاومتی روتور، حاصل از جریانهای فرکانس اصلی القا شده در روتور.

ممکن است مؤلفه یکطرفه یکطرفه گشتاور ناشی از تلفات مقاومتی روتور، بسیار بزرگ بوده، تأثیر بازدارندگی (ترمز) داشته باشد. از این رو به آن گشتاور بازدارنده جریان مستقیم<sup>۱</sup> گفته می‌شود که تأثیر آن کاهش شتاب روتور به دنبال بروز اغتشاش است. تأثیر مؤلفه نوسانی، کاهش شتاب روتور طی اولین نیم سیکل و شتاب دادن آن به نزدیکی سرعت اولیه‌اش، طی دومین نیم سیکل است که این روند به همین ترتیب در سایر سیکلها ادامه پیدا می‌کند. بنابراین، تأثیر خالص گشتاور نوسانی، کاهش سرعت متوسط روتور است [۴]. ممکن است تأثیر کلی این دو مؤلفه در حالت بروز اتصال کوتاه همزمان سه فاز، به اندازه کافی بزرگ باشد و باعث کندی روتور یا نوسان به عقب<sup>۲</sup> آن شود. این موضوع می‌تواند تأثیر مهم و سودمندی بر پایداری سیستم داشته باشد که از منحنیهای مربوط به انحراف سرعت و زاویه روتور در شکلهای ۳-۵ و ۴-۵ آشکار است.

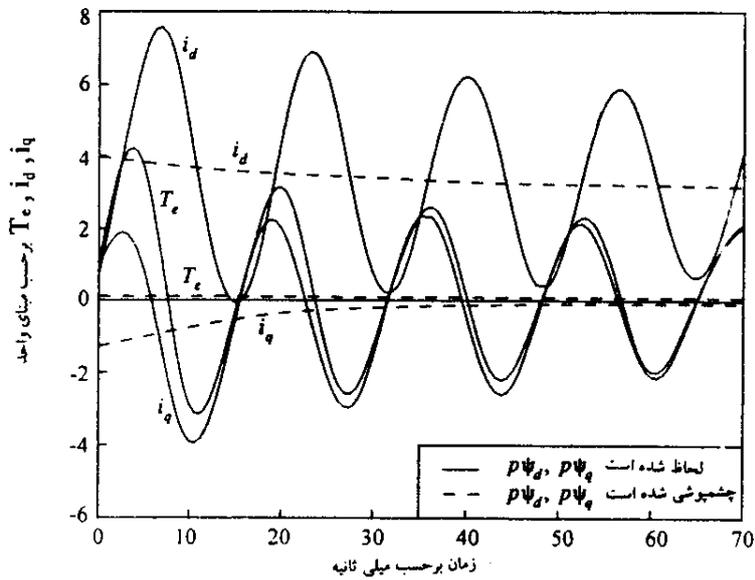
از آنجا که برای مطالعات پایداری شبکه‌های بزرگ، لازم است تا از عبارات  $p\psi$  چشمپوشی شود، تأثیر گشتاور بازدارنده یکطرفه (جریان مستقیم) و گشتاور نوسانی را می‌توان تخمین زد و در محاسبات مورد توجه قرار داد. مراجع ۱، ۳، ۵ و ۶، روشهای تخمین گشتاور بازدارنده یکطرفه و مرجع ۴، روش احتساب گشتاور نوسانی را ارائه می‌دهند. این نتایج فقط در مورد خطاهای اتصال کوتاه سه فاز صادق است و لازم است برای ماشینهایی که بسیار نزدیک به محل وقوع خطا هستند، در نظر گرفته شود.



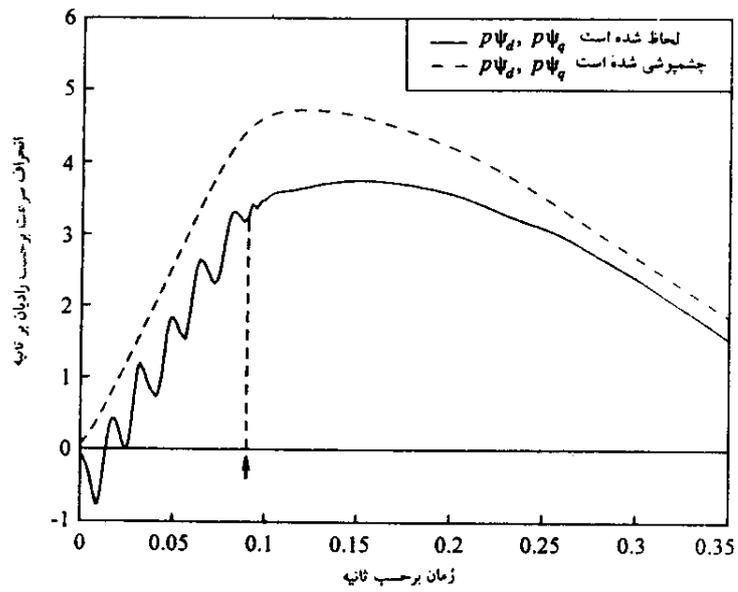
خطای سه فاز در F که با باز شدن خط ۲ در ۰/۰۹ ثانیه، رفع می‌شود.

$L_{ad} = 1.0$	$L_{aq} = 0.6$	$L_l = 0.18$	$L_{fd} = 0.13$
$L_{1d} = 0.11$	$L_{1q} = 0.13$	$R_a = 0.005$	$R_{fd} = 0.00075$
$R_{1d} = 0.02$	$R_{1q} = 0.04$	$H = 3.5$	

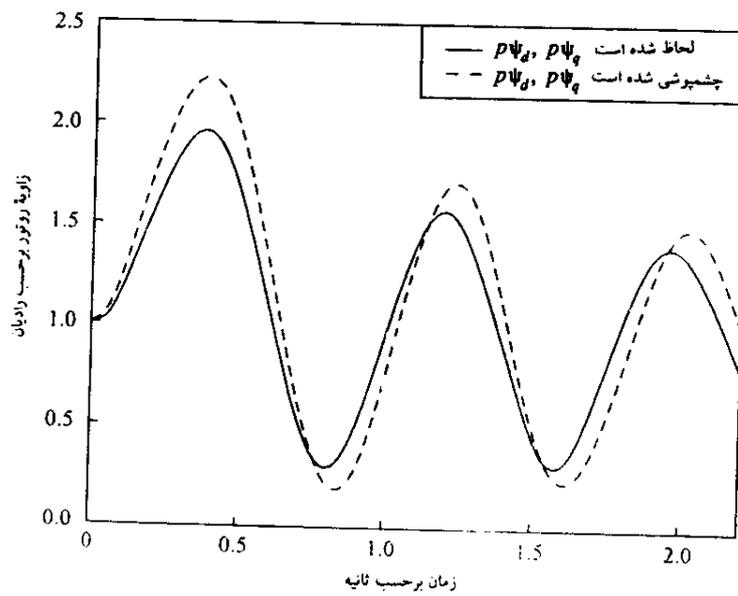
شکل ۱-۵ ترکیب و پارامترهای سیستم



شکل ۲-۵ تأثیر چشمپوشی از گذراهای استاتور برگشتاور فاصله هوایی و مؤلفه‌های d-q مربوط به جریانهای استاتور



شکل ۳-۵ تأثیر چشمپوشی از گذراهای استاتور بر انحراف سرعت



شکل ۴-۵ تأثیر چشمپوشی از گذراهای استاتور بر نوسانهای زاویه روتور

با وجود این، در مطالعات عملی پایداری سیستمهای قدرت، معمولاً به دلایل ذیل، تأثیر گشتاور بازدارنده یکطرفه و گشتاور نوسانی را در نظر نمی‌گیرند:

الف) خطاهای چند فاز اغلب به صورت رشته‌ای اتفاق می‌افتند بدین صورت که از یک خطای تک فاز شروع شده، به خطای دو فاز یا سه فاز ختم می‌شوند. اگر قرار بود هر فاز، زمانی که ولتاژ آن به اوج موج ولتاژ می‌رسید، درگیر می‌شد، جریان اتصال کوتاه  $90^\circ$  پس فاز می‌بود و بنابراین به صورت یک موج سینوسی از صفر شروع می‌شد. در چنین حالتی نیازی به مؤلفه جریان مستقیم در جریان اتصال کوتاه نیست. نتایج ثبت شده از جریانهای واقعی اتصال کوتاه، دامنه مؤلفه جریان مستقیم را بسیار کم نشان می‌دهند. از این رو نمی‌توان به وجود مؤلفه باز دارنده به منظور کمک به پایداری تکیه کرد.

ب) اگر حتی مقداری مؤلفه جریان مستقیم نیز وجود داشته باشد، چشمپوشی از آن منجر به محافظه کاری کمی می‌شود.

با چشمپوشی از عکس‌العمل گذرای استاتور، معادلات در مبنای واحد ولتاژ استاتور ۳-۱۲۰ و ۳-۱۲۱ به صورت معادلات جبری زیر در می‌آیند:

$$e_d = -\Psi_q \omega_r - R_a i_d \quad (1-5)$$

$$e_q = -\Psi_d \omega_r - R_a i_q \quad (2-5)$$

### ۵-۱-۲ چشمپوشی از تأثیر تغییرات سرعت بر ولتاژهای استاتور

فرض ساده سازی دیگری که معمولاً استفاده می‌شود این است که در معادلات ولتاژ استاتور، مقدار در مبنای واحد  $\omega_r$ ، مساوی  $1/5$  است. این بدان مفهوم نیست که سرعت، ثابت است بلکه فرض می‌کند که تغییرات سرعت، کم است و تأثیر چندانی بر ولتاژ ندارد. فرض  $\omega_r = 1/5$  (یا  $\omega_r = \omega_m \text{ rad/s}$ ) در معادلات ولتاژ استاتور به خودی خود بسادگی محاسبات کمک نمی‌کند. دلیل اصلی برای قبول این فرض آن است که تأثیر چشمپوشی از عبارات  $p\Psi_q$  و  $p\Psi_d$  را تا جایی که نوسانهای فرکانس پایین روتور مد نظر است، خنثی می‌نماید [۷ و ۸]. این موضوع را در مثال ۵-۱ نشان خواهیم داد.

با فرض  $\omega_r = 1/5$ ، معادلات ولتاژ استاتور به صورت زیر در می‌آیند:

$$e_d = -\Psi_q - R_a i_d \quad (۳-۵)$$

$$e_q = +\Psi_d - R_a i_q \quad (۴-۵)$$

تمام معادلات دیگری که در بخش ۳-۴-۹ خلاصه شدند (معادلات ۳-۱۲۳ تا ۳-۱۳۴) به همان صورت باقی می‌مانند. مرتب کردن معادلات ماشین به صورتی که در مطالعات پایداری اغتشاش کوچک و گذرا مناسب باشد، در فصول دوازدهم و سیزدهم بیان خواهد شد.

رابطه بین  $P_e$  و  $T_e$  در مبنای واحد

در مبنای واحد، توان الکتریکی پایانه برابر است با:

$$P_t = e_d i_d + e_q i_q$$

با جایگزینی  $e_d$  و  $e_q$  از معادلات ۳-۵ و ۴-۵ داریم:

$$\begin{aligned} P_t &= (-\Psi_q - R_a i_d) i_d + (\Psi_d - R_a i_q) i_q \\ &= (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) - R_a (i_d^2 + i_q^2) \\ &= T_e - R_a I_t^2 \end{aligned} \quad (۵-۵)$$

توان فاصله هوایی که به دنبال مقاومت  $R_a$  اندازه‌گیری می‌شود، برابر است با:

$$\begin{aligned} P_e &= P_t + R_a I_t^2 \\ &= T_e \end{aligned} \quad (۶-۵)$$

در حقیقت در مبنای واحد، توان فاصله هوایی ( $P_e$ ) محاسبه شده، همان توان در سرعت سنکرون است و مساوی گشتاور فاصله هوایی ( $T_e$ ) در مبنای واحد است. معمولاً  $P_e = \omega_r T_e$  است. اما مشاهده می‌شود که فرض  $\omega_r = 1/0 \text{ pu}$  در معادله ولتاژ استاتور در معادله گشتاور هم منعکس شده و باعث مساوی شدن  $T_e$  و  $P_e$  شده است. معمولاً به این حقیقت توجه نمی‌شود.

### مثال ۱-۵

با فرض مساوی صفر بودن مقاومت آرمیچر، نشان دهید که در اغتشاشهای کوچک، تأثیر چشمپوشی از تغییرات سرعت (یعنی فرض  $\omega_r = \omega_s$ ) در معادلات ولتاژ استاتور باعث خنثی

شدن تأثیر چشمپوشی از عبارات  $p\Psi_d$  و  $p\Psi_q$  می‌شود.

حل

اگر  $R_s=0$  و  $t$  (زمان) بر حسب ثانیه باشد، معادلات ولتاژ استاتور (۳-۱۲۰ و ۳-۱۲۱) به صورت زیر درمی‌آیند:

$$e_d = \frac{1}{\omega_s} p\Psi_d - \Psi_q \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (م ۱-۵)$$

$$e_q = \frac{1}{\omega_s} p\Psi_q + \Psi_d \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (م ۲-۵)$$

که  $\omega_s$  و  $\omega_r$  بر حسب رادیان بر ثانیه هستند. در تغییرات کوچک:

$$\Delta e_d = \frac{1}{\omega_s} p(\Delta\Psi_d) - \Delta\Psi_q - \Psi_q \frac{\Delta\omega_r}{\omega_s} \quad (م ۳-۵)$$

$$\Delta e_q = \frac{1}{\omega_s} p(\Delta\Psi_q) + \Delta\Psi_d + \Psi_d \frac{\Delta\omega_r}{\omega_s} \quad (م ۴-۵)$$

از آنجا که:

$$e_d = E_t \sin \delta \quad (م ۵-۵)$$

$$e_q = E_t \cos \delta \quad (م ۶-۵)$$

در حالت ماندگار، در معادلات ۱-۵ و ۲-۵، عبارات مشتق وجود ندارد در نتیجه:

$$e_{d,0} = E_t \sin \delta_0 = -\Psi_{q,0}$$

$$e_{q,0} = E_t \cos \delta_0 = \Psi_{d,0}$$

بنابراین، برای تغییرات کوچک، معادلات ۵-۵ و ۶-۵ به صورت زیر خواهند شد:

$$\Delta e_d = (E_t \cos \delta_0) \Delta\delta = \Psi_{d,0} \Delta\delta \quad (م ۷-۵)$$

$$\Delta e_q = -(E_t \sin \delta_0) \Delta\delta = \Psi_{q,0} \Delta\delta \quad (م ۸-۵)$$

از معادلات ۳-۵، ۴-۵، ۷-۵ و ۸-۵ و با توجه به اینکه  $\Delta\omega_r = p(\Delta\delta)$  می‌توان نوشت:

$$\Psi_{d,0} \Delta\delta = \frac{1}{\omega_s} p(\Delta\Psi_d) - \Delta\Psi_q - \Psi_{q,0} \frac{1}{\omega_s} p(\Delta\delta) \quad (م ۹-۵)$$

$$\Psi_{q_0} \Delta \delta = \frac{1}{\omega_s} p (\Delta \Psi_q) + \Delta \Psi_d + \Psi_{d_0} \frac{1}{\omega_s} p (\Delta \delta) \quad (م ۱۰-۵)$$

اکنون عبارات مربوط به  $\Delta e_q$  و  $\Delta e_d$  (معادلات ۷-۵ م و ۸-۵ م) را با و بدون تأثیر جملات  $p \Delta \Psi$  و  $p \Delta \delta$  مورد بررسی قرار می‌دهیم:

الف) با در نظر گرفتن هر دو جمله  $p(\Delta \Psi)$  و  $p(\Delta \delta)$ ، معادله ۹-۵ م را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta \delta = \frac{\frac{1}{\omega_s} p (\Delta \Psi_d) - \Delta \Psi_q}{\Psi_{d_0} + \frac{\Psi_{q_0}}{\omega_s} p} \quad (م ۱۱-۵)$$

از معادله ۱۰-۵ م داریم:

$$\Delta \Psi_d = (\Psi_{q_0} - \frac{\Psi_{d_0}}{\omega_s} p) \Delta \delta - \frac{1}{\omega_s} p (\Delta \Psi_q) \quad (م ۱۲-۵)$$

با جایگزینی از معادله ۱۲-۵ م در معادله ۱۱-۵ م و با مرتب کردن و ساده‌سازی، خواهیم داشت:

$$\Psi_{d_0} \Delta \delta = -\Delta \Psi_q \quad (م ۱۳-۵)$$

به طور مشابه، از معادله ۱۰-۵ م:

$$\Delta \delta = \frac{\frac{1}{\omega_s} p (\Delta \Psi_q) + \Delta \Psi_d}{\Psi_{q_0} - \frac{\Psi_{d_0}}{\omega_s} p} \quad (م ۱۴-۵)$$

و از معادله ۹-۵ م:

$$\Delta \Psi_q = -(\Psi_{d_0} + \frac{\Psi_{q_0}}{\omega_s} p) \Delta \delta + \frac{1}{\omega_s} p (\Delta \Psi_d) \quad (م ۱۵-۵)$$

با جایگزینی از معادله ۱۵-۵ م در معادله ۱۴-۵ م و نیز با مرتب کردن و ساده‌سازی، خواهیم داشت:

$$\Psi_{q_0} \Delta \delta = \Delta \Psi_d \quad (م ۱۶-۵)$$

ب) با چشمپوشی از هر دو جمله  $p(\Delta\psi)$  و  $p(\Delta\delta)$  ،  
با  $p\Delta\psi_d = p\Delta\psi_q = p\Delta\delta = 0$  ، معادلات ۹-۵ م و ۱۰-۵ م به صورت زیر درمی آیند:

$$\psi_{d0} \cdot \Delta\delta = -\Delta\psi_q \quad (م\ ۱۷-۵)$$

$$\psi_{q0} \cdot \Delta\delta = \Delta\psi_d \quad (م\ ۱۸-۵)$$

که عیناً شبیه معادلات ۱۳-۵ م و ۱۶-۵ م هستند.

ج) با چشمپوشی فقط از جمله  $p(\Delta\psi)$  ،  
از معادله ۹-۵ م و با چشمپوشی از جمله  $p\psi_d$  ، خواهیم داشت:

$$\psi_{d0} \cdot \Delta\delta = -\Delta\psi_q - \frac{\psi_{q0}}{\omega_s} p(\Delta\delta)$$

بنابراین:

$$\Delta\delta = - \frac{\Delta\psi_q}{\psi_{d0} + \frac{\psi_{q0}}{\omega_s} p}$$

با ضرب طرفین در  $\psi_{d0}$  خواهیم داشت:

$$\psi_{d0} \cdot \Delta\delta = -\Delta\psi_q \left[ \frac{\psi_{d0}}{\psi_{d0} + \frac{\psi_{q0}}{\omega_s} p} \right] \quad (م\ ۱۹-۵)$$

به طور مشابه از معادله ۱۰-۵ م و با چشمپوشی از عبارت  $p\psi_q$  ، می توان نشان داد که:

$$\psi_{q0} \cdot \Delta\delta = \Delta\psi_d \left[ \frac{\psi_{q0}}{\psi_{q0} + \frac{\psi_{d0}}{\omega_s} p} \right] \quad (م\ ۲۰-۵)$$

دو معادله فوق با معادلات ۱۳-۵ م و ۱۶-۵ م متفاوت هستند.

د) با چشمپوشی فقط از جمله  $p(\Delta\delta)$  ،  
زمانی که  $p\Delta\delta = 0$  باشد، از معادله ۹-۵ م داریم:

$$\Psi_d \cdot \Delta\delta = \frac{1}{\omega_s} p(\Delta\Psi_d) - \Delta\Psi_q \quad (م\ ۲۱-۵)$$

و از معادله ۵-۱۰ م خواهیم داشت:

$$\Psi_q \cdot \Delta\delta = \frac{1}{\omega_s} p(\Delta\Psi_q) + \Delta\Psi_d \quad (م\ ۲۲-۵)$$

یا:

$$\Delta\Psi_d = \Psi_q \cdot \Delta\delta - \frac{1}{\omega_s} p(\Delta\Psi_q) \quad (م\ ۲۳-۵)$$

با جایگزینی از معادله ۵-۲۳ م در معادله ۵-۲۱ م نتیجه می شود که:

$$\Psi_d \cdot \Delta\delta = \frac{1}{\omega_s} p(\Psi_q \cdot \Delta\delta - \frac{p}{\omega_s} \Delta\Psi_q) - \Delta\Psi_q$$

با مرتب کردن و گروه بندی جمله های شامل  $\Delta\delta$  ، خواهیم داشت:

$$\Psi_d \cdot \Delta\delta = -\Delta\Psi_q \left[ \Psi_d \cdot \frac{1 + p^2/\omega_s^2}{\Psi_d \cdot - \Psi_q \cdot \frac{p}{\omega_s}} \right] \quad (م\ ۲۴-۵)$$

به طور مشابه:

$$\Psi_q \cdot \Delta\delta = \Delta\Psi_d \left[ \Psi_q \cdot \frac{1 + p^2/\omega_s^2}{\Psi_q \cdot + \Psi_d \cdot \frac{p}{\omega_s}} \right] \quad (م\ ۲۵-۵)$$

مجدداً مشاهده می شود که معادلات فوق با معادلات ۵-۱۳ م و ۵-۱۶ م متفاوت است. مشاهده می کنیم که عبارات  $\Delta e_d$  (یعنی  $\Psi_d \cdot \Delta\delta$ ) و  $\Delta e_q$  (یعنی  $\Psi_q \cdot \Delta\delta$ ) زمانی که هر دو جمله  $p(\Delta\delta)$  و  $p(\Delta\Psi)$  لحاظ شوند مساوی حالتی است که از هر دو عبارت مزبور (و نه فقط یکی از آنها) چشمپوشی شود. بنابراین تأثیر چشمپوشی از عبارات  $p(\Delta\delta)$  ، خنثی کردن تأثیر چشمپوشی از جمله  $p(\Delta\Psi)$  است.

## ۵-۲ مدل ساده شده با چشمپوشی از سیم پیچهای میراکننده

اولین درجه ساده سازی در مدل ماشین سنکرون، چشمپوشی از تأثیر سیم پیچهای میراکننده

است. این موضوع باعث حداقل کردن داده‌های مورد نیاز می‌شود زیرا اغلب پارامترهای ماشین که مربوط به این تأثیرات است، در دسترس نیستند. بعلاوه این موضوع باعث می‌شود که درجه مدل، کاهش یافته، در شبیه‌سازی، اجازه انتخاب گامهای بزرگتر برای انتگرال گیری فراهم شود و بدین صورت زمان محاسبات کاهش یابد.

با چشمپوشی از سیم‌پیچهای میراکننده، معادلات ولتاژ استاتور (معادلات ۳-۵ و ۴-۵) تغییری نمی‌کنند اما سایر معادلات (۳-۳ تا ۳-۱۳۳) به صورت زیر ساده می‌شوند:

شاردور:

$$\Psi_d = -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} \quad (۷-۵)$$

$$\Psi_q = -L_q i_q \quad (۸-۵)$$

$$\Psi_{fd} = -L_{ad} i_d + L_{ffd} i_{fd} \quad (۹-۵)$$

ولتاژ روتور:

$$e_{fd} = p\Psi_{fd} + R_{fd} i_{fd}$$

یا:

$$p\Psi_{fd} = e_{fd} - R_{fd} i_{fd} \quad (۱۰-۵)$$

اکنون معادله ۱۰-۵ تنها معادله دیفرانسیل مربوط به مشخصه‌های الکتریکی ماشین است. در معادلات فوق، تمام کمیتها و از جمله زمان، بر حسب مبنای واحد هستند.

### شکل جایگزین معادلات ماشین

در اغلب مقالات مربوط به ماشینهای سنکرون، معادلات ۷-۵ تا ۱۰-۵ بر حسب متغیرهای زیر نوشته می‌شود:

$$E_f = L_{ad} i_{fd} \quad ; \quad \text{ولتاژ متناسب با } i_{fd}$$

$$E'_q = \frac{L_{ad}}{L_{ffd}} \Psi_{fd} \quad ; \quad \text{ولتاژ متناسب با } \Psi_{fd}$$

$$E_{fd} = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} e_{fd} \quad ; \quad \text{ولتاژ متناسب با } e_{fd}$$

بر حسب متغیرهای جدید، معادله ۷-۵ به صورت زیر خواهد شد:

$$\Psi_d = -L_d i_d + E_1 \quad (11-5)$$

با ضرب طرفین معادله ۹-۵ در  $L_{ad}/L_{ffd}$  و با استفاده از متغیرهای جدید داریم:

$$E'_q = -\frac{L_{ad}}{L_{ffd}} i_d + E_1 \quad (12-5)$$

از آنجا که از معادله ۴-۲۹ داشتیم:

$$\begin{aligned} L'_d &= L_1 + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \\ &= (L_d - L_{ad}) + \frac{L_{ad} L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \\ &= L_d - \frac{L_{ad}}{L_{ffd}} \end{aligned}$$

بنابراین:

$$L_d - L'_d = \frac{L_{ad}}{L_{ffd}}$$

با جایگزینی در معادله ۱۲-۵ نتیجه می شود که:

$$E'_q = E_1 - (L_d - L'_d) i_d \quad (13-5)$$

با ضرب طرفین معادله ۵-۱۰ در  $L_{ad}/L_{ffd}$ ، خواهیم داشت:

$$p \left[ \frac{L_{ad}}{L_{ffd}} \Psi_{fd} \right] = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} \frac{R_{fd}}{L_{ffd}} e_{fd} - \frac{R_{fd}}{L_{ffd}} L_{ad} i_{fd}$$

که بر حسب متغیرهای جدید داریم:

$$pE'_q = \frac{1}{T'_d} (E_{fd} - E_1) \quad (14-5)$$

که  $T_d'$  ثابت زمانی گذرای مدار باز (تعریف شده در بخش ۴-۲) است. معادلات در صورت جایگزین در اینجا خلاصه شده‌اند:

$$\begin{aligned}\psi_d &= -L_d i_d + E_1 \\ \psi_q &= -L_q i_q \\ E_q' &= E_1 - (L_d - L_d') i_d \\ pE_q' &= \frac{1}{T_d'} (E_{fd} - E_1)\end{aligned}$$

شکل فوق برای نمایش ماشین سنکرون در بسیاری از برنامه‌های پایداری، بخصوص برنامه‌های قدیمی‌تر استفاده شده است. در این شکل  $E_q'$ ، متغیر حالت به جای  $\psi_{fd}$  است. به طریقی، این روش، انتقال روشهای مورد استفاده در دوران تحلیلگرهای شبکه است. همچنان که در به دست آوردن نمودار فازوری خواهیم دید،  $E_q'$ ، مؤلفه ولتاژ محور  $q$  متصل به راکتانس گذاری  $X_d'$  است. بنابراین استفاده از  $E_q'$  به عنوان متغیر حالت اجازه می‌دهد که مدل کلاسیک به منظور احتساب تأثیر دینامیک مدار تحریک، تقویت شود. باید توجه کرد که پارامترهای  $L_q$ ،  $L_d$  و  $T_d'$  که در این معادلات ظاهر شده‌اند، تابعی از اشباع مغناطیسی هستند.

#### نمودار فازوری حالت گذرا

از آنجا که فقط مؤلفه‌های فرکانس اصلی کمیت‌های استاتور را به حساب می‌آوریم، می‌توان از نمایش فازوری برای بیان حالت گذرا استفاده کرد. به منظور انجام این کار، ابتدا لازم است که  $E_q'$ ،  $E_1$  و  $E_q$  را بر حسب مؤلفه‌های  $d$  و  $q$  ولتاژ و جریان پایانه، بیان نمود. چون، در مبنای واحد  $X_d = L_d$  است، از معادلات ۴-۵ و ۵-۷ داریم:

$$\begin{aligned}e_q &= \psi_d - R_a i_q \\ &= -X_d i_d + X_{qd} i_{fd} - R_a i_q \\ &= -X_d i_d + E_1 - R_a i_q\end{aligned}$$

بنابراین:

$$E_1 = e_q + X_d i_d + R_a i_q$$

با ضرب طرفین در  $j$ ، خواهیم داشت:

$$jE_1 = je_q + jX_d i_d + jR_a i_q$$

که در شکل فازوری:

$$\tilde{E}_1 = \tilde{e}_q + jX_d \tilde{i}_d + R_a \tilde{i}_q \quad (15-5)$$

از معادله ۵-۱۳ (با توجه به اینکه  $X'_d = L'_d$ ) است، داریم:

$$\begin{aligned} E'_q &= e_q + X_d i_d + R_a i_q - X_d i_d + X'_d i_d \\ &= e_q + X'_d i_d + R_a i_q \end{aligned}$$

با ضرب طرفین در  $j$ ، داریم:

$$jE'_q = je_q + jX'_d i_d + jR_a i_q$$

که در شکل فازوری:

$$\tilde{E}'_q = \tilde{e}_q + jX'_d \tilde{i}_d + R_a \tilde{i}_q \quad (16-5)$$

مشاهده می‌شود که فازورهای  $\tilde{E}_1$  و  $\tilde{E}'_q$  هر دو در راستای محور  $q$  قرار می‌گیرند. در بخش ۳-۶-۲ مشاهده شد که  $\tilde{E}_q$  نیز در راستای محور  $q$  است.

با جابجایی و مرتب کردن معادله ۳-۱۶۷ و جایگزینی  $X_{ad} i_{fd}$  با  $E_1$ ، داریم:

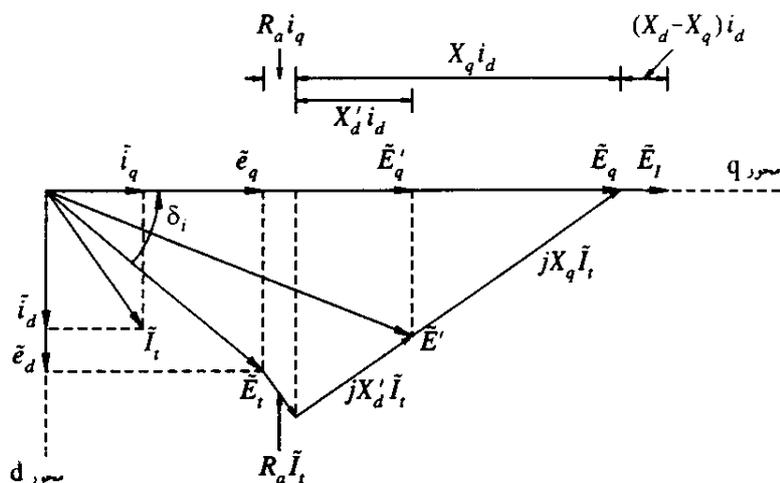
$$\tilde{E}_1 = \tilde{E}_q + j(X_d - X_q) \tilde{i}_d \quad (17-5)$$

شکل ۵-۵، نمودار فازوری  $\tilde{E}_q$ ،  $\tilde{E}_1$  و  $\tilde{E}'_q$  (معادلات ۵-۱۵ تا ۵-۱۷) را نشان می‌دهد.

### ۵-۳ مدل با شار دور ثابت

#### ۵-۳-۱ مدل کلاسیک

در مطالعاتی که زمان مطالعه نسبت به  $T'_d$  کوچک است، اغلب می‌توان با ثابت فرض کردن  $E'_q$  (یا  $\Psi_{fd}$ ) در طول دوره مطالعه، مدل ماشین بخش ۵-۲ را ساده کرد. این فرض باعث می‌شود که تنها معادله دیفرانسیل مربوط به مشخصه الکتریکی ماشین، حذف شود. فرض دیگری که مدل ماشین را تا حد زیادی ساده می‌کند این است که با فرض  $X'_d = X'_q$  از برجستگی قطب در حالت گذرا صرف نظر شود و بعلاوه فرض شود که شار دور  $\Psi_{1q}$  (مربوط به مدار روتور محور  $q$ ) مطابق با  $X'_q$ ، ثابت باشد. با این فرضیات، همچنان که نشان خواهیم داد، ولتاژ متصل به



$$\begin{aligned} \vec{E}_t &= e_d + je_q = \vec{e}_d + \vec{e}_q \\ \vec{E}' &= \vec{E}_t + (R_a + jX'_d)\vec{I}_t \\ \vec{E}'_q &= \vec{E}' \text{ مؤلفه محور } q \text{ مربوط به } \vec{E}' \\ &= \vec{e}_q + R_a \vec{i}_q + jX'_d \vec{i}_d \\ \vec{E}_q &= R_a + jX_q \text{ ولتاژ قبل از } \\ &= \vec{E}_t + (R_a + jX_q)\vec{I}_t \\ &= \vec{e}_q + R_a \vec{i}_q + jX_q \vec{i}_d \\ \vec{E}_t &= \vec{E}_q + j(X_d - X_q)\vec{i}_d \end{aligned}$$

شکل ۵-۵ نمودار فازوری ماشین سنکرون برحسب  $E'_q, E_t, E_q$

امپدانس گذرای  $R_a + jX'_d$ ، دامنه ثابتی خواهد داشت.

مدارهای معادل دو محور  $d$  و  $q$  زمانی که در هر محور یک مدار وجود دارد در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. شاردهای محور  $d$  در مبنای واحد به صورت زیر است:

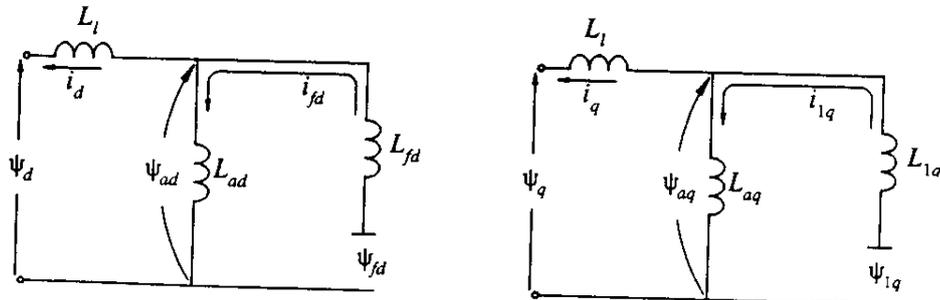
$$\Psi_{ad} = -L_{ad} i_d + L_{ad} i_{fd} \quad (۱۸-۵)$$

$$\Psi_d = \Psi_{ad} - L_l i_d \quad (۱۹-۵)$$

$$\Psi_{fd} = \Psi_{ad} + L_{fd} i_{fd} \quad (۲۰-۵)$$

از معادله ۲۰-۵ داریم:

$$i_{fd} = \frac{\Psi_{fd} - \Psi_{ad}}{L_{fd}} \quad (۲۱-۵)$$



شکل ۵-۶ مدارهای معادل محور  $d$  و  $q$  با یک مدار روتور در هر محور

با جایگزینی در معادله ۱۸-۵ خواهیم داشت:

$$\Psi_{ad} = -L_{ad} i_d + \frac{L_{ad}}{L_{fd}} (\Psi_{fd} - \Psi_{ad})$$

با بیان  $\Psi_{ad}$  بر حسب  $\Psi_{fd}$ ، داریم:

$$\Psi_{ad} = L'_{ad} \left[ -i_d + \frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} \right] \quad (22-5)$$

که:

$$L'_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}}} = L'_d - L_l \quad (23-5)$$

به طور مشابه برای محور q:

$$\Psi_{aq} = L'_{aq} \left[ -i_q + \frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} \right] \quad (24-5)$$

که:

$$L_{aq} = L'_d - L_l$$

از معادله ۱-۵، ولتاژ محور d استاتور برابر است با:

$$\begin{aligned} e_d &= -R_a i_d - \omega \Psi_q \\ &= -R_a i_d + \omega (L_l i_q - \Psi_{aq}) \end{aligned}$$

که  $\omega = \omega_r = \omega_s = 1/0$  در مبنای واحد است. با جایگزینی  $\Psi_{aq}$  از معادله ۲۴-۵ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} e_d &= -R_a i_d + \omega L_l i_q - \omega L'_{aq} \left[ -i_q + \frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} \right] \\ &= -R_a i_d + \omega (L_l + L'_{aq}) i_q - \omega L'_{aq} \left[ \frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} \right] \\ &= -R_a i_d + X'_q i_q + E'_d \end{aligned} \quad (25-5)$$

که:

$$E'_d = -\omega L'_{aq} \left[ \frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} \right] \quad (26-5)$$

به طور مشابه، ولتاژ محور d استاتور برابر است با:

$$e_q = -R_a i_q - X'_d i_d + E'_q \quad (27-5)$$

که:

$$E'_q = \omega L'_{ad} \left[ \frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} \right] \quad (28-5)$$

با صرف نظر کردن از برجستگی قطب در حالت گذرا ( $X'_d = X'_q$ )، ولتاژ پایانه استاتور برابر است با:

$$\begin{aligned} e_d + je_q &= (E'_d + jE'_q) - R_a(i_d + ji_q) + X'_d(i_q - ji_d) \\ &= (E'_d + jE'_q) - R_a(i_d + ji_q) - jX'_d(i_d + ji_q) \end{aligned}$$

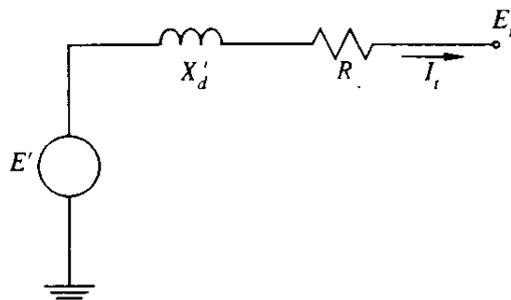
و با استفاده از نمایش فازوری، خواهیم داشت:

$$\tilde{E}_t = \tilde{E}' - (R_a + jX'_d) \tilde{I}_t \quad (29-5)$$

که:

$$\begin{aligned} \tilde{E}' &= E'_d + jE'_q \\ &= L'_{ad} \left[ -\frac{\Psi_{iq}}{L_{iq}} + j \frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} \right] \end{aligned}$$

مدار معادل حاصل در شکل ۷-۵ نشان داده شده است.

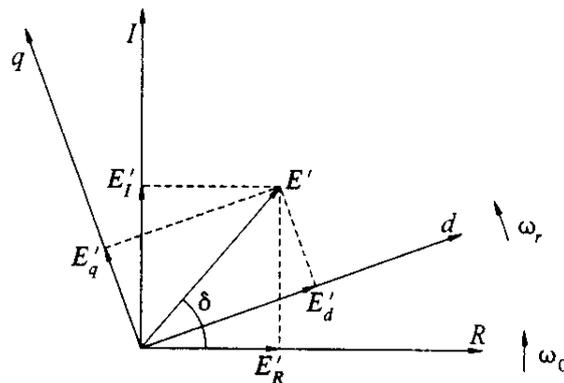


شکل ۷-۵ مدل ساده شده گذرا.

زمانی که شاردهای روتور ( $\Psi_{dq}$  و  $\Psi_{qd}$ ) ثابت باشند،  $E'_d$ ،  $E'_q$  و در نتیجه دامنه  $E'$  نیز ثابت خواهد بود. زمانی که سرعت روتور تغییر می‌کند، محورهای  $d$  و  $q$  نسبت به هر سیستم مختصات مرجع کلی که محورهای حقیقی و موهومی آن با سرعت سنکرون بچرخد، حرکت می‌کنند (شکل ۵-۸). بنابراین مؤلفه‌های  $E'_R$  و  $E'_I$  تغییر می‌کنند. دامنه  $E'$  را می‌توان با محاسبه مقدار آن قبل از وقوع اغتشاش به صورت زیر تعیین کرد:

$$\tilde{E}' = \tilde{E}_e + (R_0 + jX'_d) \tilde{I}_0$$

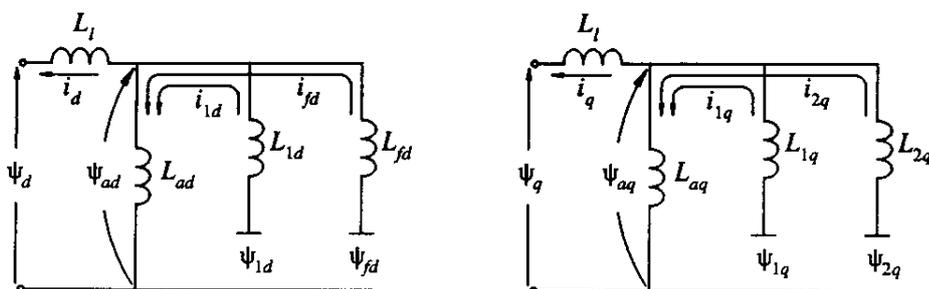
اینک فرض می‌شود که این دامنه، در طول مطالعه، مدت ثابت باقی می‌ماند. از آنجا که مقاومت  $R_0$ ، کوچک است معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود.



شکل ۵-۸ سیستمهای مختصات  $d-q$  و  $R-I$

وقتی که مؤلفه‌های  $E'_d$  و  $E'_q$  دارای دامنه ثابت باشند، زمانی که سرعت روتور تغییر می‌کند، راستای  $E'$  نسبت به محورهای  $d$  و  $q$  ثابت باقی می‌ماند. بنابراین می‌توان زاویه  $E'$  را نسبت به چارچوب مرجعی که با سرعت سنکرون می‌چرخد به عنوان اندازه زاویه روتور استفاده نمود. مدل به دست آمده از نظر محاسباتی بسیار ساده است و عملکرد الکتریکی گذرای ماشین را به صورت یک منبع ثابت ولتاژ متصل به یک راکتانس مؤثر، مدل می‌کند. از آنجا که این مدل در مطالعات اولیه پایداری به طور وسیع استفاده شده، به مدل کلاسیک موسوم است.

۵-۳-۲ مدل با شار دور ثابت و با در نظر گرفتن تأثیر مدارهای زیرگذرا با توجه به شکل ۵-۹، در صورتی که مدارهای زیرگذرا را در نظر بگیریم، رابطه‌ای که در بخش قبل برای شار دور فاصله‌هوائی محور طولی به دست آمد، به صورت زیر تغییر می‌کند:



شکل ۵-۹ مدارهای معادل با مدارهای زیرگذرا

$$\begin{aligned} \Psi_{ad} &= -L_{ad} i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \\ &= -L_{ad} i_d + \frac{L_{ad}}{L_{fd}} (\Psi_{fd} - \Psi_{ad}) + \frac{L_{ad}}{L_{1d}} (\Psi_{1d} - \Psi_{ad}) \quad (30-5) \\ &= L_{ad}'' \left[ -i_d + \frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\Psi_{1d}}{L_{1d}} \right] \end{aligned}$$

که:

$$L_{ad}'' = \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} = L_d'' - L_l \quad (31-5)$$

به طور مشابه، برای محور q داریم:

$$\Psi_{aq} = L_{aq}'' \left[ -i_q + \frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\Psi_{2q}}{L_{2q}} \right] \quad (32-5)$$

که:

$$L_{aq}'' = L_q'' - L_l$$

ولتاژ محور d استاتور برابر است با:

$$\begin{aligned} e_d &= -R_a i_d + \omega (L_l i_q - \Psi_{aq}) \\ &= -R_a i_d + \omega (L_l + L''_{aq}) i_q - \omega L''_{aq} \left( \frac{\Psi_{lq}}{L_{lq}} + \frac{\Psi_{rq}}{L_{rq}} \right) \quad (33-5) \\ &= -R_a i_d + X''_q i_q + E''_d \end{aligned}$$

به طور مشابه، ولتاژ محور q استاتور برابر است با:

$$e_q = -R_a i_q - X''_d i_d + E''_q \quad (34-5)$$

که:

$$E''_d = -\omega L''_{aq} \left[ \frac{\Psi_{lq}}{L_{lq}} + \frac{\Psi_{rq}}{L_{rq}} \right] \quad (35-5)$$

$$E''_q = \omega L''_{ad} \left[ \frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\Psi_{ld}}{L_{ld}} \right] \quad (36-5)$$

در صورتی که از برجستگی قطب در حالت زیرگذرا صرف نظر شود  $(X''_d = X''_q)$ ، داریم:

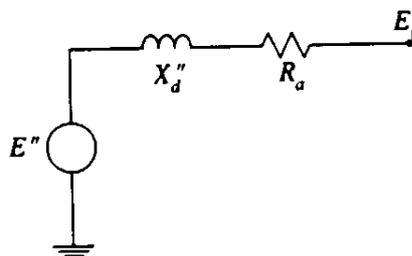
$$\begin{aligned} \tilde{E}_t &= e_d + j e_q \\ &= (E''_d + j E''_q) - (R_a + j X''_d) (i_d + j i_q) \quad (37-5) \\ &= \tilde{E}'' - (R_a + j X''_d) \tilde{I}_t \end{aligned}$$

مدار معادل حاصل، در شکل ۵-۱۰ آمده است. اگر شاردهای روتور، ثابت باشند،  $E''_d$  و  $E''_q$  نیز ثابت هستند.

این مدل در برنامه‌های اتصال کوتاه برای محاسبه مقدار اولیه مؤلفه فرکانس اصلی جریانهای اتصال کوتاه به کار می‌رود. از آنجا که شاردهای روتور نمی‌تواند به طور لحظه‌ای تغییر نماید، مقدار  $E''$  مساوی مقدار قبل از اغتشاش آن است.

البته باید گفت که این مدل (شاردهای ثابت) به طور کلی در مطالعات پایداری قابل قبول نیست. علت آن است که نسبت به دوره زمانی مورد مطالعه، ثابتهای زمانی زیرگذرای مربوط به میرایی

$\Psi_{1d}$  و  $\Psi_{2q}$  بسیار کوچک است و از این رو فرض ثابت ماندن شاردهای روتور، شامل مدارهای زیرگذرا، منطقی نیست. اما اگر تغییرات شاردهای روتور به حساب آید (که در آن حالت، دامنه  $E''$  طبق معادلات ۳-۱۲۳ و ۳-۱۲۶ تغییر می‌کند) آنگاه، مدل، قابل قبول است.



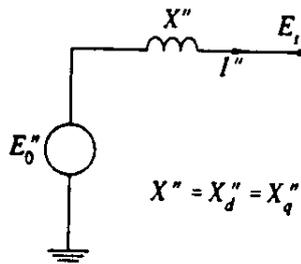
شکل ۵-۱۰ مدل ساده شده برای دوره زیرگذرا

### ۳-۳-۵ خلاصه‌ای از مدل‌های ساده شده برای بازه‌های زمانی مختلف

در شکل ۵-۱۱ مدل‌های ساده شده ماشین سنکرون در سه بازه زمانی زیرگذرا، گذرا و ماندگار به تصویر کشیده شده است. مدل حالت ماندگار در فصل سوم (بخش ۳-۶-۴) به دست آمد و از آنجا که ساختار مشابه به حالت‌های زیرگذرا و گذرا دارد، در اینجا نشان داده شده است. در حالت‌های گذرا و زیرگذرا، شاردهای روتور ثابت و در حالت ماندگار، جریان ثابت تحریک فرض شده است. در این مدل‌ها از تأثیر برجستگی قطبها و مقاومت استاتور صرف نظر شده و در نتیجه از نظر ساختاری و محاسباتی بسیار ساده شده‌اند.

### ۴-۵ حدود قابلیت تولید توان راکتیو در ماشین سنکرون

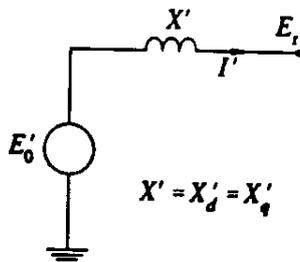
در مطالعات پایداری ولتاژ و پایداری بلند مدت، حدود قابلیت تولید توان راکتیو به وسیله ماشین سنکرون، اهمیت دارد. در این بخش، منحنی‌های قابلیت فوق را (که حدود را مشخص می‌کنند) به دست می‌آوریم.



$E_0''$ ، مقدار قبل از اغتشاش ولتاژ داخلی است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$\vec{E}_0'' = \vec{E}_{r0} + jX''\vec{I}_{r0}$$

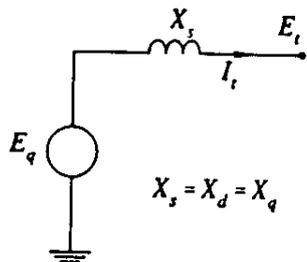
(الف) مدل زیرگذرا



$E_0'$ ، ولتاژ داخلی است.

$$\vec{E}_0' = \vec{E}_{r0} + jX'\vec{I}_{r0}$$

(ب) مدل گذرا



$$\vec{E}_q = \vec{E}_{r0} + jX_s\vec{I}_{r0}$$

$$|E_q| = X_{ad}i_{fd} = E_f$$

(ج) مدل حالت ماندگار

شکل ۵-۱۱ مدل‌های ساده ماشین سنکرون

### ۵-۴-۱-۵ منحنیهای قابلیت تولید توان راکتیو

ظرفیت نامی ماشینهای سنکرون بر حسب مگاوات آمپر خروجی در ولتاژ و ضریب توان مشخص (معمولاً ۰/۸۵ تا ۰/۹ پس فاز) که ماشین بدون افزایش غیرقابل قبول درجه حرارت

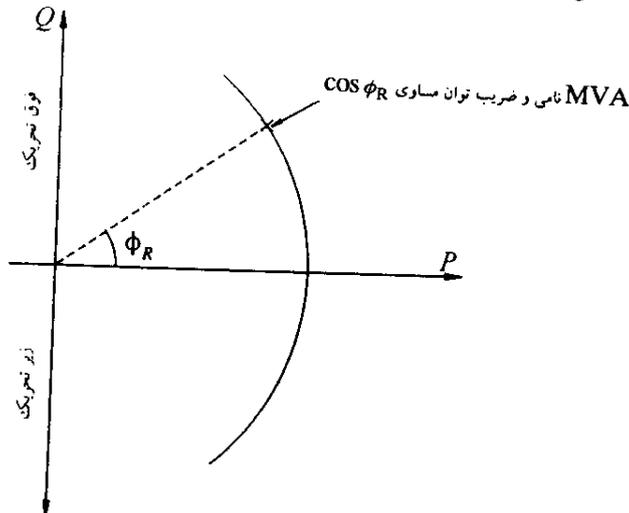
می تواند به طور پیوسته کار کند، بیان می شود. خروجی توان حقیقی ماشین به توانایی توربین و در محدوده مگاوات آمپر نامی ماشین، محدود می گردد. قابلیت تولید پیوسته توان راکتیو ماشین، با توجه به سه معیار: حد جریان آرمیچر، حد جریان تحریک و حد گرمایی ناحیه انتهایی آرمیچر، تعیین می شود.

#### حد جریان آرمیچر

جریان آرمیچر منجر به تلفات  $RI^2$  می شود و باید به نحوی انرژی مربوط به این تلفات را خارج کرد تا دمای هادیها و محیط اطراف، محدود باقی بماند. بنابراین یکی از محدودیتهای ظرفیت نامی ژنراتور، حداکثر جریانی است که آرمیچر می تواند بدون خارج شدن از حد دما، تحمل نماید. توان ظاهری ماشین در منبای واحد برابر است با:

$$S = P + jQ = \vec{E}_t \vec{I}_t^* \\ = |E_t| |I_t| (\cos \phi + j \sin \phi)$$

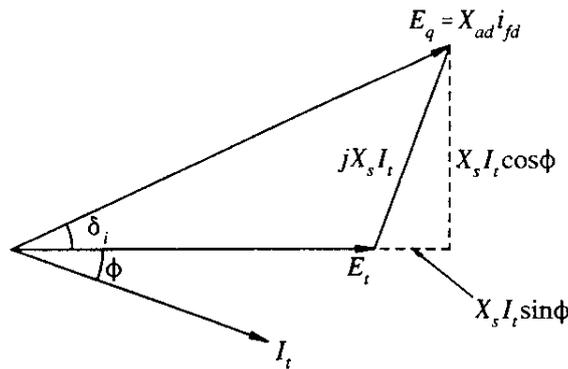
که  $\phi$ ، زاویه ضریب توان است. بنابراین در صفحه P-Q، حد جریان آرمیچر به صورت دایره ای با شعاع MVA نامی و به مرکز مبدأ مختصات خواهد بود (شکل ۵-۱۲).



شکل ۵-۱۲ حد گرمایی جریان آرمیچر

## حد جریان تحریک

دومین محدودیت بر بهره‌برداری از ماشین را جریان تحریک به دلیل تلفات گرمایی حاصل از،  $R_{fd} \dot{i}_{fd}$  تحمیل می‌کند. مکان هندسی جریان تحریک ثابت را می‌توان با استفاده از مدار معادل حالت ماندگار (بخش ۳-۶-۴) که مجدداً در بخش ۳-۳-۵ بیان شده، به دست آورد. اگر  $X_d = X_q = X_s$  باشد، مدار معادل شکل ۱۱-۵ "ج"، رابطه بین  $E_t$ ،  $I_t$  و  $E_q$  (مساوی  $X_{ad} \dot{i}_{fd}$ ) را بیان می‌کند. نمودار فازوری مربوط (با صرف نظر کردن از مقاومت  $R_s$ )، در شکل ۱۳-۵ نشان داده شده است. اگر مؤلفه‌های در راستا و عمود بر  $\vec{E}_t$  را با هم مساوی قرار دهیم، داریم:



شکل ۱۳-۵ نمودار فازوری حالت ماندگار

$$(X_{ad} \dot{i}_{fd}) \sin \delta_i = X_s I_t \cos \phi \quad (38-5)$$

$$(X_{ad} \dot{i}_{fd}) \cos \delta_i = E_t + X_s I_t \sin \phi \quad (39-5)$$

با مرتب کردن، خواهیم داشت:

$$I_t \cos \phi = \frac{X_{ad} \dot{i}_{fd} \sin \delta_i}{X_s}$$

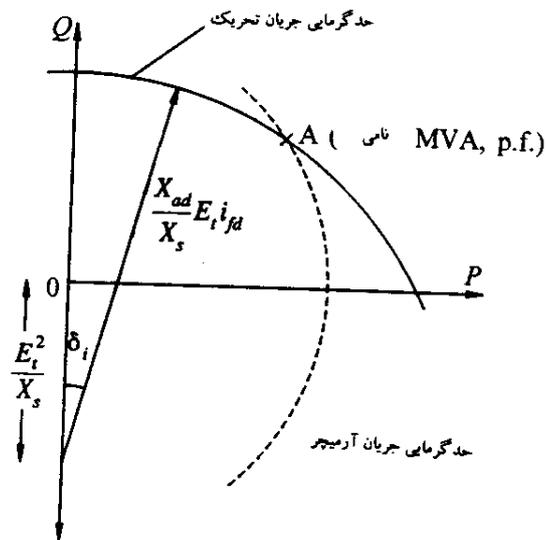
$$I_t \sin \phi = \frac{X_{ad} \dot{i}_{fd} \cos \delta_i - E_t}{X_s}$$

بنابراین:

$$P = E_t I_t \cos \phi = \frac{X_{ad}}{X_s} E_t i_{fd} \sin \delta_i \quad (40-5)$$

$$Q = E_t I_t \sin \phi = \frac{X_{ad}}{X_s} E_t i_{fd} \cos \delta_i - \frac{E_t^2}{X_s} \quad (41-5)$$

برای یک جریان تحریک مشخص، رابطه بین توانهای حقیقی و راکتیو، دایره‌ای به مرکز  $-E_t^2/X_s$  بر روی محور  $q$  و به شعاع  $(X_{ad}/X_s)E_t i_{fd}$  است. بنابراین، تأثیر حداکثر جریان نامی تحریک بر قابلیت تولید توان ماشین، در صفحه  $P-Q$  مطابق با شکل ۱۴-۵ خواهد بود. در هر طراحی متعادل، حدود گرمایی آرمیچر و تحریک در نقطه‌ای مانند  $A$  یکدیگر را قطع می‌کنند که نمایشگر ظرفیت مگاوات آمپر و ضریب توان نامی آن است.

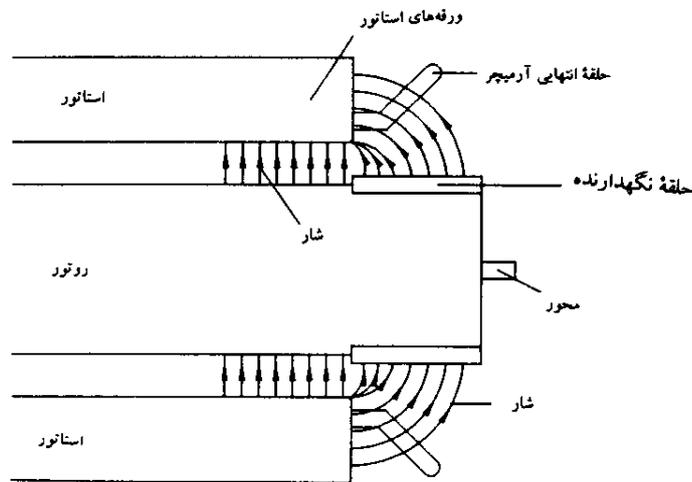


شکل ۱۴-۵ حد گرمایی جریان تحریک

### حد گرمایی ناحیه انتهایی آرمیچر<sup>۱</sup>

گرمای حاصل در ناحیه انتهایی آرمیچر ماشین، سومین محدودیت را بر بهره‌برداری از آن اعمال می‌کند. همچنان که توضیح خواهیم داد این حد، بر قابلیت تولید توان ماشین در حالت زیر تحریک اثر می‌گذارد.

شکل ۵-۱۵ نموداری از ناحیه انتهایی ژنراتور را نشان می‌دهد. شار این ناحیه، همچنان که در شکل نشان داده شده در جهتی عمود بر ورقه‌های استاتور وارد و خارج می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که جریانهای گردابی، ایجاد شده و در قسمت انتهایی ماشین تولید گرما کنند. جریانهای قوی تحریک متناظر با حالت فوق تحریک، حلقه حائل (نگهدارنده) را در اشباع نگاه می‌دارند به گونه‌ای که شارنشانی انتهایی، کم بماند.

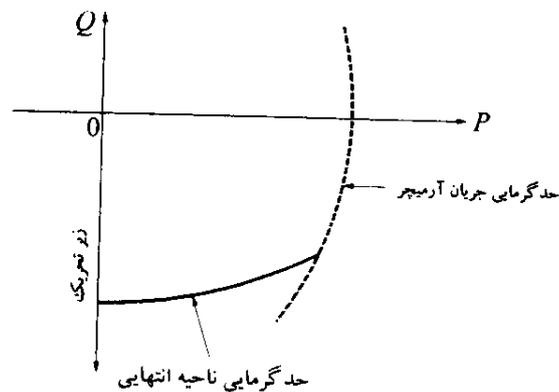


شکل ۵-۱۵ سطح مقطع ناحیه انتهایی ژنراتور

اما در حالت زیر تحریک، جریان تحریک کم است و حلقه نگهدارنده، اشباع نمی‌شود. این

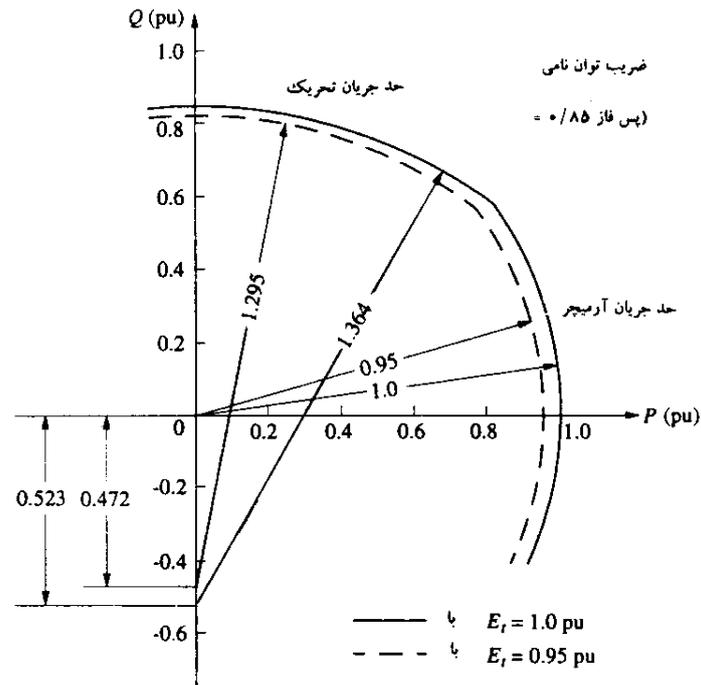
1. End Region Heating Limit

موضوع باعث می‌شود که شارنشستی ناحیه انتهایی آرمیچر، افزایش یابد [۹]. همچنین در حالت زیر تحریک، شار ایجاد شده ناشی از جریانهای آرمیچر با شار حاصل از جریان تحریک جمع می‌شود. از این رو، شار قسمت انتهایی، شار محوری این ناحیه را تقویت می‌کند که در نتیجه و بخصوص در مورد ماشین سنکرون روتور استوانه‌ای، باعث محدودیت شدید بر قابلیت تولید ماشین می‌شود. این موضوع در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده که همچنین حد تحمیل شده به وسیله تأثیر گرمایی جریان آرمیچر را شامل می‌شود.



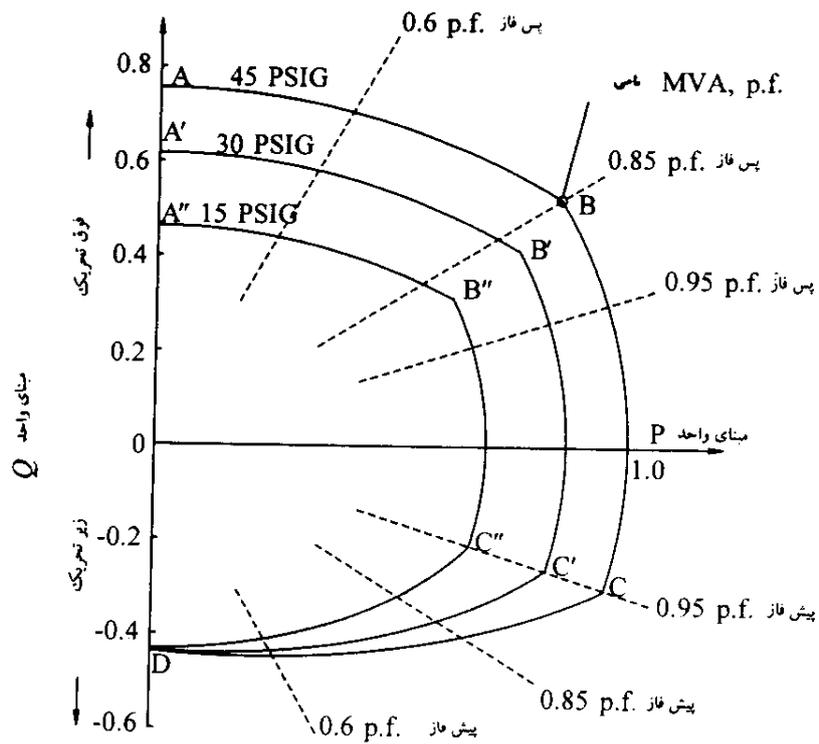
شکل ۵-۱۶ حد گرمایی ناحیه انتهایی

حدود گرمایی جریان تحریک و جریان آرمیچر در صفحه  $P-Q$ ، به ولتاژ آرمیچر بستگی دارد. شکل ۵-۱۷ این حدود را برای یک ماشین سنکرون  $588 \text{ MVA}$ ،  $22 \text{ kV}$  و  $0.85 \text{ pf}$  و برای دو مقدار ولتاژ آرمیچر  $1.0$  و  $0.95$  در مبنای واحد نشان می‌دهد. محدودیتهای بیان شده فوق، محدودیتهایی است که از قابلیتهای خود ماشین و از دید طراحی، بر عملکرد آن تحمیل می‌شود. ممکن است به علت مسائل پایداری سیستم قدرت، محدودیتهای اضافی نیز بر بهره‌برداری از ماشین اعمال گردد.



شکل ۵-۱۷ تأثیر کاهش ولتاژ آرمیچر بر منحنی قابلیت ژنراتور

شکل ۵-۱۸، منحنیهای قابلیت تولید توان راکتیو یک توربوژنراتور بخار ۴۰۰ مگاوات آمپری را که به کمک هیدروژن خنک می‌شود، نشان می‌دهد. تأثیر سیستم خنک کننده و در نتیجه قابلیت بارگذاری ماشین، به فشار هیدروژن بستگی دارد. در حالت نشان داده شده، توان ظاهری نامی ماشین برای زمانی است که فشار هیدروژن برابر با ۴۵ پوند بر اینچ مربع باشد. در هر فشار، پاره خط AB نشاندهنده حد گرمایی تحریک، پاره خط BC نشاندهنده حد گرمایی آرمیچر و پاره خط CD، نشاندهنده حد گرمایی ناحیه انتهایی ماشین است. همچنین بر روی شکل، مکان هندسی نقاط با ضریب توان ثابت، نشان داده شده است.



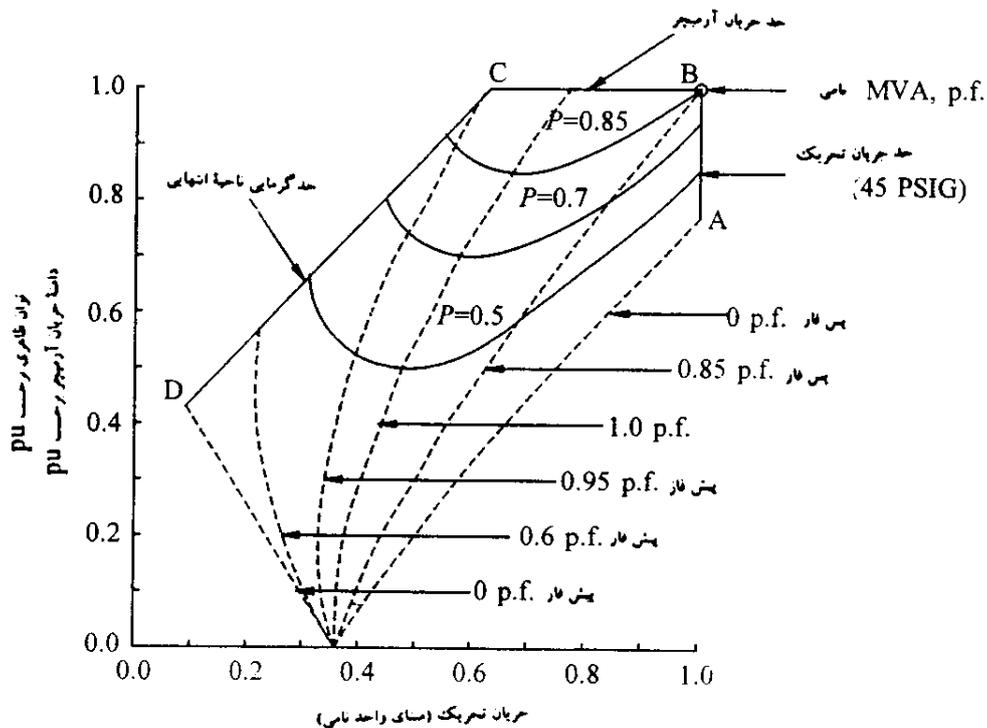
شکل ۵-۱۸ منحنیهای قابلیت توان راکتور ژنراتور با خنک ساز هیدروژنی در ولتاژ نامی

#### ۲-۴-۵ منحنیهای V و منحنیهای ترکیبی<sup>۱</sup>

همچنان که در مثال ۳-۴ مطرح شد، منحنی نشاندهنده رابطه بین جریان آرمیچر و جریان تحریک در یک ولتاژ پایانه ثابت و با توان حقیقی خروجی ثابت به منحنی V موسوم است.

1. Compounding

منحنیهای V مربوط به ژنراتور مذکور در بخش ۵-۴-۱ در شکل ۵-۱۹ و به صورت خطوط تیره برای سه مقدار P (۰/۵ pu ، ۰/۷ pu و ۰/۸۵ pu) رسم شده‌اند. خطوط مقطع، مکان هندسی نقاط با ضرایب توان ثابت هستند و به منحنیهای ترکیبی موسومند. هر یک از این منحنیها نشان می‌دهد که برای حفظ یک ضریب توان ثابت، جریان تحریک باید چگونه تغییر نماید.



شکل ۵-۱۹ منحنیهای V و منحنیهای ترکیبی ژنراتور در ولتاژ نامی آرمیچر

همچنان که در مثال ۳-۴ نشان داده شد، منحنیهای V و ترکیبی را می‌توان به سهولت با

استفاده از معادلات بخش ۳-۶-۵ و یا به طور تقریبی با استفاده از مدار معادل شکل ۵-۱۱ "ج" محاسبه کرد و به دست آورد.

همچنین در شکل ۵-۱۹، محدودیتهای مربوط به قابلیت تولید توان راکتیو برای مقدار خاصی از فشار هیدروژن (۴۵ پوند بر اینچ مربع)، رسم شده است. پاره‌خطهای AB، BC و CD به ترتیب مربوط به حد جریان تحریک، حد جریان آرمیچر و حد گرمایی ناحیه انتهایی آرمیچر است. از آنجا که مشخصه‌های نشان داده شده در شکل ۵-۱۹ مربوط به ولتاژ نامی پایانه است، مقادیر در مبنای واحد جریان آرمیچر و توان ظاهری خروجی با هم مساوی هستند و از این رو بر روی یک محور نشان داده شده‌اند. جریان تحریک بر محور دیگر، نرمالیزه شده است که  $1/0 \text{ pu}$  آن نشاندهنده جریان تحریک مربوط به توان ظاهری خروجی و ضریب توان نامی است.

## منابع

- [1] Kundur Prabhashankar, "Digital Simulation and Analysis of Power System Dynamic Performance," Ph.D. thesis, University of Toronto, May 1967.
- [2] Kundur Prabhashankar and W. Janischewskyj, "Digital Simulation and Analysis of Power System Dynamic Performance - Effects of Synchronous Machine Amortisseur Circuits and Control Mechanisms," Paper CP 94-PWR, presented at the IEEE Winter Power Meeting, January/February 1968.
- [3] R.G. Harley and B. Adkins, "Calculation of the Angular Back Swing Following a Short Circuit of a Loaded Alternator," *Proc. IEE*, Vol. 117, No. 2, pp. 377-386, 1970.
- [4] G. Shackshaft, "Effect of Oscillatory Torque on the Movement of Generator Rotors," *Proc. IEE*, Vol. 117, No. 10, pp. 1969-1974, 1970.
- [5] E.W. Kimbark, *Power System Stability, Vol. III: Synchronous Machines*, John Wiley & Sons, 1956.
- [6] D.B. Mehta and B. Adkins. "Transient Torque and Load Angle of a Synchronous Generator Following Several Types of System Disturbance," *Proc. IEE*, Vol. 107A, pp. 61-74, 1960.
- [7] G. Kron, Discussion of paper by R.H. Park, "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines - Part II," *AIEE Trans.*, Vol. 52, pp. 352-355, June 1933.
- [8] D.N. Ewart and R.P. Schulz, "Face Multi-machine Power System Simulator Program," *Proc. PICA Conference*, pp. 133-153, May 1969.
- [9] S.B. Farnham and R.W. Swartnout, "Field Excitation in Relation to Machine and System Operation," *AIEE Trans.*, pp. 1215-1223, December 1953.

## فصل ششم

### انتقال به صورت جریان متناوب

در این فصل مروری بر مشخصه‌ها و مدل‌های اجزای تشکیل دهنده سیستم انتقال به صورت جریان متناوب خواهیم داشت و روش‌های بررسی پخش بار در سیستم‌های انتقال را مطرح خواهیم کرد. تأکید بر آن وجوهی از مشخصه‌های سیستم انتقال است که بر پایداری سیستم و کنترل ولتاژ، تأثیر می‌گذارد. به طور مشخص، اهداف را می‌توان به شکل ذیل بیان نمود:

الف) به دست آوردن معادلات و مدل‌های خطوط انتقال؛

ب) بررسی تأثیر ولتاژ، توان راکتیو، مسائل پایداری و تأثیر حرارتی بر قابلیت‌های انتقال توان خطوط انتقال؛

ج) به دست آوردن مدل‌های مربوط به ترانسفورمرهای دو و سه سیم‌پیچ و تغییر دهنده فاز؛

د) بررسی عوامل مؤثر بر انتقال توان حقیقی و راکتیو از شبکه انتقال؛

ه) بیان روش‌های محاسباتی در بررسی پخش بار در سیستم‌های انتقال.

لازمه بررسی نکات فوق، در نظر گرفتن حالت متعادل و ماندگار سیستم انتقال است. از این رو، عملکرد اجزای سیستم انتقال بر حسب معادله‌های تک فاز آنها مورد بررسی و مدلسازی واقع خواهد شد.

## ۶-۱ خطوط انتقال

توان الکتریکی از طریق خطوط هوایی و کابلها از منابع تولید به مصرفکنندگان منتقل می‌شود. از خطوط هوایی در مسافتهای طولانی و نقاط غیر شهری و روستایی و از کابلها جهت انتقال زیرزمینی در نواحی شهری و یا انتقال از زیر آب، استفاده می‌شود. برای یک ظرفیت مشخص، بهای کابل حدود ۱۰ تا ۱۵ برابر خطوط هوایی است، از این رو فقط در مواردی استفاده می‌شود که مسافتها کوتاه بوده، استفاده از خطوط هوایی امکان‌پذیر نباشد.

### ۶-۱-۱ مشخصه‌های الکتریکی

#### الف) خطوط هوایی

خط انتقال را با چهار پارامتر توصیف می‌کنند: مقاومت سری  $R$  ناشی از مقاومت هادی، کندانکتانس<sup>۱</sup> موازی  $G$  ناشی از جریانهای نشتی بین فازها و زمین، اندوکتانس سری  $L$  ناشی از میدان مغناطیسی اطراف هادیها، و خازن موازی  $C$  ناشی از میدان الکتریکی بین هادیها. روش مشروح به دست آوردن پارامترهای خطوط با استفاده از اصول و قواعد اولیه، در کتب استاندارد مربوط به سیستمهای قدرت بیان شده است [۱ تا ۷]. مراجع ۸ و ۹، اطلاعات مربوط به خطوط انتقالی را که در عمل استفاده می‌شود، بیان می‌کنند. در اینجا به طور خلاصه نکات برجسته مربوط به پارامترهای خطوط را بیان می‌کنیم:

مقاومت سری ( $R$ )، مقاومت خطوط را با احتساب رشته‌ها<sup>۲</sup> و اثر پوستی<sup>۳</sup> از جداول سازندگان تعیین می‌کنند.

کندانکتانس موازی ( $G$ )، کندانکتانس موازی نشانگر تلفات ناشی از جریانهای نشتی در مسیر عایقهای نگاه دارنده و نیز پدیده کرونا<sup>۴</sup> است. در خطوط انتقال، این تأثیر کوچک است و معمولاً از آن صرف نظر می‌شود.

اندوکتانس سری ( $L$ )، اندوکتانس خط بستگی به شار دور جزئی در سطح مقطع هادی و شار دورهای خارجی آن دارد. برای خطوط هوایی، اندوکتانسهای سه فاز با هم متفاوت هستند مگر اینکه هادیها با هم دوه‌دو فاصله مشابه داشته باشند که در عمل، چنین ترکیبی استفاده

1. Conductance

2. Stranding

3. Skin Effect

4. Corona

نمی‌شود. اما در ترکیبی که فواصل هادیها یکسان نیست می‌توان اندوکتانسهای سه فاز را با ترانزاده کردن<sup>۱</sup> فازها به شکل یکسان درآورد به این صورت که هر فاز در هر سه موقعیت ممکن قرار گیرد. در چنین خط سه فازی، اندوکتانس هر فاز برابر است با [۱]:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \text{ H/m} \quad (1-6)$$

که در معادله فوق،  $D_s$  شعاع میانگین هندسی<sup>۲</sup> است که در آن تأثیر ترکیب، رشته‌ای و یا چندتایی بودن<sup>۳</sup> تعداد هادیهای هر فاز به حساب آورده شده است.  $D_{eq}$  فاصله میانگین هندسی<sup>۴</sup> بین هادیهای سه فاز  $a$ ،  $b$  و  $c$  است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{eq} = (d_{ab} d_{bc} d_{ca})^{1/3} \quad (2-6)$$

خازن موازی (C). اختلاف پتانسیل بین هادیهای یک خط انتقال باعث بازدار شدن هادیها می‌شود. مقدار بار بر واحد اختلاف پتانسیل، برابر با ظرفیت خازنی بین هادیهاست. زمانی که ولتاژهای متناوب به هادیها اعمال شود، به علت باردار شدن و تخلیه بار متناوب خازنها، جریانی از آنها عبور می‌کند. در یک خط انتقال سه فاز که فازهای آن ترانزاده شده باشد، ظرفیت خازنی هر فاز نسبت به زمین برابر است با [۱]:

$$C = \frac{2\pi k}{\ln(D_{eq}/r)} \text{ F/m} \quad (3-6)$$

که  $r$ ، شعاع هادی،  $D_{eq}$  همان مقدار معادله ۲-۶ و  $k$ ، ثابت دی‌الکتریکی<sup>۵</sup> مربوط به عایق بین هادیهاست. در خطوط موازی، برای هر فاز، فاصله میانگین هندسی اصلاح شده<sup>۶</sup> آن، جایگزین  $r$  در معادله ۳-۶ می‌شود [۱].

زمین سطحی هم پتانسیل را نسبت به هادیها نشان می‌دهد و بنابراین بر ظرفیت خازنی هر

1. Transposing
2. Geometric Mean Radius
3. Bundling
4. Geometric Mean Distance
5. Permittivity
6. Modified Geometric Mean Distance

فاز تأثیر می‌گذارد. تأثیر آن را می‌توان با استفاده از مفهوم "تصویر" <sup>۱</sup> محاسبه کرد [۱ تا ۵].

#### ب) کابل‌های زیرزمینی [۳، ۴، ۶ و ۷]

کابل‌های زیرزمینی همان چهار پارامتر اصلی (مقاومت و اندوکتانس سری، خازن و کنداکتانس موازی) را شبیه به خطوط هوایی دارند. اما به دلایل زیر، مقادیر این پارامترها (و بنابراین مشخصه‌های کابلها)، کاملاً با خطوط هوایی متفاوت است:

۱. هادیهای یک کابل نسبت به هادیهای خطوط هوایی، بسیار نزدیکتر به هم هستند.
۲. هادیهای یک کابل به وسیلهٔ روکشهای فلزی نظیر ورقه‌های سربی یا آلومینیومی و یا لوله‌های فولادی پوشانده شده‌اند.
۳. عایق بین هادیهای یک کابل معمولاً از کاغذ تزریق شده <sup>۲</sup>، روغن یا غلظت کم و یا گاز خنثی تشکیل شده است.

#### ۶-۱-۲ معادلات عملکرد

در بخش قبلی، چهار پارامتر یک خط انتقال را بر واحد طول تعیین نمودیم. این پارامترها به صورت گسترده هستند بدین معنا که تأثیر آنها در سراسر طول خط پراکنده شده است. اگر فرض کنیم که در یک خط، فازها ترانزده شده‌اند، می‌توان عملکرد یک خط را بر اساس یک فاز بررسی کرد. شکل ۶-۱، رابطهٔ بین جریان و ولتاژ را در مسیر یک فاز خط بر حسب پارامترهای گستردهٔ آن، نشان می‌دهد که برای آن داریم:

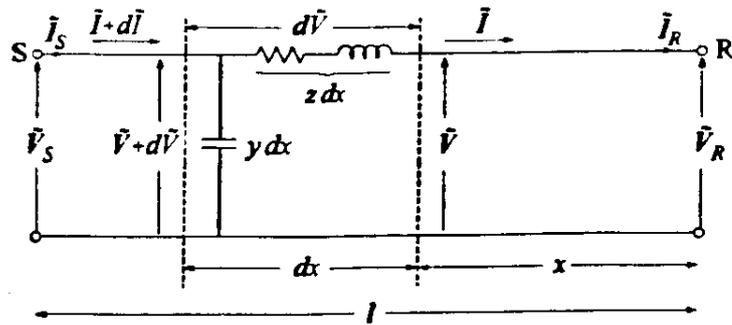
$$z = R + j\omega L \quad \text{: امپدانس سری بر واحد طول در هر فاز؛}$$

$$y = G + j\omega C \quad \text{: ادmittانس موازی بر واحد طول در هر فاز؛}$$

$$l \quad \text{: طول خط}$$

ولتاژها و جریانهای نشان داده شده، مقادیر فازوری هستند که نمایشگر کمیت‌های سینوسی متغیر با زمان می‌باشند.

اکنون بخش بسیار کوچکی از خط را به طول  $dx$  و در فاصله  $x$  از طرف گیرنده در نظر



شکل ۱-۶ رابطه ولتاژ و جریان خط با پارامتر گسترده

بگیرید. ولتاژ دو سر این پاره خط بسیار کوچک برابر است با:

$$d\tilde{V} = \tilde{I}(z dx)$$

بنابراین:

$$\frac{d\tilde{V}}{dx} = \tilde{I}z \quad (4-6)$$

جریان بسیار کوچکی که از ادمیتانس موازی می‌گذرد، برابر است با:

$$d\tilde{I} = \tilde{V}(y dx)$$

پس:

$$\frac{d\tilde{I}}{dx} = \tilde{V}y \quad (5-6)$$

با مشتق‌گیری از معادلات ۴-۶ و ۵-۶ نسبت به  $x$  داریم:

$$\frac{d^2 \tilde{V}}{dx^2} = z \frac{d\tilde{I}}{dx} = yz \tilde{V} \quad (6-6)$$

و:

$$\frac{d^2 \tilde{I}}{dx^2} = y \frac{d\tilde{V}}{dx} = yz \tilde{I} \quad (7-6)$$



شروط مرزی<sup>۱</sup> را می توان با معلوم فرض نمودن  $V_R$  (ولتاژ) و  $I_R$  (جریان) در طرف گیرنده ( $x=0$ )، معلوم دانست. حل کلی معادلات ۶-۶ و ۶-۷ برای ولتاژ و جریان در فاصله  $x$  از طرف گیرنده به صورت زیر است:

$$\tilde{V} = \frac{\tilde{V}_R + Z_C \tilde{I}_R}{\gamma} e^{\gamma x} + \frac{\tilde{V}_R - Z_C \tilde{I}_R}{\gamma} e^{-\gamma x} \quad (۸-۶)$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{V}_R / Z_C + \tilde{I}_R}{\gamma} e^{\gamma x} - \frac{\tilde{V}_R / Z_C - \tilde{I}_R}{\gamma} e^{-\gamma x} \quad (۹-۶)$$

که:

$$Z_C = \sqrt{z/y} \quad (۱۰-۶)$$

$$\gamma = \sqrt{yz} = \alpha + j\beta \quad (۱۱-۶)$$

$Z_C$  به امپدانس مشخصه<sup>۲</sup> و  $\gamma$  به ثابت انتشار<sup>۳</sup> موسوم است که مقادیر آنها به صورت اعدادی مختلط است. قسمت حقیقی  $\gamma$  به ثابت میرایی<sup>۴</sup> ( $\alpha$ ) و قسمت موهومی آن به ثابت فاز<sup>۵</sup> موسوم است. از این رو، عبارت نمایی  $e^{\gamma x}$  را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$e^{\gamma x} = e^{(\alpha + j\beta)x} = e^{\alpha x} (\cos \beta x + j \sin \beta x) \quad (۱۲-۶)$$

بنابراین اولین جمله معادله ۸-۶ با افزایش فاصله از طرف گیرنده از لحاظ دامنه، افزایش می یابد و از لحاظ فاز، پیش می افتد. این جمله به ولتاژ تابشی<sup>۶</sup> موسوم است. جمله نمایی دوم را می توان به صورت زیر نوشت:

$$e^{-\gamma x} = e^{-\alpha x} (\cos \beta x - j \sin \beta x) \quad (۱۳-۶)$$

در نتیجه، جمله دوم معادله (۸-۶) با افزایش فاصله از طرف گیرنده از لحاظ دامنه، کاهش می یابد و از لحاظ فاز، پس می افتد. این جمله به ولتاژ بازتابش<sup>۷</sup> موسوم است. در هر نقطه خط،

- |                         |                             |                   |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 1. Boundary Conditions  | 2. Characteristic Impedance |                   |
| 3. Propagation Constant | 4. Attenuation Constant     | 5. Phase Constant |
| 6. Incident Voltage     | 7. Reflected                |                   |

ولتاژ، مساوی مجموع دو مؤلفه تابشی و بازتابشی در آن نقطه است. چون معادله ۹-۶ شبیه ۸-۶ است، جریان نیز از دو مؤلفه تابشی و بازتابشی تشکیل شده است.

اگر در انتهای خطی، باری با مقدار امپدانس مشخصه  $Z_C$  وجود داشته باشد،  $V_R$  مساوی  $Z_C I_R$  است و هیچ موج بازتابشی نخواهیم داشت. چنین خطی را خط بینهایت می‌گوییم، زیرا که خط بینهایت نمی‌تواند موج بازتابشی داشته باشد. خطوط قدرت برخلاف خطوط مخابراتی معمولاً به امپدانس مشخصه خود ختم نمی‌شوند.

از معادلات ۱۲-۶ و ۱۳-۶ مشاهده می‌کنیم که در طول خط و در هر لحظه زمان، مؤلفه‌های تابشی و بازتابشی ولتاژ جریان به صورت منحنیها یا امواج سینوسی پدیدار می‌شوند. علاوه بر این تغییرات، از آنجا که  $V_R$  و  $I_R$  در معادلات ۸-۶ و ۹-۶، فازوری و نمایشگر کمیت‌های سینوسی متغیر با زمان هستند، مؤلفه‌های ولتاژ و جریان در هر نقطه خط با زمان تغییر می‌کنند. بنابراین، مؤلفه‌های تابشی و بازتابشی ولتاژ و جریان، نمایشگر امواج سیار هستند. آنها شبیه امواج سیار در آب هستند. کل ولتاژ و جریان لحظه‌ای در طول خط، سیار نیست، اما می‌توان آنها را به صورت مجموع دو موج سیار بیان نمود.

برای خطوط قدرت، معمولاً  $G$  مساوی صفر و  $R \ll \omega L$  است. بنابراین داریم:

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \left[ 1 - j \frac{R}{2\omega L} \right] \quad (14-6)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)j\omega C} \approx j\omega \sqrt{LC} \left[ 1 - j \frac{R}{2\omega L} \right] \quad (15-6)$$

اگر از تلفات به طور کامل صرف نظر کنیم،  $Z_C$  عددی حقیقی (یعنی مقاومت خالص) و  $\gamma$  عددی موهومی خواهد بود.

برای خط بدون تلفات، معادلات ۸-۶ و ۹-۶ به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\tilde{V} = \tilde{V}_R \cos \beta x + j Z_C \tilde{I}_R \sin \beta x \quad (16-6)$$

و:

$$\tilde{I} = \tilde{I}_R \cos \beta x + j (\tilde{V}_R / Z_C) \sin \beta x \quad (17-6)$$

بنابراین، ولتاژ و جریان به صورت هماهنگ در طول خط تغییر می‌کنند. در طول خط، یک سیکل کامل ولتاژ و جریان در فضا مطابق با  $2\pi$  رادیان است. طول مربوط به یک سیکل کامل به طول موج  $\lambda$  موسوم است. اگر  $\beta$  مقدار ترانزادگی فاز بر حسب رادیان بر واحد متر باشد، طول موج بر حسب متر برابر است با:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (18-6)$$

### ۶-۱-۳ بار امپدانس ضربه‌ای<sup>۲</sup> (طبیعی)

از آنجا که در خطوط فشار قوی،  $G$  قابل چشمپوشی و  $R$ ، بسیار کوچک است هنگام بررسی تأثیر صاعقه و ضربه‌های کلیدزنی، این خطوط را بدون تلفات در نظر می‌گیرند. از این رو، امپدانس مشخصه  $Z_C$  در حالت چشمپوشی از تلفات به امپدانس ضربه‌ای موسوم است که مقدار آن مساوی  $\sqrt{L/C}$  و از لحاظ بُعد، شبیه مقاومت خالص است.

اگر یک خط انتقال به امپدانس ضربه‌ای خود ختم شود، توان تحویل داده را بار امپدانس ضربه‌ای (SIL) می‌نامند که مساوی است با:

$$SIL = \frac{V_s^2}{Z_C} W \quad (19-6)$$

که  $V_s$ ، ولتاژ نامی خط است. اگر  $V$  ولتاژ خط به زمین باشد، SIL از معادله فوق مقدار در هر فاز است و اگر  $V$ ، ولتاژ خط به خط باشد، SIL، مقدار سه فاز است.

از معادلات ۶-۱۶ و ۶-۱۷، ملاحظه می‌شود که در طول یک خط بدون تلفات و در SIL،

ولتاژ و جریان برابر است با:

$$\tilde{V} = \tilde{V}_R e^{j\alpha x} \quad (20-6)$$

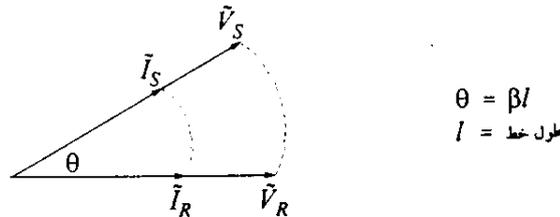
و:

$$\tilde{I} = \tilde{I}_R e^{j\alpha x} \quad (21-6)$$

که  $\gamma = j\beta = j\omega \sqrt{LC}$  است.

در بار امپدانس ضربه‌ای (SIL)، خطوط بدون تلفات انتقال، مشخصه‌های زیر را از خود بروز می‌دهند:

- در طول خط،  $\tilde{V}$  و  $\tilde{I}$  دارای دامنه ثابت هستند.
- در طول خط،  $\tilde{V}$  و  $\tilde{I}$  با یکدیگر همفاز هستند.
- اختلاف زاویه فاز بین ولتاژها ( و جریانهای ) طرفهای فرستنده و گیرنده، مساوی با  $\beta l$  است (به شکل ۶-۲ مراجعه کنید).



شکل ۶-۲ روابط ولتاژ و جریان طرف فرستنده و گیرنده خط بدون تلفات در SIL

در بار امپدانس ضربه‌ای، در هر پاره خط بسیار کوچک خط، تلفات راکتیو تولید شده ناشی از C مساوی با توان راکتیو جذب شده L است. از این رو، هیچ توان راکتیوی در دو سر خط جذب یا تولید نمی‌شود و نمایه ولتاژ و جریان مسطح است. از نظر کنترل ولتاژ و توان راکتیو، این وضع، حالت بهینه است. هم چنان که در بخشهای بعدی این فصل خواهیم دید، بارامپدانس ضربه‌ای خط، کمیت مرجع مناسبی برای ارزیابی و بیان قابلیت آن خط است.

#### ۶-۱-۴ مدار معادل خط انتقال

معادلات ۶-۸ و ۶-۹، عملکرد خطوط انتقال را به طور کامل بیان می‌کنند. اما برای بررسی در شرایطی که اتصال آنها به دیگر اجزای سیستم برقرار است، مناسبتر است از مدارهای معادلی که عملکرد خطوط را از دیدگاه پایانه‌های آن بیان می‌کند، استفاده نمود.

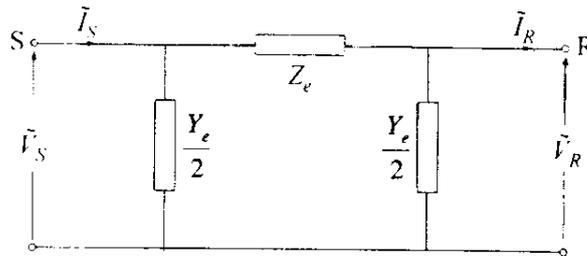
در معادله ۸-۶ با جایگزینی  $x=1$  و جابجا کردن جمله‌ها، داریم:

$$\begin{aligned}\tilde{V}_S &= \tilde{V}_R \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{\gamma} + Z_C \tilde{I}_R \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{\gamma} \\ &= \tilde{V}_R \cosh(\gamma l) + Z_C \tilde{I}_R \sinh(\gamma l)\end{aligned}\quad (22-6)$$

به طور مشابه، برای معادله (۹-۶) داریم:

$$\tilde{I}_S = \tilde{I}_R \cosh(\gamma l) + \frac{\tilde{V}_R}{Z_C} \sinh(\gamma l)\quad (23-6)$$

می‌توان از مدار معادل  $\pi$  با پارامترهای فشرده<sup>۱</sup> مطابق شکل ۳-۶ برای نمایش روابط فوق استفاده کرد.



شکل ۳-۶ مدار معادل  $\pi$  مربوط به خط انتقال

از این مدار معادل، ولتاژ طرف فرستنده برابر است با:

$$\begin{aligned}\tilde{V}_S &= Z_e \left[ \tilde{I}_R + \frac{Y_e}{\gamma} \tilde{V}_R \right] + \tilde{V}_R \\ &= \left[ \frac{Z_e Y_e}{\gamma} + 1 \right] \tilde{V}_R + Z_e \tilde{I}_R\end{aligned}\quad (24-6)$$

با مقایسه معادلات ۲۴-۶ و ۲۲-۶ داریم:

$$Z_e = Z_C \sinh(\gamma l)\quad (25-6)$$

1. Lumped

و:

$$\frac{Z_e Y_e}{Y} + 1 = \cosh(\gamma l)$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} \frac{Y_e}{Y} &= \frac{1}{Z_c} \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{\sinh(\gamma l)} \\ &= \frac{1}{Z_c} \tanh\left[\frac{\gamma l}{2}\right] \end{aligned} \quad (26-6)$$

معادلات ۲۵-۶ و ۲۶-۶ اجزای مدار معادل را مشخص می‌کنند که این اجزا، دقیقاً روابط ولتاژ و جریان (معادلات ۲۲-۶ و ۲۳-۶) را بازگو می‌کنند.

مدار معادل  $\pi$  اسمی<sup>۱</sup>

اگر  $1 \ll \gamma l$  باشد، روابط تقریبی  $Z_e$  و  $Y_e$  به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} Z_e &= Z_c \sinh(\gamma l) \\ &\approx Z_c (\gamma l) \\ &\approx z l = Z \end{aligned} \quad (27-6)$$

و:

$$\begin{aligned} \frac{Y_e}{Y} &= \frac{1}{Z_c} \tanh\left[\frac{\gamma l}{2}\right] \\ &\approx \frac{1}{Z_c} \frac{\gamma l}{2} \\ &\approx \frac{\gamma l}{2} = \frac{Y}{2} \end{aligned} \quad (28-6)$$

در معادلات ۲۷-۶ و ۲۸-۶،  $Z$  و  $Y$  به ترتیب نمایشگر امپدانس کلی سری ( $z l$ ) و ادمیتانس کلی موازی ( $\gamma l$ ) هستند. مدار معادل حاصل به مدار معادل  $\pi$  اسمی موسوم است. به طور کلی تقریب استفاده شده مناسب است اگر:

- برای خطوط هوایی،  $1 < 10000/f \text{ km}$  (۱۷۰ کیلومتر در ۶۰ هرتز) باشد،
- برای کابلهای زیرزمینی،  $3000/f \text{ km} < 3000$  (۵۰ کیلومتر در ۶۰ هرتز) باشد.

#### طبقه‌بندی طول خط

بر اساس تقریبهای استفاده شده در مدلسازی خطوط، می‌توان آنها را از دیدگاه طولی، طبقه‌بندی نمود:

الف) خطوط کوتاه: خطوطی هستند که طول آنها کمتر از ۸۰ کیلومتر (۵۰ مایل) است و می‌توان از خازن موازی آنها چشمپوشی کرد و آنها را فقط با امپدانس سری خود مدل کرد.  
ب) خطوط متوسط: خطوطی هستند که طول آنها بین ۸۰ تا ۲۰۰ کیلومتر (۱۲۵ مایل) است و آنها را می‌توان با مدار معادل  $\pi$  اسمی مدل کرد.

ج) خطوط بلند: خطوطی هستند که طول آنها از ۲۰۰ کیلومتر بیشتر است. برای چنین خطوطی، تأثیر پراکندگی پارامترهای خط چشمگیر است و لازم است آنها را با مدار معادل  $\pi$  مدل کرد. راه دیگر آن است که خط را به پاره خطهای کوچکتر متوالی تشبیه کرد و برای هر پاره خط از مدار معادل  $\pi$  اسمی استفاده کرد.

#### ۶-۱-۵ پارامترهای نوعی

##### الف) خطوط هوایی

در جدول ۶-۱ نمونه‌ای از پارامترهای خطوط هوایی در بازه ولتاژ اسمی بین ۲۳۰ تا ۱۱۰۰ کیلو ولت داده شده است. مشاهده می‌شود که امپدانس ضربه‌ای خطوط فشار بسیار قوی (EHV)<sup>۱</sup> و فشار فوق‌العاده قوی (UHV)<sup>۲</sup> در بازه ۲۳۰ تا ۲۹۰ اهم قرار دارد. عملاً مقدار  $\beta$  برای تمام خطوط یکسان است. این موضوع قابل انتظار است زیرا که  $\sqrt{LC}$ ، سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی است که در خطوط هوایی، مقدار آن کمی کمتر از سرعت نور (۳۰۰۰۰۰ km/s) است. در فرکانس ۶۰ هرتز،  $\beta$  تقریباً مساوی  $1/27 \times 10^{-3} \text{ rad/km}$  است. طول موج مربوطه ( $\lambda = 2\pi/\beta$ ) تقریباً مساوی ۵۰۰۰ km است.

1. Extra High Voltage

2. Ultra High Voltage

جدول ۱-۶ پارمترهای نوعی خط انتقال هوایی

ولتاژ اسمی	۲۳۰ kV	۳۴۵ kV	۵۰۰ kV	۷۶۵ kV	۱۱۰۰ kV
R ( $\Omega/\text{km}$ )	۰/۰۵۰	۰/۰۳۷	۰/۰۲۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵
$x_L = \omega L$ ( $\Omega/\text{km}$ )	۰/۴۸۸	۰/۳۶۷	۰/۳۲۵	۰/۳۲۹	۰/۲۹۲
$b_C = \omega C$ ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )	۳/۳۷۱	۰/۵۱۸	۵/۲۰۰	۴/۹۷۸	۵/۵۴۴
$\alpha$ (نپر/km)	۰/۰۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۰۶۶	۰/۰۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۱۲
$\beta$ (rad/km)	۰/۰۰۰۱۲۸	۰/۰۰۰۱۲۹	۰/۰۰۰۱۳۰	۰/۰۰۰۱۲۸	۰/۰۰۰۱۲۷
$Z_C$ ( $\Omega$ )	۳۸۰	۲۸۵	۲۵۰	۲۵۷	۲۳۰
SIL (MW)	۱۴۰	۴۲۰	۱۰۰۰	۲۲۸۰	۵۲۶۰
شارژ MVA/km $= V \cdot b_C$	۰/۱۸	۰/۵۴	۱/۳۰	۲/۹۲	۶/۷۱

۱. فرکانس نامی مساوی ۶۰ Hz فرض می‌شود.

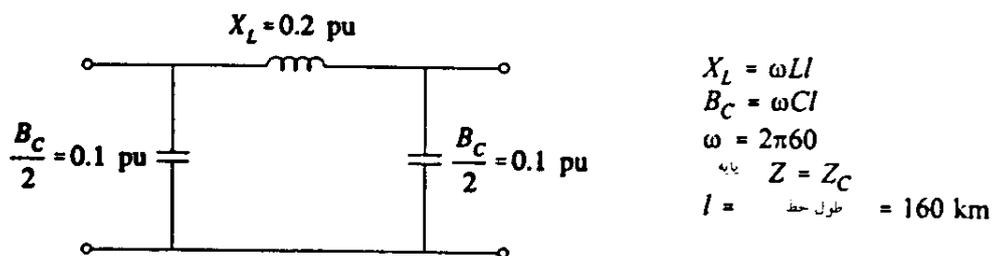
۲. از هادیهای چندتایی برای تمام خطوط، بجز خط ۲۳۰ kV، استفاده شده‌اند.

۳.  $R$ ،  $x_L$  و  $b_C$ ، مقادیر به ازای هر فاز هستند.

۴. SIL و MVA شارژ، مقادیر سه فاز هستند.

در شکل ۴-۶ مدار معادل تقریبی خطی به طول ۱۶۰ کیلومتر (۱۰۰ مایل) که در هر ولتاژ

نامی، قابل استفاده و به ذهن سپردن آن ساده است، نشان داده شده است.



شکل ۴-۶ مدار معادل تقریبی برای یک خط هوایی با هر ظرفیت ولتاژ، با پارامترها برحسب مبنای واحد

امپدانس ضریب‌دای

به عنوان مثال، برای خطی ۵۰۰ کیلو ولتی به طول ۱۶۰ کیلومتر که پارامترهای آن در جدول ۱-۶ داده شده، داریم:

$$X_L = 160 \times 0.325 = 52/\Omega$$

و:

$$B_C = 160 \times 5/20 \times 10^{-6} = 4/32 \times 10^{-2} \text{ siemens}$$

که در مبنای واحد و بر پایه  $Z_C (250\Omega)$ :

$$X_L = \frac{52/\Omega}{250} = 0.208 \text{ pu}$$

$$B_C = 4/32 \times 10^{-2} \times 250 = 0.3125 \text{ pu}$$

ب) کابل‌های زیرزمینی

در جدول ۲-۶، نمونه‌ای از پارامترهای کابل‌ها داده شده است. در این جدول دو نمونه کابل در نظر گرفته شده است: کابل با عایق کاغذی و پوشش سربی (PILC)<sup>۱</sup> و لوله‌ای فشار بالا (PIPE)<sup>۲</sup> و در ولتاژهای اسمی ۱۱۵، ۲۳۰ و ۵۰۰ کیلو ولت. از جدول، مشاهده می‌کنیم که کابل‌های زیرزمینی دارای خازن موازی مقدار بالایی هستند. امپدانس مشخصه یک کابل در ولتاژ اسمی مشابه با یک خط هوایی، حدود یک دهم تا یک پنجم امپدانس مشخصه خط هوایی است.

### ۶-۱-۶ ملاحظات عملکرد خطوط انتقال فشار قوی

در بخش ۲-۱-۶ معادلات عملکرد خطوط انتقال به دست آمدند. معادلات مزبور هم در مورد خطوط مخابراتی و هم در مورد خطوط فشار قوی صادق است. اما ملاحظات عملکرد این دو نوع خطوط کاملاً با هم متفاوت است.

خطوط مخابراتی سیگنالهایی را انتقال می‌دهند که حاوی تعداد زیادی مؤلفه فرکانس نسبتاً بالا بوده، نسبت به طول موج‌های موجود، بسیار طولانی هستند. در این حالت صحت و قدرت سیگنالهای طرف گیرنده عمده‌ترین مسائل مورد نظر است. از این رو به منظور جلوگیری از

1. Paper insulated Lead – covered

2. High – pressure Pipe Type

اعوجاج<sup>۱</sup> بر روی خط، تنها راه عملی این است که آن را در انتها به امپدانس مشخصه ختم کرد. انرژی مربوط به خطوط مخابراتی کم است و در نتیجه بازده از درجه اهمیت کمی برخوردار است.

جدول ۶-۲ پارمترهای نوعی کابل

ولتاژ اسمی	۱۱۵kV	۱۱۵kV	۲۳۰kV	۲۳۰kV	۵۰۰kV
نوع کابل	PILC	PIPE	PILC	PIPE	PILC
$R$ ( $\Omega/\text{km}$ )	۰/۰۵۹۰	۰/۰۳۷۹	۰/۰۲۷۷	۰/۰۴۳۴	۰/۰۱۲۸
$x_L = \omega L$ ( $\Omega/\text{km}$ )	۰/۳۰۲۶	۰/۱۳۱۲	۰/۳۳۸۸	۰/۲۰۵۲	۰/۲۴۵۴
$b_C = \omega C$ ( $\mu\text{s}/\text{km}$ )	۲۳۰/۴	۱۶۰/۸	۲۴۵/۶	۲۹۸/۹۸	۹۶/۵
$\alpha$ (نپر/ $\text{km}$ )	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۰۰۶۵۶	۰/۰۰۰۳۷۲	۰/۰۰۰۸۲۴	۰/۰۰۰۱۲۷
$\beta$ (rad/ $\text{km}$ )	۰/۰۰۸۳۹	۰/۰۰۴۶۴	۰/۰۰۹۱۳	۰/۰۰۷۸۷	۰/۰۰۴۸۷
$Z_C$ ( $\Omega$ )	۳۶/۲	۲۸/۵	۳۷/۱	۲۶/۲	۵۰/۴
SIL (MW)	۳۶۵	۴۶۴	۱۴۲۶	۲۰۱۹	۴۹۶۰
شارژ MVA/km $= V \cdot b_C$	۳/۰۵	۲/۱۳	۱۳/۰	۱۵/۸	۲۴/۱

در مقابل، در مورد خطوط فشار قوی، بازده، اقتصاد و قابلیت اعتماد سیستم تغذیه، مهمترین نکات مورد توجه است. از آنجا که تنها یک فرکانس مطرح است، اعوجاج نسبت به خطوط مخابراتی از اهمیت ناچیزی برخوردار است و از آنجا که طول اغلب خطوط فشار قوی درصد کمی از طول موج موجود است، این خطوط را می توان به امپدانسهای باری ختم کرد که بسیار کوچکتر از امپدانس مشخصه خط است. اگر خط انتقال فشار قوی بسیار بلند باشد (بیشتر از ۵۰۰ کیلومتر)، لازم است که خط را به امپدانس نزدیک به امپدانس مشخصه ختم کرد. به منظور افزایش قابلیت انتقال توان، باید یا امپدانس مشخصه را با افزودن جبرانگرها، کاهش و یا

1. Distortion

ولتاژ انتقال را افزایش داد. تنظیم ولتاژ<sup>۱</sup>، حدود حرارتی و پایداری سیستم عواملی هستند که قابلیت انتقال خطوط فشار قوی را تعیین می‌نمایند. در بخشهای بعدی این جنبه‌های عملکرد خطوط فشار قوی را مطرح می‌نماییم. هر زمان که لازم باشد، خط را بدون تلفات در نظر می‌گیریم زیرا این فرض، کار را به میزان زیادی ساده می‌کند و ضمناً دید بهتری از مشخصه‌های عملکرد خطوط انتقال ارائه می‌دهد.

### ۶-۱-۷ نمایه<sup>۲</sup> ولتاژ و جریان در شرایط بی‌باری [۳ و ۱۰]

الف) حالت مدار باز در طرف گیرنده

اگر طرف گیرنده، مدار باز باشد  $I_R = 0$  است. در این صورت معادلات ۶-۸ و ۶-۹ به صورت زیر در می‌آیند:

$$\tilde{V} = \frac{\tilde{V}_R}{\gamma} e^{\gamma x} + \frac{\tilde{V}_R}{\gamma} e^{-\gamma x} \quad (۲۹-۶)$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{V}_R}{\gamma Z_C} e^{\gamma x} - \frac{\tilde{V}_R}{\gamma Z_C} e^{-\gamma x} \quad (۳۰-۶)$$

در خط بدون تلفات،  $\gamma = j\beta$  است و در نتیجه معادلات فوق به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\tilde{V} = \tilde{V}_R \cos(\beta x) \quad (۳۱-۶)$$

$$\tilde{I} = j(\tilde{V}_R / Z_C) \sin(\beta x) \quad (۳۲-۶)$$

اگر به جای  $x$ ،  $l$  بگذاریم، ولتاژ و جریان در طرف فرستنده به دست می‌آیند<sup>۳</sup>:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_S &= \tilde{V}_R \cos \beta l \\ &= \tilde{V}_R \cos \theta \end{aligned} \quad (۳۳-۶)$$

و:

1. Voltage Regulation      2. Profile

۳. چون در این حالت ولتاژ طرف فرستنده ولتاژی کنترل شده است به جای  $V$  از  $E$  استفاده شده است.

$$\begin{aligned}\tilde{I}_S &= j(\tilde{V}_R/Z_C) \sin \theta \\ &= j(\tilde{E}_S/Z_C) \tan \theta\end{aligned}\quad (۳۴-۶)$$

که  $\theta = \beta l$  است. زاویه  $\theta$  موسوم به طول الکتریکی<sup>۱</sup> یا زاویه خط<sup>۲</sup> است و بر حسب رادیان بیان می‌شود.

از معادلات ۳۱-۶ تا ۳۳-۶، می‌توان ولتاژ و جریان خط را بر حسب ولتاژ طرف فرستنده  $E_S$ ، به صورت زیر نوشت:

$$\tilde{V} = \tilde{E}_S \frac{\cos \beta x}{\cos \theta} \quad (۳۵-۶)$$

$$\tilde{I} = j \frac{\tilde{E}_S}{Z_C} \frac{\sin \beta x}{\cos \theta} \quad (۳۶-۶)$$

به عنوان مثال، نمایه ولتاژ و جریان را برای خط ۵۰۰ کیلو ولتی به طول ۳۰۰ کیلومتر (که ولتاژ طرف فرستنده آن، مقدار نامی و طرف گیرنده، مدار باز است.) به دست می‌آوریم. فرض می‌شود که خط، بدون تلفات است و  $\beta = 0.0013 \text{ rad/km}$ ،  $Z_C = 250 \Omega$  است. طول الکتریکی خط برابر است با:

$$\begin{aligned}\theta &= 300 \times 0.0013 = 0.39 \text{ rad} \\ &= 22/3^\circ\end{aligned}$$

از معادله ۳۳-۶ داریم:

$$V_R = \frac{1}{\cos 22/3^\circ} = 1.081 \text{ pu}$$

و از معادله ۳۴-۶:

$$\tilde{I}_S = j(\tilde{E}_S/Z_C) \tan \theta$$

مقدار جریان  $I_S$  در مبنای واحد و بر پایه جریانی مساوی جریان در حالت بار امیدانس ضربه‌ای، برابر است با:

$$\begin{aligned}I_S &= E_S \tan \theta \text{ pu} \\ &= 1.0 \tan 22/3^\circ \\ &= 0.411 \text{ pu}\end{aligned}$$

1. Electrical Length

2. Line Angle

از معادلات ۳۵-۶ و ۳۶-۶، مقادیر ولتاژ و جریان بر حسب تابعی از فاصله  $x$  از طرف گیرنده برابر است با:

$$V = \frac{1/0 \cos(0/0013x)}{\cos 22/3^\circ}$$

$$= 1/0812 \cos(0/0013x) \text{ pu}$$

و:

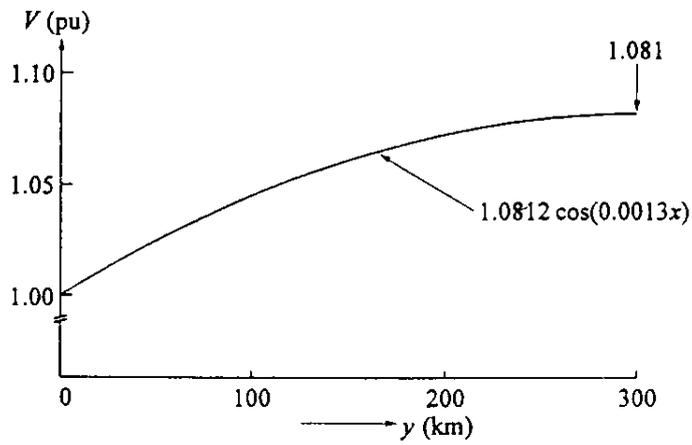
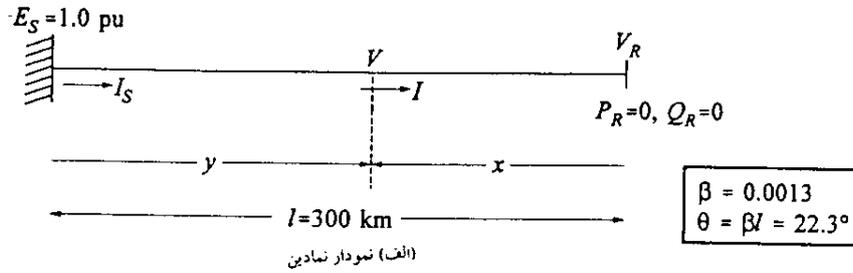
$$I = \frac{1/0 \sin(0/0013x)}{\cos 22/3^\circ}$$

$$= 1/0812 \sin(0/0013x) \text{ pu}$$

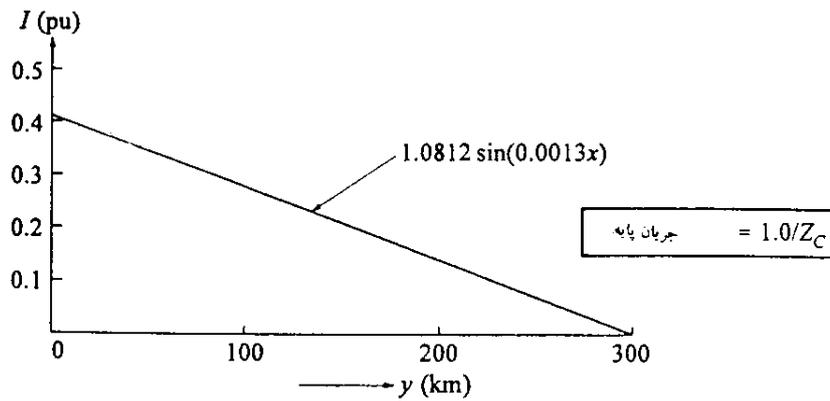
نمایه ولتاژ و جریان در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. جریان، نشاندهنده جریان خازنی خط است که در مبنای واحد و بر پایه جریان در حالت بارامپدانس ضربه‌ای بیان شده است. تنها پارامتر دیگری که بر نتایج شکل ۵-۶ تأثیر می‌گذارد،  $\beta$  است. چون عملاً،  $\beta$  در تمام سطوح ولتاژ برای خطوط هوایی یکسان است (جدول ۱-۶)، نتایج به دست آمده برای تمام سطوح دیگر ولتاژ (و نه فقط برای ولتاژ ۵۰۰ کیلو ولت) صدق می‌کند.

مشاهده می‌کنیم که ولتاژ طرف گیرنده،  $V_R$ ، برای خط ۳۰۰ کیلومتری، مساوی  $1/081 \text{ pu}$  است یعنی به اندازه  $1/81\%$  از ولتاژ طرف فرستنده، بزرگتر است. اگر خط ۶۰۰ کیلومتری می‌بود، ولتاژ طرف گیرنده در حالت مدار باز مساوی  $1/407 \text{ pu}$  می‌شد. برای خطی به طول ۱۲۰۰ کیلومتر (یک چهارم طول موج)، ولتاژ طرف گیرنده در حالت مدار باز بینهایت بزرگ خواهد بود. افزایش ولتاژ در حالت مدار باز و در طرف گیرنده به علت عبور جریان خازنی از اندوکتانس خط است. این پدیده ابتدا به وسیله فرانتی بر روی خطوط هوایی که بار کمی را با شبکه کابلی (و در نتیجه با جریان خازنی قوی) تغذیه می‌کردند، مشاهده گردید و از این رو به اثر فرانتی<sup>۱</sup> موسوم شده است.

1. Ferranti Effect



(ب) نمایه ولتاژ



(ج) نمایه جریان

شکل ۵-۶ نمایه‌های ولتاژ و جریان برای یک خط بدون تلفات ۳۰۰ کیلومتری، زمانی که طرف گیرنده، مدار باز باشد.

در محاسبات بالا فرض شد که ولتاژ طرف فرستنده ثابت می ماند. در عمل، اگر طرف گیرنده، ناگهان مدار باز شود، ولتاژ طرف فرستنده نیز به علت عبور جریان خازنی خط از امپدانس اندوکتیو منبع، افزایش می یابد. از این رو باید در خطوط بلند، روشهای مناسب جبرانگری توان راکتیو به کار گرفته شود تا بتوان افزایش ولتاژ را در سطوح قابل قبولی حفظ کرد. این موضوع در فصل یازدهم مطرح خواهد گردید.

ب) حالتی که خط در دو طرف، به منبع متصل است

برای سادگی کار فرض می کنیم که خط، متقارن است یعنی از دو طرف به منابع مشابه متصل است و  $E_R$  و  $E_S$ ، به ترتیب نمایشگر ولتاژهای طرف فرستنده و گیرنده باشند. با جایگزینی  $x=1$  و  $\theta=\beta l$  در معادلات ۶-۸ و ۶-۹ داریم:

$$\tilde{E}_S = \frac{\tilde{E}_R + Z_C \tilde{I}_R}{\gamma} e^{\gamma l} + \frac{\tilde{E}_R - Z_C \tilde{I}_R}{\gamma} e^{-\gamma l} \quad (۳۷-۶)$$

بنابراین:

$$\tilde{I}_R = \frac{\gamma \tilde{E}_S - \tilde{E}_R (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l})}{Z_C (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})} \quad (۳۸-۶)$$

با جایگزینی  $\tilde{I}_R$  از معادله ۳۸-۶ در معادلات ۶-۸ و ۶-۹، خواهیم داشت:

$$\tilde{V} = \frac{\tilde{E}_S - \tilde{E}_R e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}} e^{\gamma x} + \frac{\tilde{E}_R e^{\gamma l} - \tilde{E}_S}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}} e^{-\gamma x} \quad (۳۹-۶)$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_S - \tilde{E}_R e^{-\gamma l}}{Z_C (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})} e^{\gamma x} - \frac{\tilde{E}_R e^{\gamma l} - \tilde{E}_S}{Z_C (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})} e^{-\gamma x} \quad (۴۰-۶)$$

چون  $\tilde{E}_S = \tilde{E}_R$  است، داریم:

$$\tilde{V} = \frac{\tilde{E}_S - \tilde{E}_S e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}} e^{\gamma x} + \frac{\tilde{E}_S e^{\gamma l} - \tilde{E}_S}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}} e^{-\gamma x} \quad (۴۱-۶)$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_S - \tilde{E}_S e^{-\gamma l}}{Z_C (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})} e^{\gamma x} - \frac{\tilde{E}_S e^{\gamma l} - \tilde{E}_S}{Z_C (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})} e^{-\gamma x} \quad (۴۲-۶)$$

در خط بدون تلفات  $\gamma = j\beta$  است. با جایگزینی  $\theta = \beta l$ ، خواهیم داشت:

$$\tilde{V} = \tilde{E}_S \frac{\cos \beta(l/\gamma - x)}{\cos(\theta/\gamma)} \quad (۴۳-۶)$$

$$\tilde{I} = -j \frac{\tilde{E}_S}{Z_C} \frac{\sin \beta(l/\gamma - x)}{\cos(\theta/\gamma)} \quad (۴۴-۶)$$

نمایه ولتاژ و جریان برای خطی ۴۰۰ کیلومتری با  $E_S = E_R = 1/0$  pu در شکل ۶-۶ رسم شده است. ژنراتورهای دو طرف فرستنده و گیرنده، باید قادر باشند توان راکتیو حاصل از جریان خازنی خط را جذب نمایند. اگر این مقدار از قابلیت تولید توان راکتیو ژنراتور در حالت زیر تحریک فراتر رود، باید جبرانگر مورد نیاز را تأمین کرد.

اگر  $E_S$  و  $E_R$ ، مساوی نباشند، نمایه‌های ولتاژ و جریان متقارن نیست و بزرگترین ولتاژ در میانه خط اتفاق نمی‌افتد بلکه نزدیکتر به طرفی است که ولتاژ بالاتری دارد.

#### ۶-۱-۸ مشخصه‌های ولتاژ - توان [۴ و ۱۰]

الف) خط شعاعی با ولتاژ ثابت طرف فرستنده  
اگر بار در طرف گیرنده،  $P_R + jQ_R$  باشد، داریم؛

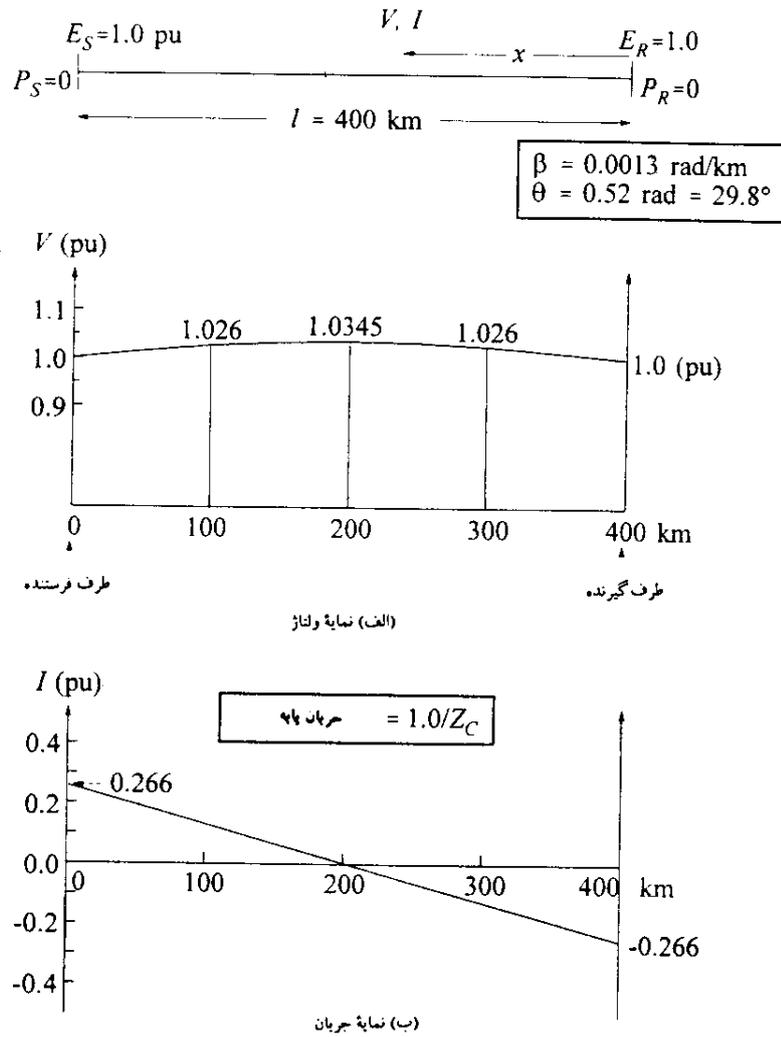
$$\tilde{I}_R = \frac{P_R - jQ_R}{\tilde{V}_R^*}$$

از معادله ۶-۸ وقتی  $x=l$  باشد، خواهیم داشت:

$$\tilde{E}_S = \frac{\tilde{V}_R + Z_C(P_R - jQ_R)/\tilde{V}_R^*}{\gamma} e^{j\gamma l} + \frac{\tilde{V}_R - Z_C(P_R - jQ_R)/\tilde{V}_R^*}{\gamma} e^{-j\gamma l} \quad (۴۵-۶)$$

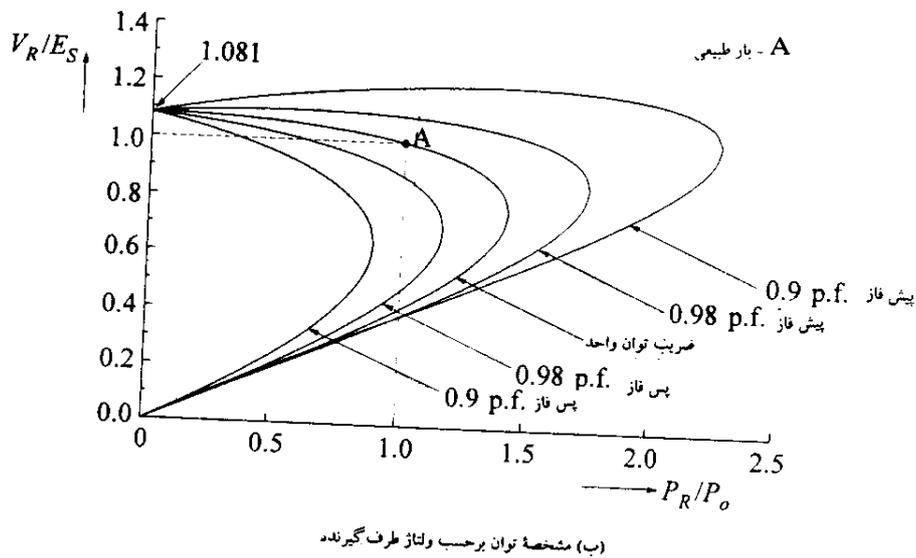
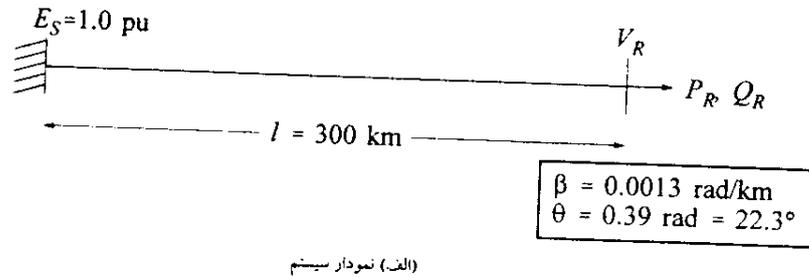
در حالت خط بدون تلفات،  $\gamma = j\beta$  و  $\theta = \beta l$  است، بنابراین:

$$\tilde{E}_S = \tilde{V}_R \cos \theta + jZ_C \sin \theta \left[ \frac{P_R - jQ_R}{\tilde{V}_R^*} \right] \quad (۴۶-۶)$$



شکل ۶-۶ نمایه ولتاژ و جریان یک خط بدون تلفات ۴۰۰ کیلومتری در وضعیت بی‌باری

معادله فوق را می توان در هر بار معلوم و ولتاژ مشخص طرف ارسال، برای  $V_R$  حل کرد. شکل ۷-۶ نمونه ای از رابطه بین بار و ولتاژ طرف گیرنده را برای یک ولتاژ ثابت طرف فرستنده نشان می دهد. نتایج به دست آمده برای خطی ۳۰۰ کیلومتری است که در آن  $E_S = 1.0$  pu باشد و فرض شده که  $\beta = 0.0013$  rad/km است. برای اینکه نتایج برای تمام سطوح ولتاژ صادق باشد، بار ( $P_R$ ) را با تقسیم بر  $P_o$  (بارامپدانس ضربه ای) نرمالیزه کرده ایم. از این شکل، چندین مشخصه اساسی انتقال به صورت جریان متناوب، آشکار می شود:



شکل ۷-۶ مشخصه های ولتاژ - توان یک خط - شعاعی بدون تلفات ۳۰۰ کیلومتری

● در هر ضریب توان مشخص بار، حداکثر توانی وجود دارد که می توان آن را انتقال داد. قاعده‌تاً چنین محدودیتی باید وجود داشته باشد زیرا که زمانی که  $E_S$  ثابت است، افزایش توان طرف گیرنده فقط با کم کردن امپدانس بار امکان پذیر است. این موضوع منجر به افزایش جریان و از طرف دیگر کاهش  $V_R$  و افزایش تلفات خط می شود. تا نقطه‌ای که افزایش جریان بر کاهش  $V_R$ ، غالب است،  $P_R$  افزایش می یابد. اما در نهایت و بعد از آن نقطه، وضعیت به گونه‌ای است که کاهش  $V_R$  باعث کاهش توان می شود.

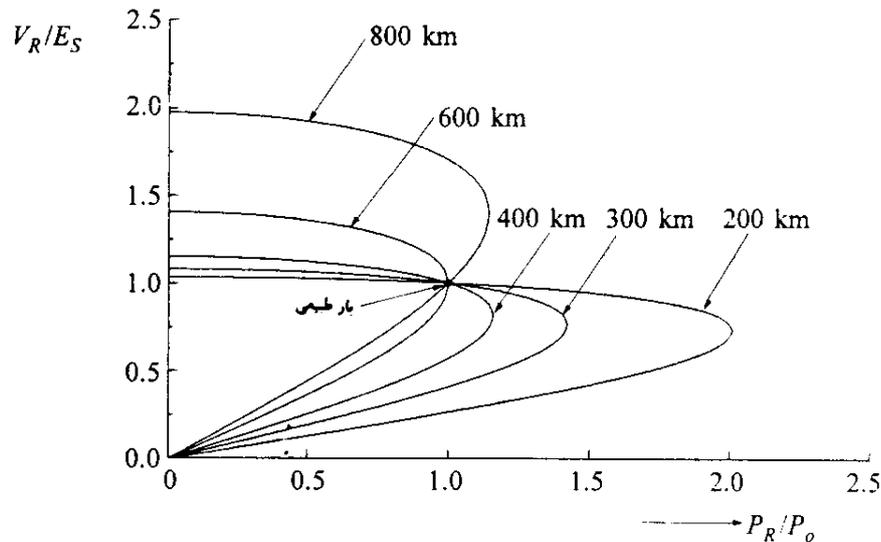
● هر توانی کمتر از توان حداکثر را می توان در دو مقدار متفاوت  $V_R$ ، انتقال داد. مقدار مربوط به عملکرد عادی، متناظر با مقدار بزرگتر است که در محدوده نزدیک به ولتاژ  $1/0 pu$  قرار دارد. در ولتاژ پایینتر، جریان شدیدتر است و ممکن است منجر به تجاوز از حدود حرارتی خط شویم. علاوه بر این، امکان عملکرد و بهره‌برداری در ولتاژ پایینتر به مشخصه‌های بار بستگی دارد، و ممکن است موجب ناپایداری ولتاژ شود. این موضوع در فصل چهاردهم بررسی خواهد شد.

● ضریب توان، تأثیر مهمی بر  $V_R$  و حداکثر توان انتقالی دارد. حداکثر توان و  $V_R$  در حالتی که ضرایب توان پس فاز باشد (بار اندوکتیو،  $Q_R$  مثبت)، کمتر است. با ضرایب توان پیش فاز (بار خازنی،  $Q_R$  منفی)، بخش بالایی نمایه ولتاژ مسطح تر خواهد بود و حداکثر توان بزرگتر است. این بدان معناست که می توان ولتاژ طرف گیرنده را با افزودن جبرانگر خازنی موازی، تنظیم کرد.

تأثیر طول خط در شکل ۶-۸ نشان داده شده که عملکرد خطوطی به طولهای ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ کیلومتر را در ضریب توان واحد نشان می دهد. این موضوع نشان می دهد که در خطوط طولانیتر،  $V_R$  به تغییرات  $P_R$  بسیار حساس است. برای خطوط طولانیتر از ۶۰۰ کیلومتر ( $\theta > 45^\circ$ )، در بارامپدانس ضریب‌ای، مساوی مقدار کمتر از دو ولتاژی است که معادله ۶-۴۶ را ارضا می کنند. در چنین حالتی، احتمالاً سیستم از نظر ولتاژ، ناپایدار است (به فصل چهاردهم مراجعه شود)

ب) خط در دو طرف به منبع متصل است

مشابه حالت بدون بار (بخش ۶-۱-۷)، فرض می کنیم که دامنه ولتاژهای منبع دو طرف مساوی باشد. در حالت با بار،  $E_S$  نسبت به  $E_R$  پیش فاز است. از آنجا که دامنه‌های  $E_S$  و  $E_R$



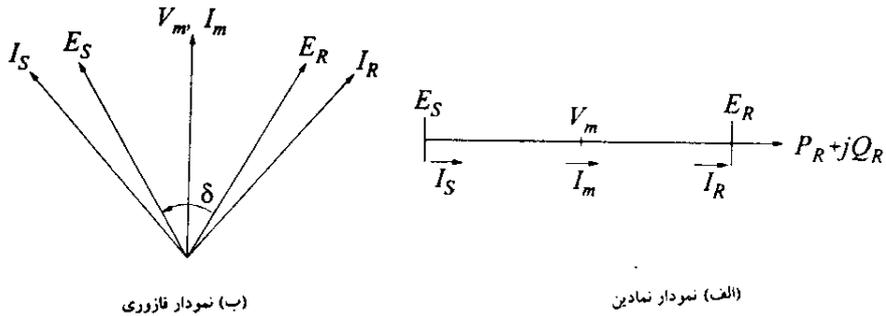
شکل ۸-۶ رابطه بین ولتاژ طرف گیرنده، طول خط و بار یک خط شعاعی بدون تلفات

مساوی است، شرایط زیر صادق است:

- ولتاژ نقطه وسط خط، از لحاظ زاویه، وسط زاویه بین  $E_R$  و  $E_S$  قرار دارد.
- ضریب توان در نقطه وسط خط، مساوی یک است.
- اگر  $P_R > P_o$  باشد، هر دو طرف، توان راکتیو به خط تزریق می‌کنند و اگر  $P_R < P_o$  باشد، هر دو طرف، توان راکتیو از خط جذب می‌کنند.

نمودار فازوری حالت  $P_R > P_o$  در شکل ۹-۶ نشان داده شده است.

شکل ۸-۶ را می‌توان برای بررسی چگونگی تغییرات  $V_m$  با توان انتقالی، به کار برد. با فرض  $E_S = E_R = 1/0$  pu و طول خط مساوی نصف طول واقعی خط، منحنیهای نشان داده شده در شکل ۸-۶، مقادیر  $V_m$  را می‌دهند. به عنوان مثال  $V_m$  با بار برای خطی به طول ۴۰۰ کیلومتر که در دو طرف به منبع متصل است مشابه تغییرات  $V_R$  برای خطی به طول ۲۰۰ کیلومتر و در همان شرایط است. در ۴۰۰ کیلومتر، عملکرد خط به میزان زیادی با داشتن منبع در دو طرف بهبود می‌یابد. اما در نقطه وسط یک خط متقارن ۸۰۰ کیلومتری، تغییرات ولتاژ، بزرگ



شکل ۹-۶ روابط ولتاژ و جریان فاز با  $E_S$  مساوی  $E_R$  و  $P_R$  کمتر از  $P_s$

و غیرقابل قبول است.

گرچه فرض کردیم که در دو طرف، دامنه منابع ولتاژ مشابه است، اما نتیجه گیریهای به دست آمده به اندازه کافی جامع است و درک فیزیکی مفیدی را در برخورد با حالات پیچیده تر ارائه می دهد.

#### ۹-۱-۶ ملاحظات مربوط به توان انتقالی و پایداری

با فرض اینکه خط بدون تلفات باشد و با جایگزینی  $x=1$  و  $\theta=\beta$  در معادله ۹-۶ داریم:

$$\tilde{E}_S = \tilde{E}_R \cos \theta + jZ_C \tilde{I}_R \sin \theta$$

با بیان  $I_R$  بر حسب  $P_R$  و  $Q_R$  خواهیم داشت:

$$\tilde{E}_S = \tilde{E}_R \cos \theta + jZ_C \sin \theta \left[ \frac{P_R - jQ_R}{\tilde{E}_R^*} \right] \quad (۹-۴۷)$$

مطابق با شکل ۹-۶ "ب"، فرض کنید که  $\theta$  زاویه ای باشد که  $E_S$  نسبت به  $E_R$  پیش فاز است

(زاویه بار<sup>۱</sup> یا زاویه انتقال<sup>۲</sup>). اگر  $E_R$  را به عنوان فازور مرجع فرض کنیم،  $E_S$  را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{E}_S = E_S e^{j\delta} = E_S (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (۴۸-۶)$$

با مساوی قرار دادن قسمت‌های حقیقی و موهومی معادلات ۴۷-۶ و ۴۸-۶ داریم:

$$E_S \cos \delta = E_R \cos \theta + Z_C (Q_R / E_R) \sin \theta \quad (۴۹-۶)$$

$$E_S \sin \delta = Z_C (P_R / E_R) \sin \theta \quad (۵۰-۶)$$

معادله ۵۰-۶ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P_R = \frac{E_S E_R}{Z_C \sin \theta} \sin \delta \quad (۵۱-۶)$$

معادله فوق رابطه بسیار مهمی را برای توان انتقالی خط ارائه می دهد. این رابطه هم برای بار سنکرون و هم بار آسنکرون در طرف گیرنده صادق است. تنها تقریب به کار رفته این است که از تلفات خط صرف نظر شده است. در خطوط کوتاه می توان  $\sin \theta$  را با  $\theta$  بر حسب رادیان جایگزین کرد. بنابراین:

$$Z_C \sin \theta = Z_C \theta = \sqrt{L/C} \omega \sqrt{LC} l = \omega L l \\ = X_L \quad \text{راکتانس اندوکتیو سری}$$

از این رو عبارت مربوط به توان انتقالی به شکل آشناتر زیر درمی آید:

$$P_R \approx \frac{E_S E_R}{X_L} \sin \delta \quad (۵۲-۶)$$

اگر  $E_S = E_R = V$  باشد (ولتاژ نامی)، بارامپدانس ضربه‌ای برابر است با:

$$P_s = \frac{E_S E_R}{Z_C}$$

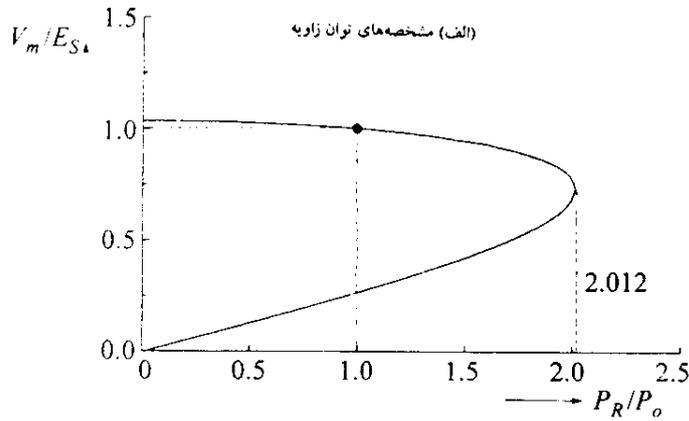
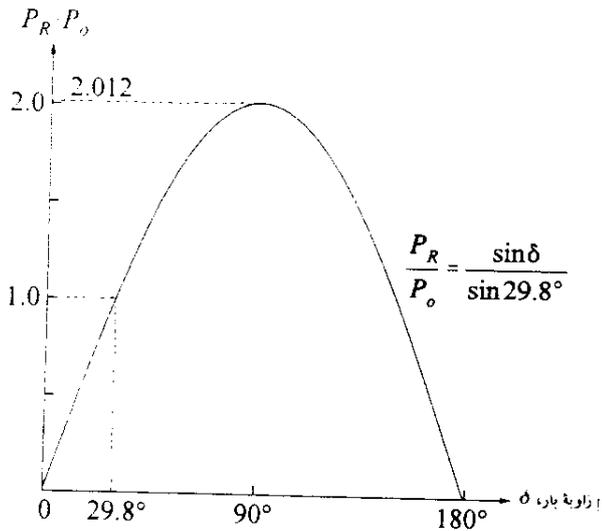
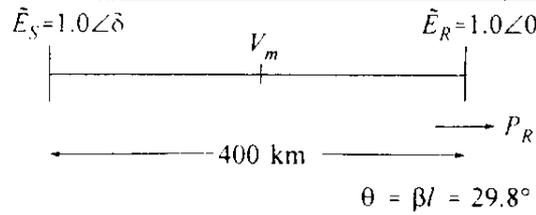
و معادله ۶-۵۱ به صورت زیر خواهد شد:

$$P_R = \frac{P_o}{\sin \theta} \sin \delta \quad (۶-۵۳)$$

زمانی که مقادیر ولتاژ ثابت باشد، توان انتقالی تنها تابعی از زاویه انتقال  $\delta$  است و اگر  $P_R$  مساوی بار امیدانسی ضربه‌ای ( $P_o$ ) باشد،  $\delta = \theta$  است.

شکل ۶-۱۰ "الف" این رابطه را برای خطی ۴۰۰ کیلومتری با  $\theta = 0.52 \text{ rad}$  و  $\sin \theta = 0.497$ ، نشان می‌دهد. مفید خواهد بود اگر آن را با مشخصه ولتاژ - توان شکل ۶-۸ مقایسه کنیم. مشخصه مربوط به خط متقارن ۴۰۰ کیلومتری (معادل با خط شعاعی ۲۰۰ کیلومتری در شکل ۶-۸) مجدداً در شکل ۶-۱۰ "ب" به دست آمده است. از شکل‌های ۶-۱۰ "الف" و "ب" مشاهده می‌کنیم که برای توان، مقدار حداکثری وجود دارد که می‌توان انتقال داد. اگر زاویه بار افزایش یابد (یعنی سیستم سنکرون طرف فرستنده نسبت به سیستم سنکرون طرف گیرنده پیشتر افتد)، توان انتقالی مطابق با شکل ۶-۱۰ "الف" و معادله ۶-۵۳ افزایش می‌یابد. این موضوع همراه با کاهش ولتاژ میانی خط ( $V_m$ ) از شکل ۶-۱۰ "ب" و افزایش جریان  $I_m$  در آن نقطه و در نتیجه افزایش توان است. تا نقطه خاصی، افزایش  $I_m$  بر کاهش  $V_m$  غالب است. زمانی که زاویه بار به ۹۰° رسید، توان انتقالی به حداکثر خود می‌رسد. بالاتر از آن، کاهش  $V_m$  بر افزایش حاصل در  $I_m$ ، غالب است و بنابراین با افزایش زاویه بار، حاصل ضرب آنها، کاهش می‌یابد. همچنان که توضیح خواهیم داد، وقتی سیستم به این وضع برسد، ناپایدار خواهد شد.

سیستمهای طرف فرستنده و گیرنده را می‌توان بر حسب ماشینهای سنکرون معادل نیز در نظر گرفت. در این صورت زاویه بار  $\delta$  معیاری از موقعیت نسبی روتورهای این دو ماشین است. بالاتر از نقطه حداکثر توان، افزایش در گشتاور ماشین طرف فرستنده، موجب افزایش  $\delta$  اما کاهش توان انتقالی می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که ماشین طرف فرستنده شتاب گیرد و ماشین طرف گیرنده با کاهش شتاب روبرو شود. در نتیجه زاویه  $\delta$  باز هم افزایش می‌یابد. این یک حالت گسیختگی است و دو ماشین (یا دو سیستم)، حالت سنکرونیزه (هماهنگ) خود را از دست می‌دهند. حداکثر توان انتقالی، نمایشگر حد پایداری سیگنال کوچک یا حالت ماندگار است. در خط ۴۰۰ کیلومتری مورد نظر در شکل‌های ۶-۱۰ "الف" و "ب" این حد،



(ب) ولتاژ نقطه میانه بر حسب تابعی از توان انتقالی

شکل ۶-۱۰ مشخصه‌های  $P_R - \delta$  و  $P_R - V_m$  مربوط به خط بدون تلفات ۴۰۰ کیلومتری که توان را بین دو سیستم بزرگ منتقل می‌کند.

مساوی  $\frac{P}{497}$  یا  $2/012$  برابر بار امپدانس ضربه‌ای است.

بررسی انجام شده فوق در خصوص پایداری، حالت بسیار ایده‌آلی را نشان می‌دهد. اما این فرض که  $E_R$  و  $E_S$  دارای دامنه ثابت هستند غیر واقعی است و برای بررسی دقیق، باید مشخصه‌های دینامیکی طرفهای فرستنده و گیرنده نیز مد نظر قرار گیرد. با وجود این، بررسی انجام شده در درک پدیده و مشخصه‌های عملکرد خطوط انتقال مفید است. فصل دوازدهم به بررسی مشروح و جامع مسأله پایداری سیگنال کوچک می‌پردازد.

اگر سیستم طرف گیرنده، باری آسنکرون باشد، هنوز حداکثر توانی وجود دارد که می‌توان آن را انتقال داد (شکل ۶-۱۰ "ب") اما حفظ حالت سنکرون نیزه دیگر مطرح نیست.

مقدار نیاز به توان راکتیو

معادله ۶-۴۹، رابطه بین توان راکتیو طرف گیرنده و ولتاژهای دو طرف را به صورت زیر بیان می‌کرد:

$$E_S \cos \delta = E_R \cos \theta + Z_C(Q_R/E_R) \sin \theta$$

با مرتب کردن داریم:

$$Q_R = \frac{E_R (E_S \cos \delta - E_R \cos \theta)}{Z_C \sin \theta}$$

به طور مشابه، توان راکتیو طرف فرستنده برابر است با:

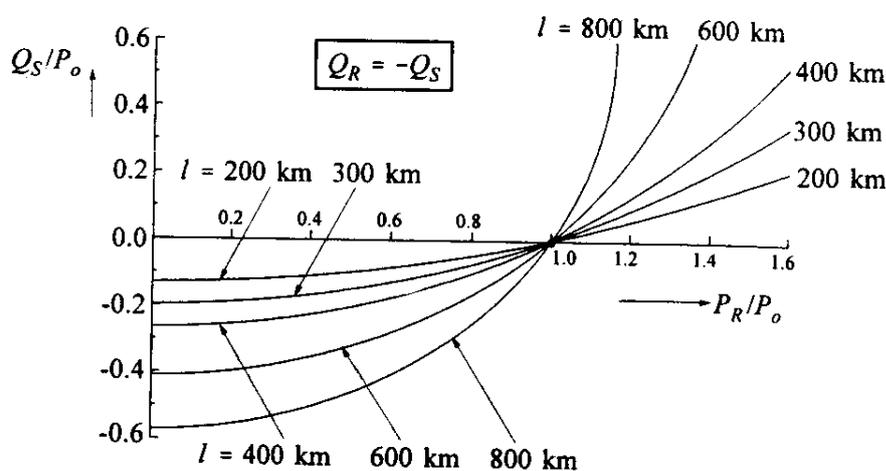
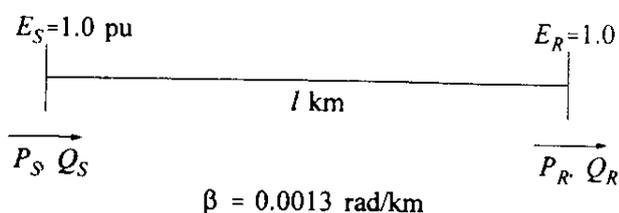
$$Q_S = \frac{-E_S (E_R \cos \delta - E_S \cos \theta)}{Z_C \sin \theta}$$

اگر دامنه‌های  $E_R$  و  $E_S$  مساوی باشند، داریم:

$$Q_R = -Q_S \\ = \frac{E_S^2 (\cos \delta - \cos \theta)}{Z_C \sin \theta}$$

شکل ۶-۱۱ مقدار نیاز به توان راکتیو را در طولهای مختلف خط بر حسب تابعی از توان حقیقی انتقالی نشان می‌دهد. هم توان حقیقی و هم توان راکتیو با تقسیم بر بار امپدانس ضربه‌ای  $P$ ،

نرمالیزه شده‌اند. اگر  $P_R < P$  باشد، جریان اضافی خازنی وجود دارد و  $Q_S$ ، منفی و  $Q_R$ ، مثبت است که نشاندهنده جذب توان راکتیو به وسیله سیستمهای هر دو طرف است. اگر  $P_R > P$  باشد، توان راکتیو از هر دو سیستم به خط تزریق می‌شود. اگر منابع کافی تأمین توان راکتیو در دو طرف خط وجود داشته باشد، می‌توان ولتاژهای دو طرف خط انتقال را علی‌رغم تغییر بار، تقریباً ثابت نگه داشت.



شکل ۱۱-۶ توان راکتیو پایانه به صورت تابعی از توان انتقالی برای طولهای مختلف خط

### ۱۰-۱-۶ تأثیر تلفات خط بر مشخصه‌های V-P و Q-P

تاکنون در بررسی عملکرد خطوط انتقال، از تلفات خط صرف نظر کرده‌ایم. اکنون تأثیر مقاومت خط را بر مشخصه‌های  $V_R-P_R$  و  $Q_S-P_R$  با در نظر گرفتن یک خط ۳۰۰ کیلومتری، ۵۰۰

کیلو ولت و با پارامترهای زیر بررسی می‌کنیم:

$$\begin{aligned} R &= 0.028 \Omega/\text{km} & X_L &= 0.325 \Omega/\text{km} & b_C &= 5/20 \mu\text{S}/\text{km} \\ \alpha &= 0.000057 \text{ nepers}/\text{km} & \beta &= 0.0013 \text{ rad}/\text{km} \end{aligned}$$

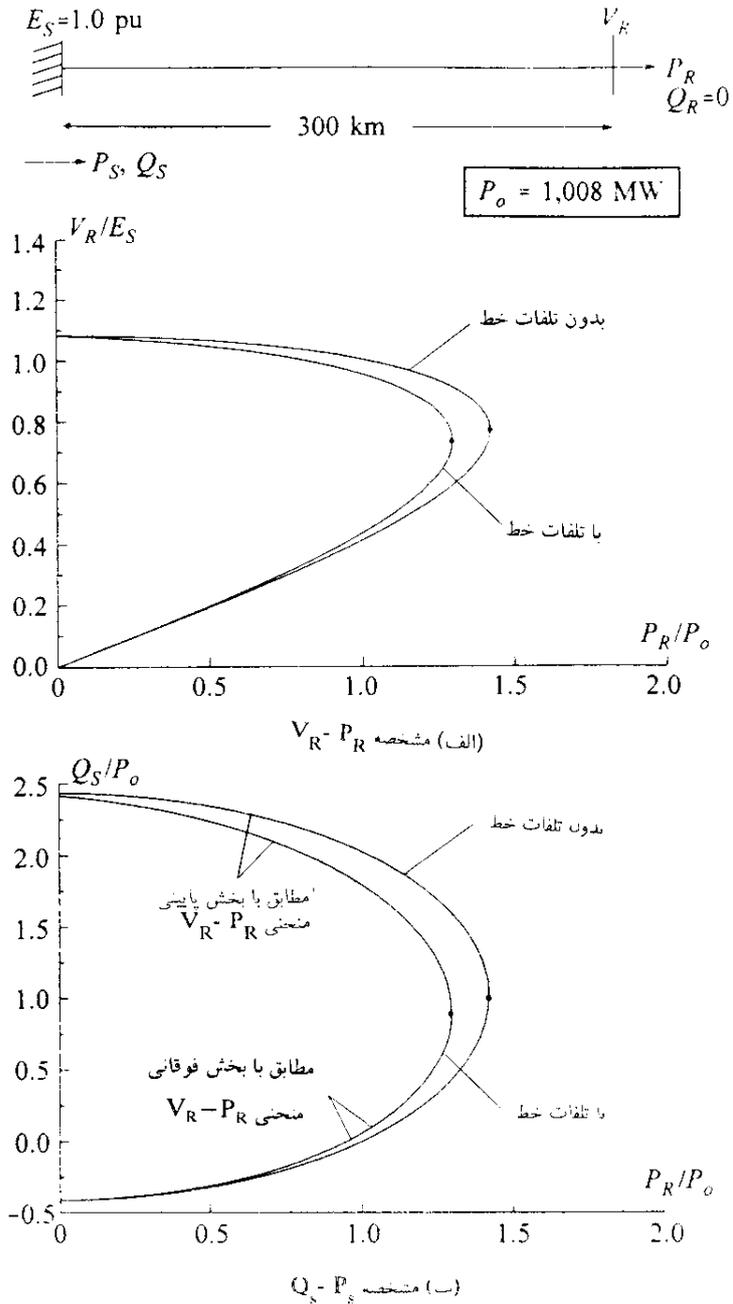
فرض می‌کنیم که خط، باری شعاعی با ضریب توان واحد را تغذیه کند و  $E_S$  (ولتاژ طرف فرستنده) در مقدار  $1/0 \text{ pu}$  ثابت نگه داشته شود. روابط بین  $V_R$  و  $P_R$  و بین  $Q_S$  و  $P_R$  در شکل ۱۲-۶ با و بدون در نظر گرفتن مقاومت خط رسم شده‌اند. مقادیر  $P_R$  و  $Q_S$  نسبت به مقدار پایه بار امپدانس ضربه‌ای  $P_{(1008 \text{ MW})}$ ، نرمالیزه شده‌اند. مشاهده می‌شود (شکل ۱۲-۶ "الف") که تأثیر مقاومت خط، کاهش حداکثر توان انتقالی به میزان  $1/5\%$  است.

بخش پایینی منحنیهای  $Q_S-P_R$  در شکل ۱۲-۶ "ب" مطابق با بخش بالایی مشخصه‌های  $V_R-P_R$  است که ولتاژ طرف گیرنده  $V_R$  نزدیکتر به مقدار نامی است. مقادیر بالای  $Q_S$  در بخش بالایی منحنی  $Q_S-P_R$ ، به علت مقادیر بالای جریان خط (و بنابراین تلفات بالای  $XI^2$ ) مربوط به بخش پایینی منحنی  $V_R-P_R$  است. مشاهده می‌کنیم که تأثیر مقاومت خط در بخش پایینی، بر مقدار محاسبه شده  $Q_S$  فقط زمانی قابل توجه است که  $P_R$  از  $P_{(1008 \text{ MW})}$  بیشتر باشد.

### ۱۱-۱-۶-۱۱-۱-۶ حدود حرارتی

حرارت حاصل از عبور جریان از خطوط انتقال دو تأثیر نامطلوب دارد:

- ذوب و از دست رفتن تدریجی قدرت مکانیکی هادی آلومینیومی به علت قرار گرفتن در معرض دماهای بالا به طور مداوم؛
  - افزایش انحنای خط و کاهش فاصله آن با زمین به دلیل انبساط خط در دماهای بالا.
- معمولاً دومین عامل از عوامل فوق، حداکثر دمای کاری مجاز را تعیین می‌کند. در این حد، انحنای خط به حداکثر مجاز خود نسبت به زمین می‌رسد. بر اساس ملاحظات مربوط به ذوب، حداکثر دمای مجاز برای خطوط با مقدار آلومینیوم بالا مساوی  $127^\circ \text{C}$  و برای سایر هادیها،  $150^\circ \text{C}$  است.



شکل ۱۲-۶ مشخصه‌های  $V_R - P_R$  و  $Q_S - P_S$  مربوط به یک خط ۳۰۰ کیلومتری ۵۰۰ کیلوولتی که یک بار شعاعی را تغذیه می‌کند.

حداکثر جریان مجاز، بستگی به دمای محیط و سرعت باد دارد. ثابت زمانی حرارتی در حدود ۱۰ تا ۲۰ دقیقه است. از این رو بین ظرفیت نامی پیوسته<sup>۱</sup> و ظرفیت نامی زمان محدود<sup>۲</sup> تفاوت قائل می‌شویم. می‌توان در وضعیتهای اضطراری و بر اساس جریان قبل از اغتشاش، دمای محیط و سرعت باد، از ظرفیت نامی زمان محدود استفاده کرد. به عنوان مثال برای خط ۲۳۰ کیلوولتی که پارامترهای آن در جدول ۶-۱ داده شده، ظرفیتهای نامی اضطراری در تابستان و زمستان، به ترتیب ۱۸۸۰ آمپر و ۲۰۴۰ آمپر است. این مقادیر، مقادیر طراحی است که بر اساس مقادیر حدی دمای محیط، سرعت باد و تابش خورشید داده شده است.

#### ۶-۱-۱۲ مشخصه‌های بارپذیری<sup>۳</sup> خط

مفهوم بارپذیری خط در درک بهتر قابلیت انتقال توان خط براساس سطح ولتاژ و طول خط، مفید است. بارپذیری خط طبق تعریف برابر با حد بارگذاری خط (بر حسب درصدی از بار امیدانسی ضربه‌ای) در محدوده‌های مشخص حرارتی، افت ولتاژ و پایداری است. برای نخستین بار، کلیر<sup>۴</sup> در سال ۱۹۵۳ میلادی این مفهوم را مطرح کرد [۱۱]. او بر اساس ملاحظات عملی و تجربی منحنیهای قابلیت انتقال توان خطوط را در محدوده ولتاژ بین ۳۴/۵ kV تا ۳۳۰ kV و تا طول ۴۰۰ مایل (حدود ۶۴۵ کیلومتر) به دست آورد. این منحنیها (که به نام خودش مشهور است) ابزار ارزشمندی برای مهندسان طراح سیستمهای انتقال برای تخمین سریع حدود حداکثر بارگذاری خطوط است. بعدها کار او در مرجع ۱۲ به صورت محاسباتی تعمیم داده شد تا ولتاژهای بالاتر (تا ۱۵ کیلوولت) و خطوط طولانیتر (۶۰۰ مایل یا ۹۶۰ کیلومتر) نیز قابل مطالعه باشند.

شکل ۶-۱۳ منحنی عمومی بارپذیری را برای خطوط انتقال جبران نشده در تمام سطوح ولتاژ نشان می‌دهد. این منحنی که بر اساس نتایج مرجع ۱۲ است مقادیر حدی توانی را که می‌توان بر حسب تابعی از طول خط انتقال داد، نشان می‌دهد. سه عامل بر این مقادیر حدی تأثیر می‌گذارد؛ حد حرارتی، حد افت ولتاژ و حد پایداری سیگنال کوچک یا حالت ماندگار. در تعیین منحنی بارپذیری فرض می‌شود که حداکثر افت مجاز ولتاژ در طول خط، ۵٪ و حداقل

1. Continuous Rating

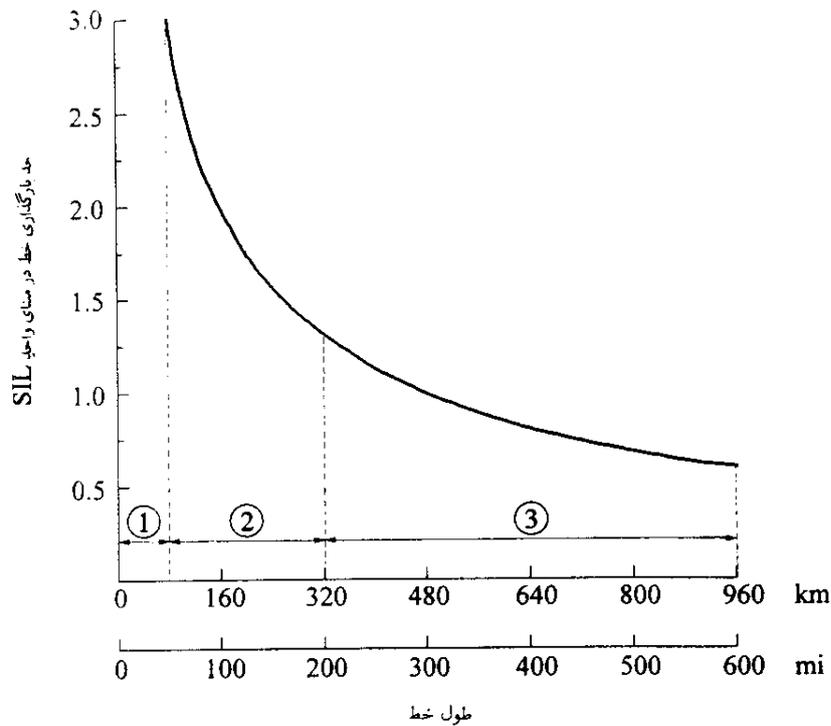
2. Limited Time Rating

3. Loadability

4. Clair

حاشیه فاز پایداری حالت ماندگار، ۳۰٪ است. با مراجعه به شکل ۶-۱۴، درصد حاشیه پایداری حالت ماندگار به صورت زیر تعریف می شود:

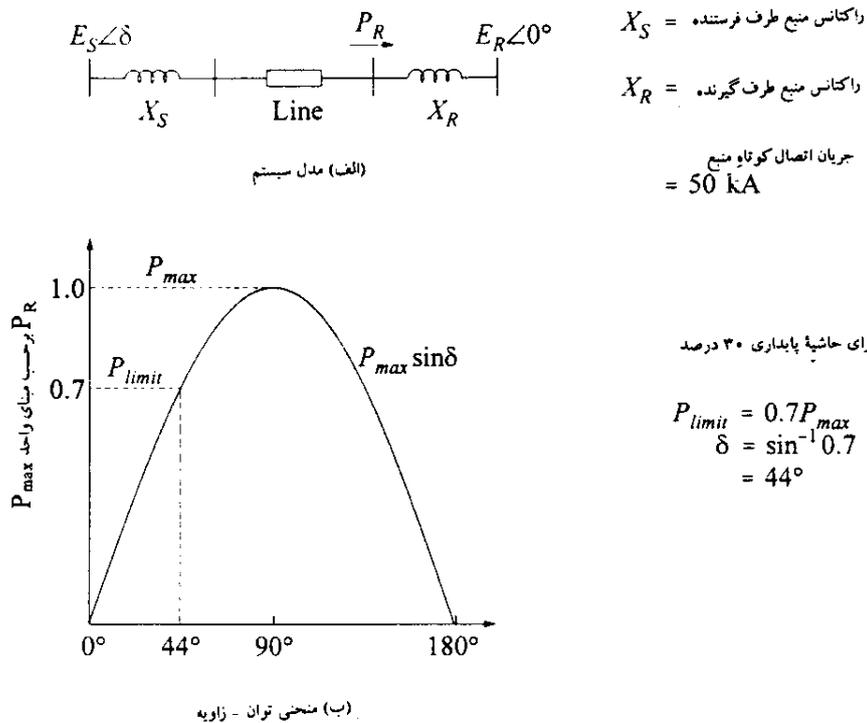
$$\text{درصد حاشیه پایداری} = \frac{P_{\max} - P_{\text{limit}}}{P_{\max}} \times 100$$



- ① صفر تا ۸۰ کیلومتر: ناحیه محدود سازی گرمایی  
 ② ۸۰ تا ۳۲۰ کیلومتر: ناحیه محدود سازی افت ولتاژ  
 ③ ۳۲۰ تا ۹۶۰ کیلومتر: ناحیه محدود سازی پایداری سیگنال کوچک  
 (حالت ماندگار)

شکل ۶-۱۳ منحنی بارپذیری خط انتقال

از شکل ۶-۱۴ مشاهده می‌کنیم که برای درصد حاشیه پایداری مساوی ۳۰٪، زاویه بار  $\delta$  مساوی ۴۴° است. محاسبه حد پایداری، تأثیر راکتانسهای معادل سیستمهای دو طرف خط را در نظر می‌گیرد. در مرجع ۱۲، قدرت سیستم هر طرف معادل با ۵۰ kA ظرفیت اتصال کوتاه در نظر گرفته شده است که سیستمی قوی را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۴ محاسبه حاشیه پایداری حالت ماندگار

چون مقاومتهای خطوط فشار بسیار قوی (EHV) و فوق‌العاده قوی (UHV) بسیار کمتر از راکتانسهای آنهاست، این خطوط را می‌توان بدون تلفات در نظر گرفت. چون از طرفی پارامتر  $\beta$  عملاً برای تمام خطوط هوایی یکسان است، بارپذیری خط بر حسب درصدی از بار امیدانس

ضربه‌ای به طور عمومی در مورد تمام سطوح ولتاژ صادق است.

مطابق با شکل ۶-۱۳، حدود بارگذاری خط با توجه به ملاحظات ذیل تعیین می‌شود:

- حدود حرارتی برای خطوط تا ۸۰ کیلومتر (۵۰ مایل)؛
- حدود افت ولتاژ برای خطوط بین ۸۰ تا ۳۲۰ کیلومتر (۲۰۰ مایل)؛
- حدود پایداری برای خطوط طولانیتر از ۳۲۰ کیلومتر.

برای خطوط طولانیتر از ۴۸۰ کیلومتر (۳۰۰ مایل)، بارپذیری خط کمتر از بارامپدانس ضربه‌ای است. می‌توان حد بارپذیری را با افزودن جبرانگرها به خط، افزایش داد. روشهای گوناگون جبران سازی و ملاحظات مربوط به انتخاب آنها در فصل یازدهم مطرح خواهد شد.

منحنی عمومی بارپذیری مذکور در این بخش، روش ساده‌ای را برای درک قابلیت انتقال توان خطوط نشان می‌دهد. این مفهوم در طراحی اولیه سیستمهای انتقال مفید است، اما باید با احتیاط مورد استفاده واقع شود. سیستمهای قدرت بزرگ و پیچیده نیازمند ارزیابی مشروح عملکرد و در نظر گرفتن ملاحظات اضافی مؤثر بر عملکرد خود هستند.

#### تأثیر چندتایی بودن هادیها

معمولاً در خطوط فشار بسیار قوی برای کنترل سطح الکتریکی در سطوح هادیها و در نتیجه اجتناب از نویز غیر قابل قبول بالای رادیویی، نویز قابل استماع، و تلفات کرونا، از هادیهای چندتایی استفاده می‌شود. استفاده از این روش باعث کاهش فاصله میانگین هندسی می‌شود. از این رو، با کاهش اندوکتانس سری و افزایش خازن موازی خط، امپدانس مشخصه  $Z_c$ ، کاهش می‌یابد. کاهش  $Z_c$  حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد است. از این رو بار امپدانس ضربه‌ای و در نتیجه بارپذیری خط، افزایش می‌یابد.

#### ۶-۲ ترانسفورمرها

ترانسفورمرها امکان استفاده از سطوح مختلف ولتاژ را در سرتاسر سیستم فراهم می‌کنند. از نظر بازده و قابلیت انتقال توان، باید ولتاژ انتقال بالا باشد اما این کار را از دید عملی امکان‌پذیر نیست که ولتاژ را در این سطوح تولید و مصرف کرد. در سیستمهای مدرن قدرت، ولتاژ، بین نقطه تولید و مصرف‌کنندگان نهایی، چهار تا پنج مرتبه تبدیل می‌شود. در نتیجه، ظرفیت کل

نامی نواحی ظاهری ترانسفورمرهای یک سیستم قدرت حدود پنج برابر ظرفیت کل نامی ژنراتورهای آن است.

اغلب از ترانسفورمرها، علاوه بر تبدیل ولتاژ، برای کنترل ولتاژ و انتقال توان راکتیو نیز استفاده می‌شود. از این رو، عملاً تمام ترانسفورمرهای موجود برای انتقال عمده توان و بسیاری از ترانسفورمرهای توزیع در یک یا تعداد بیشتری از سیم‌پیچهای خود برای تغییر نسبت تبدیل دارای تپ<sup>۱</sup> هستند. از نظر سیستم قدرت، تغییر نسبت تبدیل برای جبرانسازی تغییرات ولتاژ سیستم ضروری است. دو نوع روش تغییر تپ وجود دارد. یکی تغییردهنده تپ خارج از مدار<sup>۲</sup> و دیگری تغییر دهنده تپ زیربار<sup>۳</sup> (ULTC). در نوع اول لازم است که ترانسفورمر ابتدا از مدار خارج شود. از این نوع، زمانی استفاده می‌شود که لازم است نسبت تبدیل برای جبرانسازی تغییرات طولانی مدت از قبیل: رشد بار، گسترش سیستم یا تغییرات فصلی، تغییر یابد. از نوع دوم زمانی استفاده می‌شود که تغییرات متواتر از قبیل جبرانسازی تغییرات روزانه سیستم، مورد نظر است. معمولاً تپ می‌تواند در محدوده‌ای بین  $\pm 10\%$  تا  $\pm 15\%$  تغییر کند.

ممکن است ترانسفورمرها به صورت واحدهای سه فاز یا سه واحد تک فاز باشند. از نوع دوم معمولاً در مورد ترانسفورمرهای بزرگ و فشار بسیار قوی و ترانسفورمرهای توزیع استفاده می‌شود. ترانسفورمرهای بزرگ و فشار بسیار قوی به دلیل هزینه قطعات یدکی، ملاحظات عایقی و حمل و نقل، از این نوع انتخاب می‌شوند. در سیستمهای توزیع نیز به دلیل تأمین بارهای تک فاز از این نوع ترانسفورمر استفاده می‌شود.

اگر نسبت تبدیل، کوچک باشد معمولاً از اتوترانسفورمر استفاده می‌شود. سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه اتوترانسفورمرها به هم متصل شده‌اند به گونه‌ای که توان انتقالی به وسیله تزویج مغناطیسی، فقط بخشی از توان کل منتقل شده از طریق ترانسفورمر است. از این رو، بین مدارهای طرف اولیه و ثانویه، اتصال فلزی وجود دارد. این حالت بر خلاف ترانسفورمرهای معمول دو سیم‌پیچ است که دو مدار، جدا از هم هستند. اغلب، اتوترانسفورمرها به صورت ستاره به هم متصل می‌شوند و نقطه خنثی مستقیماً به زمین متصل می‌شود تا انتقال اغتشاشهای یک طرف به طرف دیگر، حداقل شود. معمول است که یک سیم پیچ ثالثیه با ظرفیت کم نیز در

1. Tap      2. Off — line      3. Under Load Tap Changer

این نوع ترانسفورمرها وجود داشته باشد. سیم پیچ ثالثیه مسیری را برای عبور جریانهای هارمونیک سوم تأمین می‌کند و از این رو انتقال آنها را به شبکه کاهش می‌دهد. همچنین به پایداری نقطه خنثی کمک می‌کند. جبران سازی توان راکتیو اغلب از طریق استفاده از راکتورها و خازنهایی در یک شین ثالثیه فراهم می‌گردد ( به فصل یازدهم مراجعه شود). در مقایسه با ترانسفورمرهای معمول دو سیم پیچه، اتو ترانسفورمرها از نظر هزینه کمتر، بازده بالاتر و تنظیم بهتر، برتری دارند. این محاسن زمانی که نسبت تبدیل، افزایش یابد، درجه اهمیت خود را از دست می‌دهد. از این رو از اتو ترانسفورمرها در حالتی که نسبت تبدیل کوچک است (نظیر  $kV : 230 : 500$ )، استفاده می‌شود.

در سیستمهای به هم پیوسته گاهی لازم است که اتصال الکتریکی بین یک یا چند سیستم قدرت برقرار شود که تشکیل مدارهای حلقوی را می‌دهند برای کنترل انتقال توان و جلوگیری از اضافه بار خطوط خاصی، معمولاً لازم است که از ترانسفورمرهای تغییر دهنده فاز<sup>۱</sup> استفاده شود. اغلب لازم است که با توجه به تغییرات در وضعیتهای سیستم، حد تغییر فاز، تغییر یابد که این موضوع استفاده از تغییر دهنده انتقال فاز زیر بار را ضروری می‌سازد. علاوه بر تغییر فاز، ممکن است تبدیل ولتاژ نیز ضروری باشد.

ترانسفورمر، ابزار آشنایی است که اصول اولیه عملکرد آن در کتب استاندارد [۲، ۵، و ۷] مطرح شده است. مراجع ۲ و ۸ اطلاعاتی را در خصوص مسائل فیزیکی انواع ترانسفورمرها و مشخصه‌های عملکرد آنها ارائه می‌دهند. در اینجا، تأکید بر نمایش ترانسفورمرها در مطالعات پایداری و پخش بار است.

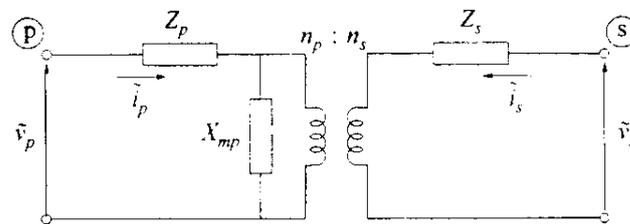
## ۶-۲-۱ نمایش ترانسفورمرهای دو سیم پیچه

### مدار معادل بر حسب مقادیر فیزیکی

مدار معادل یک ترانسفورمر دو سیم پیچه که کمیت‌های آن بر حسب مقادیر فیزیکی بیان شده، در شکل ۶-۱۵ آمده است. زیر نویسهای  $p$  و  $s$  به ترتیب کمیت‌های طرفهای اولیه و ثانویه را نشان می‌دهند. راکتانس مغناطیس کننده،  $X_{mp}$ ، بسیار بزرگ است و معمولاً از آن صرف نظر می‌شود.

1. Phase – angle (shift) Transformers

در مطالعات خاصی که نمایش اشباع ترانسفورمر، ضروری است، راکتانس مغناطیس کننده را می توان به صورت تقریبی به پایانه های طرف اولیه یا ثانویه انتقال داد و آن را به صورت یک راکتانس موازی متغیر و وابسته به ولتاژ، نمایش داد.



ترانسفورمر ایده آل

$$Z_p = R_p + jX_p ; Z_s = R_s + jX_s$$

$R_p, R_s$ : مقاومت های سیم پیچ اولیه و ثانویه  
 $X_p, X_s$ : راکتانس های نشتی سیم پیچ اولیه و ثانویه  
 $n_p, n_s$ : تعداد دور سیم پیچ اولیه و ثانویه  
 $X_{mp}$ : راکتانس مغناطیس کننده ارجاع ده به طرف اولیه

شکل ۶-۱۵ مدار معادل اصلی یک ترانسفورمر دو سیم پیچه

#### مدار معادل برحسب مقادیر در مبنای واحد

با انتخاب مناسب مقادیر پایه برای دو طرف اولیه و ثانویه، مدار معادل را می توان با حذف ترانسفورمر ایده آل، ساده کرد. اما، همیشه این موضوع، امکان پذیر نیست و اغلب باید کمیت های پایه مستقل از نسبت تبدیل واقعی، انتخاب شوند. از این رو لازم است که یک نسبت غیر اسمی تبدیل<sup>۱</sup> مورد توجه قرار گیرد.

1. Off — nominal Turn Ratio

با صرف نظر کردن از مدار معادل شکل ۶-۱۵، داریم:

$$\tilde{V}_p = Z_p \tilde{I}_p + \frac{n_p}{n_s} \tilde{V}_s - \frac{n_p}{n_s} Z_s \tilde{I}_s \quad (54-6)$$

$$\tilde{V}_s = \frac{n_s}{n_p} \tilde{V}_p - \frac{n_s}{n_p} Z_p \tilde{I}_p + Z_s \tilde{I}_s \quad (55-6)$$

فرض کنید که:

در موقعیت اسمی تپ طرف اولیه  $Z_{p0} = Z_p$ ؛

در موقعیت اسمی تپ طرف ثانویه  $Z_{s0} = Z_s$ ؛

$n_{p0}$ : تعداد اسمی دورهای طرف اولیه؛

و  $n_{s0}$ : تعداد اسمی دورهای طرف ثانویه.

باشد. با بیان معادلات ۶-۵۴ و ۶-۵۵ بر حسب مقادیر اسمی فوق داریم:

$$\tilde{V}_p = \left[ \frac{n_p}{n_{p0}} \right]^T Z_{p0} \tilde{I}_p + \frac{n_p}{n_s} \tilde{V}_s - \frac{n_p}{n_s} \left[ \frac{n_s}{n_{s0}} \right]^T Z_{s0} \tilde{I}_s \quad (56-6)$$

$$\tilde{V}_s = \frac{n_s}{n_p} \tilde{V}_p - \frac{n_s}{n_p} \left[ \frac{n_p}{n_{p0}} \right]^T Z_{p0} \tilde{I}_p + \left[ \frac{n_s}{n_{s0}} \right]^T Z_{s0} \tilde{I}_s \quad (57-6)$$

در اینجا فرض شده مقاومت و راکتانس نشستی سیم پیچ ترانسفورمر، متناسب با مجذور تعداد دور آن است. این فرض به طور کلی برای راکتانس نشستی صحیح است اما در مورد مقاومت، صادق نیست. از آنجا که مقاومت، بسیار کوچکتر از راکتانس نشستی است و ضمناً انحراف نسبت تبدیل از نسبت اسمی تبدیل زیاد نیست، تقریب به کار رفته قابل قبول است. به منظور سهولت در بررسی فرض می شود دو طرف به صورت ستاره بسته شده باشند. با توجه به اینکه می دانیم:

$$\frac{n_{p0}}{n_{s0}} = \frac{V_{p \text{ base}}}{V_{s \text{ base}}}$$

و:

$$V_{p \text{ base}} = Z_{p \text{ base}} I_{p \text{ base}} \quad , \quad V_{s \text{ base}} = Z_{s \text{ base}} I_{s \text{ base}}$$

معادلات ۶-۵۶ و ۶-۵۷ در شکل مبنای واحد به صورت زیر خواهند شد:

$$\bar{v}_p = \bar{n}_p^T \bar{Z}_{p0} \bar{i}_p + \frac{\bar{n}_p}{\bar{n}_s} \bar{v}_s - \bar{n}_s^T \frac{\bar{n}_p}{\bar{n}_s} \bar{Z}_{s0} \bar{i}_s \quad (58-6)$$

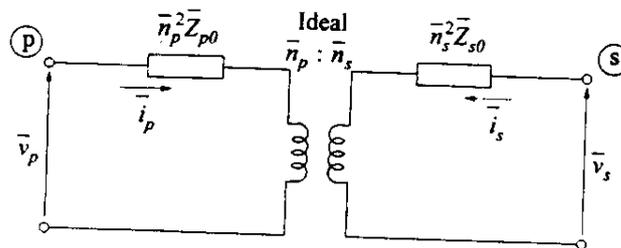
$$\bar{v}_s = \frac{\bar{n}_s}{\bar{n}_p} \bar{v}_p - \bar{n}_p^T \frac{\bar{n}_s}{\bar{n}_p} \bar{Z}_{p0} \bar{i}_p + \bar{n}_s^T \bar{Z}_{s0} \bar{i}_s \quad (59-6)$$

در این روابط بالاترین نشان دهنده مقادیر مبنای واحد است،  $\bar{v}_p$ ،  $\bar{v}_s$ ،  $\bar{i}_p$  و  $\bar{i}_s$  به ترتیب مساوی مقادیر مبنای واحد فازورهای ولتاژ و جریان هستند و:

$$\bar{n}_p = \frac{n_p}{n_{p0}} \quad (60-6)$$

$$\bar{n}_s = \frac{n_s}{n_{s0}} \quad (61-6)$$

مدار معادل در مبنای واحد، با توجه به معادلات ۵۸-۶ و ۵۹-۶ در شکل ۱۶-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶-۶ مدار معادل مبنای واحد

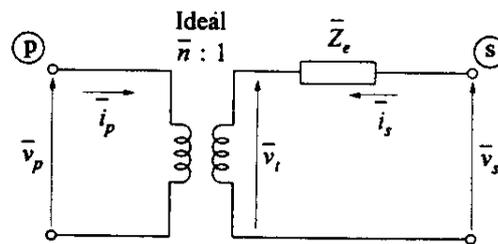
مدار معادل استاندارد

مدار معادل شکل ۱۶-۶ را می توان به صورت استاندارد آن در شکل ۱۷-۶ رسم کرد که در آن  $\bar{n}$  نسبت تبدیل مبنای واحد به صورت زیر است:

$$\bar{n} = \frac{\bar{n}_p}{\bar{n}_s} = \frac{n_p n_{s0}}{n_{p0} n_s} \quad (62-6)$$

و:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_e &= \bar{n}_s^T (\bar{Z}_{p.} + \bar{Z}_{s.}) \\ &= \left( \frac{n_s}{n_p} \right)^T (\bar{Z}_{p.} + \bar{Z}_{s.})\end{aligned}\quad (۶۳-۶)$$



شکل ۶-۱۷ مدار معادل استاندارد ترانسفورمر

مدار معادل شکل ۶-۱۷ به طور وسیعی در نمایش ترانسفورمرهای دو سیم پیچه در مطالعات پخش بار و پایداری استفاده می‌شود. IEEE در مطالعات پخش بار از این شکل استفاده می‌کند [۱۳]. از معادله ۶-۶۳ مشخص است که  $\bar{Z}_e$  با  $\bar{n}_p$  تغییر نمی‌کند. از این رو اگر تپ در طرف اولیه باشد، فقط  $\bar{n}$  تغییر می‌کند. اگر نسبت واقعی تبدیل، مساوی  $n_p/n_s$  باشد، در این صورت  $\bar{n} = 1/0$  است و ترانسفورمر ایده‌آل، حذف می‌شود. اگر نسبت واقعی تبدیل، مساوی نسبت اسمی تبدیل نباشد،  $\bar{n}$  نمایشگر نسبت تبدیل غیر اسمی (ONR) است. مدار معادل شکل ۶-۱۷ را می‌توان برای نمایش ترانسفورمری با یک تپ ثابت (یا تپ خارج از مدار) در یک طرف و یک تغییر دهنده تپ زیربار در طرف دیگر، به کار برد. در این صورت، نسبت تبدیل غیر اسمی به طرفی نسبت داده می‌شود که دارای تغییر دهنده تپ زیربار است و  $\bar{Z}_e$  دارای مقداری بر اساس معادله ۶-۶۳ و با توجه به موقعیت تپ ثابت طرف دیگر است.

نمایش به صورت مدار معادل  $\pi$  [۱۴]

در بررسی پخش بار با کامپیوتر، نمی توان ترانسفورمر ایده آل را به سهولت نمایش داد. از این رو، مدار معادل در شکل ۶-۱۷ را به صورت شبکه  $\pi$  در شکل ۶-۱۸ "الف" مدل می کنیم. از شکل ۶-۱۷، جریان پایانه شین  $p$ ، برابر است با:

$$\begin{aligned}\bar{i}_p &= (\bar{v}_i - \bar{v}_s) \frac{\bar{Y}_c}{\bar{n}} \\ &= \left( \frac{\bar{v}_p}{\bar{n}} - \bar{v}_s \right) \frac{\bar{Y}_c}{\bar{n}} \quad (64-6) \\ &= (\bar{v}_p - \bar{n} \bar{v}_s) \frac{\bar{Y}_c}{\bar{n}}\end{aligned}$$

که  $\bar{Y}_c = 1/\bar{Z}_c$  است. به صورت مشابه، جریان پایانه شین  $s$  برابر است با:

$$\bar{i}_s = (\bar{n} \bar{v}_s - \bar{v}_p) \frac{\bar{Y}_c}{\bar{n}} \quad (65-6)$$

جریانهای مشابه در مدار معادل  $\pi$  شکل ۶-۱۸ "الف" برابر است با:

$$\bar{i}_p = y_1 (\bar{v}_p - \bar{v}_s) + y_2 \bar{v}_p \quad (66-6)$$

$$\bar{i}_s = y_1 (\bar{v}_s - \bar{v}_p) + y_2 \bar{v}_s \quad (67-6)$$

با مساوی قرار دادن عبارات ادمیتانس در معادلات ۶۴-۶ و ۶۶-۶ داریم:

$$y_1 = \frac{1}{\bar{n}} \bar{Y}_c = c \bar{Y}_c \quad (68-6)$$

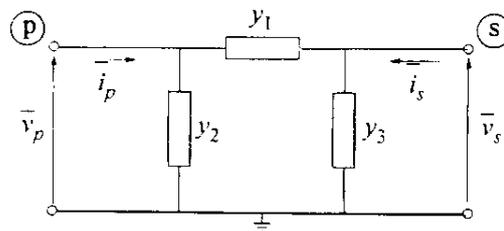
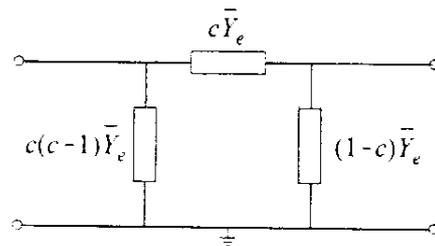
و

$$y_2 = \left( \frac{1}{\bar{n}'} - \frac{1}{\bar{n}} \right) \bar{Y}_c = (c' - c) \bar{Y}_c \quad (69-6)$$

که  $c = \frac{1}{\bar{n}}$  است. به طور مشابه از معادلات ۶۵-۶ و ۶۷-۶ داریم:

$$y_2 = (1 - c) \bar{Y}_c \quad (70-6)$$

مدار معادل  $\pi$  با پارامترهایی که بر حسب نسبت تبدیل غیر اسمی و امیدانس نشستی ترانسفورمر بیان شده‌اند، در شکل ۶-۱۸ "ب" نمایش داده شده است.

الف) شبکه عمومی  $\pi$ ب) شبکه صوری  $\pi$ 

$$\begin{aligned} \bar{Y}_e &= 1/\bar{Z}_e \\ c &= 1/n \end{aligned}$$

شکل ۶-۱۸ نمایش ترانسفورمر با ONR

### در نظر گرفتن اتصالات ترانسفورمرهای سه فاز

مدار معادل استاندارد شکل ۶-۱۷، نمایشگر مدار معادل تک فاز یک ترانسفورمر سه فاز است. در به دست آوردن نسبت تبدیل غیر اسمی، نسبت تبدیل اسمی  $(n_{p0}/n_{s0})$ ، مساوی نسبت ولتاژهای پایه خط به خط دو طرف ترانسفورمر، بدون توجه به نوع اتصال (ستاره - ستاره، مثلث - مثلث و یا ستاره - مثلث)، در نظر گرفته شد. برای ترانسفورمرهای با اتصال ستاره - ستاره و مثلث - مثلث، این انتخاب باعث تساوی نسبت ولتاژهای پایه و نسبت دورهای اسمی سیم پیچهای اولیه و ثانویه هر فاز ترانسفورمر می‌شود. علاوه بر این برای اتصال ستاره - مثلث، این موضوع تأثیر ضریب  $\sqrt{3}$  (به علت نوع اتصال) را به حساب می‌آورد.

در ترانسفورمری با اتصال ستاره - مثلث، اختلاف فازي مساوی  $30^\circ$  بین ولتاژهای خط به خط دو طرف ترانسفورمر ایجاد می شود. علاوه براین، به علت نوع اتصال، ولتاژهای خط نسبت به نقطه خنثی و جریانهای خط اختلاف فاز مشابهی خواهند داشت. همچنان که در بخش ۴-۶ نمایش خواهیم داد، در مطالعات سیستم لازم نیست که این اختلاف فاز را در نظر بگیریم. از این رو در مدار معادل تک فاز یک ترانسفورمر سه فاز با اتصال ستاره - مثلث، به جز اختلاف فاز ولتاژها به علت امپدانس ترانسفورمر، اختلاف فازي در نظر گرفته نمی شود.

#### مثال از مدلسازی ترانسفورمرهای دو سیم پیچه

ترانسفورمر سه فاز دو سیم پیچه ای با فرکانس ۶۰ هرتز و با اطلاعات زیر مورد نظر است:

ظرفیت مگا ولت آمپر : ۴۲ مگا ولت آمپر ؛

ولتاژ اسمی طرف اولیه (فشار قوی) : ۱۱۰ کیلو ولت ؛

ولتاژ اسمی طرف ثانویه (فشار ضعیف) : ۲۸/۴ کیلو ولت ؛

نوع اتصال (HV/LV) : Y/Δ ؛

مقاومت :  $\bar{R}_p + \bar{R}_s = 0.00411$  در مبنای واحد در هر فاز ؛

امپدانس نشتی :  $\bar{X}_p + \bar{X}_s = 0.1153$  در مبنای واحد در هر فاز ؛

تغییر دهنده تپ در طرف فشار قوی (خارج از مدار) : ۴ گام، ۲/۷۵ kV در هر گام ؛

تغییر دهنده تپ زیر بار در طرف فشار ضعیف : ۲/۸۴ kV ± در ۱۶ گام.

فرض کنید در وضعیتی باشیم که سیم پیچ فشار ضعیف در موقعیت اسمی خود و سیم پیچ فشار قوی به طور دستی، دو گام بالاتر از موقعیت اسمی خود (یعنی ۱۱۵/۵ kV) قرار داشته باشد. در این صورت پارامترهای مدار معادل استاندارد (شکل ۶-۱۷) که نسبت تبدیل غیر اسمی، در طرف فشار ضعیف (طرف با تغییر دهنده تپ زیر بار) قرار گرفته و مقادیر، در مبنای واحد و بر پایه مقادیر نامی ترانسفورمر بیان شده باشند به صورت ذیل است:

نسبت تبدیل اولیه غیر اسمی:

$$\bar{n} = \frac{28/4}{115/5} \frac{110}{28/4} = 0.95238$$

امپدانس معادل در مبنای واحد:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_e &= \left[ \frac{115/5}{110} \right]^2 (0.00411 + j 0.1153) \\ &= 0.00453 + j 0.12712 \text{ pu}\end{aligned}$$

حداکثر نسبت تبدیل در مبنای واحد:

$$\bar{n}_{\max} = \frac{31/24}{28/4} \frac{110}{115/5} = 1/0.4762$$

حداقل نسبت تبدیل در مبنای واحد:

$$\bar{n}_{\min} = \frac{25/56}{28/4} \frac{110}{115/5} = 0.85714$$

گام نسبت تبدیل در مبنای واحد:

$$\Delta \bar{n} = \frac{2/84}{16 \times 28/4} \frac{110}{115/5} = 0.0059524$$

اکنون اگر مقادیر پایه ولتاژ و مگاوات آمپر به صورت زیر باشند:

ولتاژ پایه اولیه : 115 kV

ولتاژ پایه ثانویه : 28/4 kV

مگاوات آمپر پایه : 100 MVA

پارامترهای در مبنای واحد مدار معادل به صورت زیر خواهد بود:

نسبت تبدیل اولیه غیر اسمی:

$$\bar{n} = 0.95238 \frac{28/4}{28/4} \frac{115}{110} = 0.99567$$

امپدانس معادل در مبنای واحد:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_e &= (0.00453 + j 0.12712) \left[ \frac{110}{115} \right]^2 \frac{100}{42} \\ &= 0.009868 + j 0.27692\end{aligned}$$

حداکثر نسبت تبدیل در مبنای واحد:

$$\bar{n}_{\max} = 1/0.4762 \frac{28/4}{28/4} \frac{115}{110} = 1/0.9524$$

حداقل نسبت تبدیل در مبنای واحد:

$$\bar{n}_{\min} = 0.185714 \frac{28/4}{28/4} \frac{115}{110} = 0.189610$$

گام نسبت تبدیل در مبنای واحد:

$$\Delta \bar{n} = 0.005924 \frac{28/4}{28/4} \frac{115}{110} = 0.006193$$

پارامترهای مدار معادل  $\pi$  (شکل ۶-۱۸) در موقعیت اولیه تپ به صورت زیر است:

$$y_1 = \frac{1}{\bar{n} Z_c} = \frac{1}{0.99567(0.009868 + j0.27692)}$$

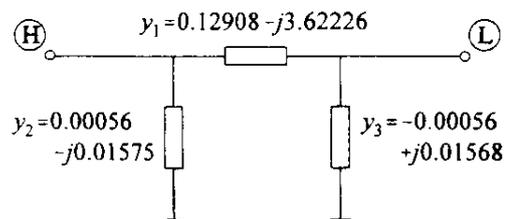
$$= 0.12908 - j3.62226$$

$$y_2 = \left[ \frac{1}{\bar{n}} - 1 \right] y_1 = \left[ \frac{1}{0.99567} - 1 \right] \frac{1}{0.99567(0.009868 + j0.27692)}$$

$$= 0.00056 - j0.01575$$

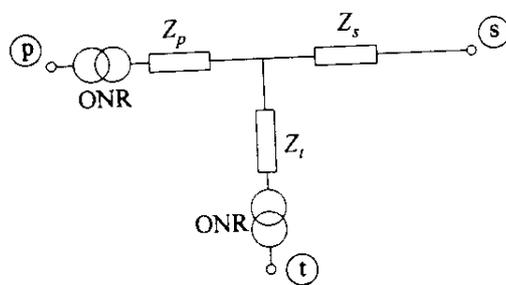
$$y_3 = \left[ 1 - \frac{1}{\bar{n}} \right] \frac{1}{Z_c} = \left[ 1 - \frac{1}{0.99567} \right] \frac{1}{0.009868 + j0.27692}$$

$$= -0.00056 + j0.01568$$



## ۲-۲-۶ نمایش ترانسفورمرهای سه سیم پیچه

شکل ۶-۱۹ مدار معادل تک فاز یک ترانسفورمر سه سیم پیچه را در حالت متعادل نشان می دهد. از تأثیر راکتانس مغناطیس کننده صرف نظر شده و ترانسفورمر به صورت سه امپدانس که به شکل ستاره بسته شده، نمایش داده شده است. نقطه مشترک اتصال ستاره، ساختگی است و ربطی به نقطه ختتای سیستم ندارد.



شکل ۶-۱۹ مدار معادل ترانسفورمر سه سیم پیچه

سه سیم پیچ ترانسفورمر ممکن است دارای ظرفیت توان ظاهری متفاوت باشند. اما باید امپدانسها را در مبنای واحد بر پایه مشترک بیان کرد. همچنان که در بخش قبل در مورد ترانسفورمرهای دو سیم پیچه انجام شد، از نسبتهای تبدیل غیر اسمی برای احتساب اثر اختلاف بین نسبتهای تبدیل واقعی و مقادیر پایه ولتاژ استفاده شده است. مقادیر امپدانسهای معادل  $Z_p$ ،  $Z_s$  و  $Z_t$  را می توان با آزمایشهای استاندارد اتصال کوتاه به صورت زیر به دست آورد [۱]:

$Z_{ps}$ : امپدانس اندازه گیری شده نشتی در طرف اولیه زمانی که ثانویه، اتصال کوتاه و ثالثیه،

مدار باز باشد،

$Z_{pt}$ : امپدانس اندازه گیری شده نشتی در طرف اولیه زمانی که ثالثیه، اتصال کوتاه و ثانویه،

مدار باز باشد،

$Z_{st}$ : امپدانس اندازه گیری شده نشتی در طرف ثانویه زمانی که ثالثیه، اتصال کوتاه و اولیه،

مدار باز باشد.

اگر مقادیر امپدانسهای مزبور بر حسب اهم و ارجاع شده به یک ولتاژ پایه، باشد، داریم:

$$\begin{aligned} Z_{ps} &= Z_p + Z_s \\ Z_{pt} &= Z_p + Z_t \\ Z_{st} &= Z_s + Z_t \end{aligned} \quad (۷۱-۶)$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{1}{3}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s &= \frac{1}{3}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t &= \frac{1}{3}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{aligned} \quad (۷۲-۶)$$

در ترانسفورمرهای بزرگ،  $Z_s$ ، کوچک است و حتی ممکن است منفی باشد.

مثال از مدلسازی ترانسفورمرهای سه سیم پیچه

ترانسفورمر سه فاز سه سیم پیچه‌ای در فرکانس ۶۰ هرتز و با داده‌های زیر مورد نظر است:

ظرفیت مگاوات آمپر : ۷۵۰ مگاوات آمپر؛

ولتاژهای سه طرف فشار قوی، فشار ضعیف و ثالثیه به ترتیب : ۵۰۰ و ۲۴۰ و ۲۸ کیلوولت؛

اتصالات سه طرف فشار قوی، فشار ضعیف و ثالثیه به ترتیب : ستاره، ستاره و مثلث،

امپدانسهای اندازه‌گیری شده مؤلفه مثبت در مبنای واحد و بر پایه مگاوات آمپر ترانسفورمر

و ولتاژهای اسمی در موقعیت اسمی تپ به صورت زیر است:

$$Z_{H-L} = 0.0015 + j0.1339$$

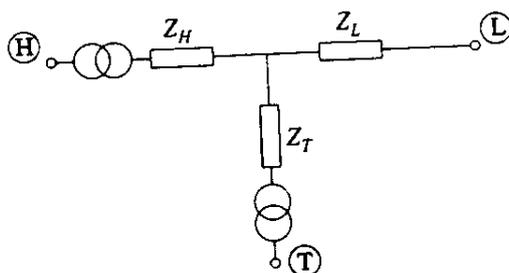
$$Z_{L-T} = 0 + j0.1895$$

$$Z_{T-H} = 0 + j0.2335$$

تغییردهنده تپ زیر بار، در طرف فشار قوی قرار گرفته و در ۲۰ گام،  $kV \pm 50$  است.

مدار معادل، با چشمپوشی از راکتانس مغناطیس کننده و زمانی که تغییر دهنده تپ زیر بار، در

موقعیت اسمی خود باشد به صورت زیر است:

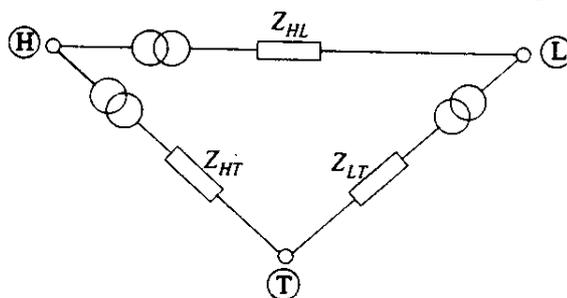


$$Z_H = \frac{Z_{H-L} + Z_{T-H} - Z_{L-T}}{3} = 0.00075 + j0.13895$$

$$Z_L = \frac{Z_{H-L} + Z_{L-T} - Z_{T-H}}{3} = 0.00075 - j0.0505$$

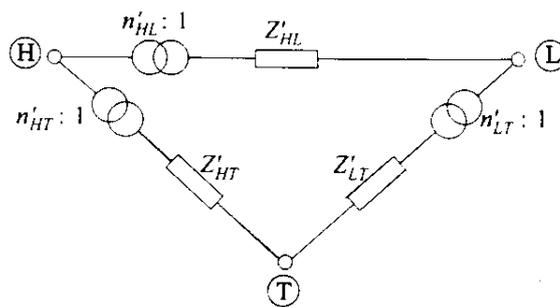
$$Z_T = \frac{Z_{L-T} + Z_{T-H} - Z_{H-L}}{3} = -0.00075 + j0.19455$$

مدار معادل  $\Delta$  با پارامترهایی که بر پایهٔ مگا ولت آمپر نامی و ولتاژهای اسمی، در مبنای واحد بیان شده‌اند به صورت زیر است:



$$\begin{aligned}\Sigma &= Z_H Z_L + Z_H Z_T + Z_L Z_T \\ &= -j0.2535 + j0.0002914 \\ Z_{HL} &= \frac{\Sigma}{Z_T} = 0.0020 + j0.1303 \\ Z_{LT} &= \frac{\Sigma}{Z_H} = 0.0011 + j0.1824 \\ Z_{HT} &= \frac{\Sigma}{Z_1} = -j0.7859 - j4/9.29\end{aligned}$$

مدار معادل  $\Delta$  بر مبنای مگا ولت آمپر پایه ۱۰۰ MVA و ولتاژهای پایه ۲۷/۶ kV : ۲۲۰ : ۵۰۰ (مربوط به سیستم) به صورت زیر است:



$$Z'_{HL} = Z_{HL} \frac{100}{750} \left[ \frac{240}{220} \right]^2 = 0.00032 + j0.2067$$

$$Z'_{LT} = Z_{LT} \frac{100}{750} \left[ \frac{280}{27.6} \right]^2 = 0.00015 + j0.2504$$

$$Z'_{TH} = Z_{TH} \frac{100}{750} \left[ \frac{280}{27.6} \right]^2 = -j0.7859 - j0.6728$$

$$n'_{HL} = \frac{500}{500} \frac{220}{240} = 0.9167$$

$$n'_{LT} = \frac{240}{220} \frac{27.6}{280} = 1.0753$$

$$n'_{HT} = \frac{500}{500} \frac{27.6}{280} = 0.9857$$

اطلاعات تغییر دهنده تپ زیربار:

$$n'_{HL \max} = \frac{55.5 \cdot 22.0}{50.0 \cdot 24.0} = 1/0.833$$

$$n'_{HL \min} = \frac{45.0 \cdot 22.0}{50.0 \cdot 24.0} = 0/825$$

$$\Delta n'_{HL} = \frac{1/0.833 - 0/825}{2.0} = 0/0.917$$

$$n'_{HT \max} = \frac{55.0 \cdot 27/6}{50.0 \cdot 28/0} = 1/0.8429$$

$$n'_{HT \min} = \frac{45.0 \cdot 27/6}{50.0 \cdot 28/0} = 0/88714$$

$$\Delta n'_{HT} = \frac{1/0.8429 - 0/88714}{2.0} = 0/1.014$$

باید متذکر شد که عمل تغییردهنده تپ زیر بار در طرف فشار قوی با نسبتهای غیر اسمی تبدیل  $n'_{HT}$ ،  $n'_{HL}$  تغییر می‌کند و نمی‌توان این دو را به طور مستقل، تنظیم کرد. سه شاخه مدار معادل  $\Delta$  را می‌توان با مدار معادلی مطابق با شکل ۶-۱۸ نمایش داد. مدار معادل  $\pi$  در موقعیت اولیه تپ تغییر دهنده تپ زیربار به صورت زیر تعیین می‌شود:

شاخه H-L:

$$y_1 = \frac{1}{n'_{HL} Z'_{HL}} = \frac{1}{0/91667(0/00032 + j0/02067)}$$

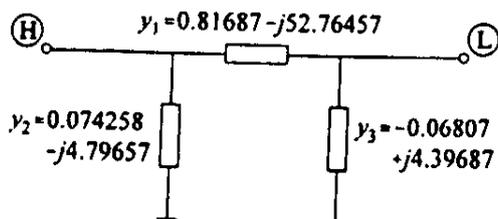
$$= 0/81687 - j52/76457$$

$$y_2 = \left[ \frac{1}{n'_{HL}} - 1 \right] y_1 = \left[ \frac{1}{0/91667} - 1 \right] (0/81687 - j52/76457)$$

$$= 0/074258 - j4/79657$$

$$y_3 = \left[ 1 - \frac{1}{n'_{HL}} \right] \frac{1}{Z'_{HL}} = \left[ 1 - \frac{1}{0/91667} \right] \frac{1}{0/00032 + j0/02067}$$

$$= -0/06807 + j4/39687$$



شاخه L-T :

$$y_1 = \frac{1}{n'_{LT} Z_{LT}} = \frac{1}{1/0.7532 (0.00015 + j0.2504)}$$

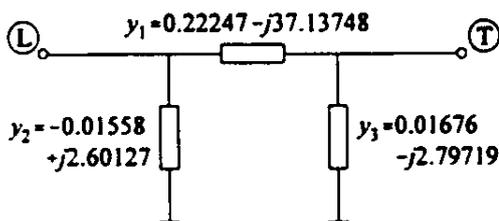
$$= 0.22247 - j37/13748$$

$$y_r = \left[ \frac{1}{n'_{LT}} - 1 \right] y_1 = \left[ \frac{1}{1/0.7532} - 1 \right] (0.22247 - j37/13748)$$

$$= -0.1558 + j2/6.127$$

$$y_r = \left[ 1 - \frac{1}{n'_{LT}} \right] \frac{1}{Z_{LT}} = \left[ 1 - \frac{1}{1/0.7532} \right] \frac{1}{0.00015 + j0.2504}$$

$$= 0.1676 - j2/79719$$



شاخه H-T :

$$y_1 = \frac{1}{n'_{HT} Z_{HT}} = \frac{1}{0.98571 (-0.10784 - j0.67280)}$$

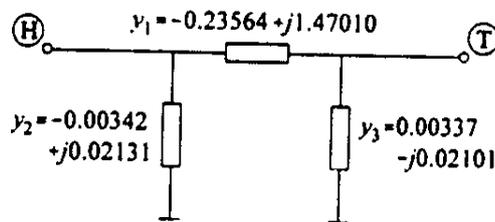
$$= -0.22564 + j1/47.10$$

$$y_r = \left[ \frac{1}{n_{HT}} - 1 \right] y_1 = \left[ \frac{1}{0.98571} - 1 \right] (-0.23564 + j 1.47010)$$

$$= -0.00342 + j 0.02131$$

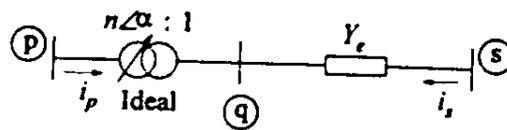
$$y_r = \left[ 1 - \frac{1}{n_{HT}} \right] \frac{1}{Z_{HT}} = \left[ 1 - \frac{1}{0.98571} \right] \frac{1}{-0.10784 - j 0.67280}$$

$$= 0.00337 - j 0.02101$$



### ۳-۲-۶ ترانسفورمرهای تغییردهنده فاز

ترانسفورمرهای انتقال دهنده فاز را می‌توان با مدار معادل شکل ۶-۲۰ نمایش داد که از یک ادیمیتانس سری با یک ترانسفورمر ایده‌آل دارای نسبت تبدیل مختلط:  $\tilde{n} = n \angle \alpha$ ، تشکیل شده است، ممکن است اندازه گام زاویه فاز در موقعیتهای مختلف تپ با هم مساوی نباشد، اما معمولاً در مطالعات پخش بار و برنامه‌های پایداری گذرا، از اندازه گام مساوی استفاده می‌شود.



شکل ۶-۲۰ نمایش ترانسفورمر تغییردهنده فاز

طبق تعریف داریم:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{V}_p}{\tilde{V}_q} &= n \angle \alpha = n (\cos \alpha + j \sin \alpha) \\ &= a_s + j b_s \end{aligned} \quad (73-6)$$

که  $\alpha$ ، مقدار تغییر فاز از شین p به شین q است و اگر  $\tilde{V}_p$  نسبت به  $\tilde{V}_q$  پیش فاز باشد، مثبت است. چون تلفاتی در ترانسفورمر ایده‌آل وجود ندارد، داریم:

$$\tilde{V}_p \tilde{I}_p^* = -\tilde{V}_q \tilde{I}_s^* \quad (74-6)$$

بنابراین جریان ترانسفورمر در شین p برابر است با:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_p &= -\frac{1}{a_s - j b_s} \tilde{I}_s \\ &= \frac{Y_e}{a_s - j b_s} (\tilde{V}_q - \tilde{V}_s) \end{aligned} \quad (75-6)$$

با جایگزینی  $\tilde{V}_q$  از معادله ۷۳-۶، داریم:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_p &= \frac{Y_e}{a_s - j b_s} \left[ \frac{1}{a_s + j b_s} \tilde{V}_p - \tilde{V}_s \right] \\ &= \frac{Y_e}{a_s^2 + b_s^2} \left[ \tilde{V}_p - (a_s + j b_s) \tilde{V}_s \right] \end{aligned} \quad (76-6)$$

از معادله ۷۵-۶، داریم:

$$\tilde{I}_s = -(a_s - j b_s) \tilde{I}_p$$

با جایگزینی  $\tilde{I}_p$  از معادله ۷۶-۶ نتیجه می‌شود که:

$$\tilde{I}_s = \frac{Y_e}{a_s + j b_s} \left[ (a_s + j b_s) \tilde{V}_s - \tilde{V}_p \right] \quad (77-6)$$

با ترکیب معادلات ۷۶-۶ و ۷۷-۶، ولتاژها و جریابهای پایانه ترانسفورمر انتقال دهنده فاز به صورت ماتریسی زیر به هم مرتبط می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_p \\ \tilde{i}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_c & -Y_c \\ a_s^T + b_s^T & a_s - jb_s \\ -Y_c & Y_c \\ a_s + jb_s & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{v}_p \\ \tilde{v}_s \end{bmatrix} \quad (78-6)$$

مشاهده می‌شود که ماتریس ادمیتانس در معادله فوق، متقارن نیست یعنی ادمیتانس از  $p$  به  $s$  مساوی با ادمیتانس از  $s$  به  $p$  نیست. از این رو، مدار معادل  $\pi$ ، امکان پذیر نیست. اگر نسبت تبدیل، حقیقی باشد (یعنی  $a_s = \bar{a}_s$  و  $b_s = 0$ )، مدل به صورت شکل ۶-۱۸ "ب" خواهد شد.

#### مثال از مدلسازی ترانسفورمر تغییر دهنده فاز

ترانسفورمر تغییر دهنده فاز دو سیم پیچه سه فازی با داده‌های زیر مورد نظر است:

ظرفیت نامی مگاوات آمپر	:	۳۰۰ مگاوات آمپر
ولتاژهای پایه اولیه و ثانویه	:	۲۴۰ / ۲۴۰ kV
مقاومت در هر فاز	:	۰
راکتانس نشتی در هر فاز	:	۰/۱۴۵ در مبنای واحد
محدوده تغییر فاز	:	$\pm 40^\circ$ در ۳۶ گام
ولتاژ پایه سیستم (اولیه به ثانویه)	:	۲۲۰ / ۲۳۰ kV
مگاوات آمپر پایه سیستم	:	۱۰۰ مگاوات آمپر



راکتانس نشتی در مبنای واحد و بر پایه مگاوات آمپر و ولتاژ پایه سیستم برابر است با:

$$\begin{aligned} X_s &= 0/145 \times \frac{100}{300} \times \left( \frac{240}{230} \right)^2 \\ &= 0/05263 \text{ pu} \end{aligned}$$

نسبت تبدیل غیر اسمی:

$$n = \frac{24.0}{22.0} \times \frac{23.0}{24.0} = 1/0.4545$$

حدود تغییر فاز:

$$\alpha_{\max} = 4.0^\circ$$

$$\alpha_{\min} = -4.0^\circ$$

امپدانس ترانسفورمر با تغییر مقدار تغییر فاز تغییر می‌کند. جدول زیر که به وسیله سازنده داده می‌شود مقادیر ضریب افزایش امپدانس را بر حسب تابعی از زاویه نشان می‌دهد:

زاویه برحسب درجه :	$\pm 4.0^\circ$	$\pm 29/5$	$\pm 25/1$	$\pm 20/6$	$0^\circ$
ضریب افزایش امپدانس :	$1/660$	$1/331$	$1/228$	$1/144$	$1/0$

ماتریس ادمیتانس معادله ۶-۷۶ برای ترانسفورمر تغییر دهنده فاز به صورت زیر است:

$$Y_s = \begin{bmatrix} Y_e & -Y_e \\ \frac{a_s^Y + b_s^Y}{a_s + jb_s} & a_s - jb_s \\ -Y_e & Y_e \\ \frac{-Y_e}{a_s + jb_s} & Y_e \end{bmatrix}$$

برای تبیین مطلب، عناصر ماتریس ادمیتانس را برای دو مقدار  $\alpha$  تعیین می‌کنیم:

الف)  $\alpha = 0$

$$Y_e = \frac{1}{jX_e} = \frac{1}{j \cdot 0.5263} = -j 19/0006 \text{ pu}$$

نسبت تبدیل ترانسفورمر ایده‌آل تغییر دهنده فاز برابر است با:

$$\begin{aligned} a_s + jb_s &= n (\cos \alpha + j \sin \alpha) \\ &= 1/0.4545 (\cos 0 + j \sin 0) = 1/0.4545 + j \cdot 0 \end{aligned}$$

و ماتریس ادمیتانس ( $Y_s$ ) به صورت زیر خواهد بود:

$$Y_s = \begin{bmatrix} -j 17/3844 & j 18/1745 \\ j 18/1745 & -j 19/0006 \end{bmatrix}$$

ب) « مربوط به دهمین گام مساوی است با:

$$\alpha = \frac{40}{36} \times 10 = 11/11^\circ$$

و نسبت تبدیل مساوی است با:

$$\begin{aligned} a_s + jb_s &= n (\cos 11/11^\circ + j \sin 11/11^\circ) \\ &= 1/0.2585 + j 0/20.147 \end{aligned}$$

با درون یابی<sup>۱</sup>، راکتانس نشتی در این مقدار « برابر خواهد شد با:

$$\begin{aligned} X_c &= \left[ 1/0 + \frac{11/11(1/144 - 1/0)}{20/6} \right] \times 0/0.5263 \\ &= 0/0.5672 \end{aligned}$$

بنابراین:

$$Y_c = \frac{1}{jX_c} = j 17/630.5$$

و ماتریس ادمیتانس  $Y_s$  با  $a_s + jb_s = 1/0.2585 + j 0/20.147$  و  $Y_c = j 17/630.5$  به صورت زیر است:

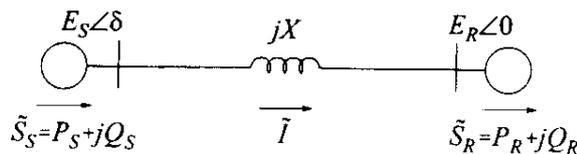
$$Y_s = \begin{bmatrix} -j 16/1310 & (-3/2499 + j 16/5479) \\ (3/2499 + j 16/5479) & -j 17/630.5 \end{bmatrix}$$

### ۶-۳ انتقال توان بین منابع فعال

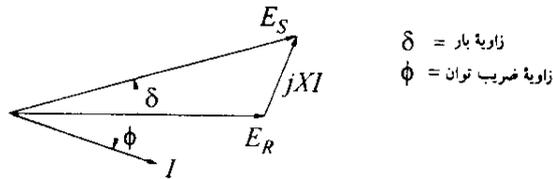
اکنون عواملی را که بر انتقال توان حقیقی و راکتیو بین دو منبع، که مطابق شکل ۶-۲۱ به هم مرتبط شده‌اند، تأثیر می‌گذارند مورد بررسی قرار می‌دهیم. چنین سیستمی نمایشگر دو بخش از یک سیستم قدرت است که به وسیله خط انتقال به هم مرتبط شده‌اند و توان از یک بخش به

1. Interpolation

بخش دیگر منتقل می‌شود. تنها یک راکتانس ارتباطی را بین دو منبع در نظر گرفته‌ایم زیرا امپدانسهای مربوط به خطوط انتقال، ترانسفورمرها و ژنراتورها به طور غالب، اندوکتیو است. زمانی که یک شبکه کامل به کمک مدلهای مناسب اجزای آن در نظر گرفته شود و سپس به سیستمی دوشینه تقلیل یابد، امپدانس حاصل عملاً یک راکتانس اندوکتیو است. خازنهای موازی خطوط انتقال در مدل شکل ۶-۲۱ نشان داده نشده‌اند بلکه تأثیر آنها به طور ضمنی در انتقال خالص توان راکتیو در نظر گرفته می‌شود. از این رو بررسی چنین سیستمی دیدگاه مناسبی را از مشخصه‌های سیستمهای انتقال به صورت جریان متناوب، تأمین می‌نماید.



(الف) نمودار سیستم معادل



(ب) نمودار فازوری

شکل ۶-۲۱ تبادل توان بین دو منبع

با مراجعه به شکل ۶-۲۱، توان مختلط در طرف گیرنده برابر است با:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_R = P_R + jQ_R &= \tilde{E}_R \tilde{I}^* = \tilde{E}_R \left[ \frac{\tilde{E}_S - \tilde{E}_R}{jX} \right]^* \\ &= E_R \left[ \frac{E_S \cos \delta + j E_S \sin \delta - E_R}{jX} \right]^* \end{aligned}$$

بنابراین:

$$P_S = \frac{E_S E_R}{X} \sin \delta \quad (۷۹-۶)$$

$$Q_R = \frac{E_S E_R \cos \delta - E_R^2}{X} \quad (۸۰-۶)$$

به طور مشابه:

$$P_S = \frac{E_S E_R}{X} \sin \delta \quad (۸۱-۶)$$

$$Q_S = \frac{E_S^2 - E_S E_R \cos \delta}{X} \quad (۸۲-۶)$$

معادلات ۷۹-۶ تا ۸۲-۶ نحوه انتقال توان حقیقی و راکتیو بین بخشهای فعال یک شبکه قدرت را بیان می نمایند. اکنون وابستگی انتقال توان حقیقی و توان راکتیو را به منابع ولتاژ، با در نظر گرفتن جداگانه اختلاف بین مقادیر و زوایای ولتاژ، مورد بررسی قرار می دهیم:

الف) در شرایطی که  $\delta = 0$  باشد، معادلات ۷۹-۶ تا ۸۲-۶ به صورت زیر خواهند شد:

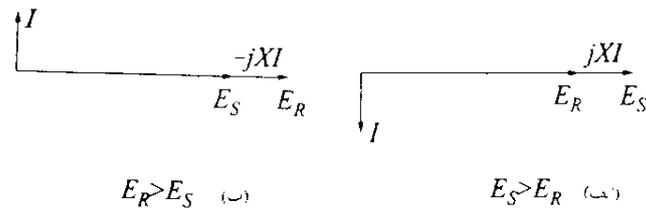
$$P_R = P_S = 0$$

و:

$$Q_R = \frac{E_R (E_S - E_R)}{X}$$

$$Q_S = \frac{E_S (E_S - E_R)}{X}$$

در این حالت، انتقال توان حقیقی صفر است. اگر  $E_S > E_R$  باشد،  $Q_R$  و  $Q_S$  مثبت هستند یعنی توان راکتیو از طرف فرستنده به طرف گیرنده منتقل می شود. نمودار فازوری مربوط در شکل ۲۲-۶ الف نشان داده شده است. اگر  $E_S < E_R$  باشد،  $Q_R$  و  $Q_S$  منفی هستند که در این صورت توان راکتیو از طرف گیرنده به طرف فرستنده انتقال می یابد. نمودار فازوری در این حالت در شکل ۲۲-۶ ب نشان داده شده است.



شکل ۶-۲۲ نمودارهای فازوری با  $\delta = 0$

راه دیگر تفسیر نتایج فوق به صورت زیر است:

- انتقال جریان پس فاز از یک راکتانس اندوکتیو باعث کاهش ولتاژ طرف گیرنده می شود.
- انتقال جریان پیش فاز از یک راکتانس اندوکتیو باعث افزایش ولتاژ طرف فرستنده می شود.

در هر حالت:

$$Q_S - Q_R = \frac{(E_S - E_R)^2}{X} = XI^2$$

بنابراین توان راکتیو مصرف شده به وسیله  $X$  مساوی با  $XI^2$  است.

ب) اگر  $E_S = E_R$  ولی  $\delta \neq 0$  باشد، معادلات ۶-۷۹ تا ۶-۸۲ به صورت زیر خواهند شد:

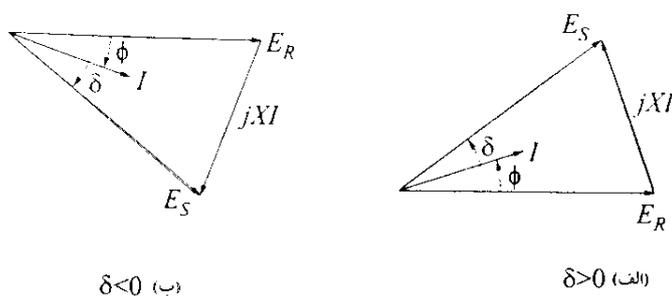
$$P_R = P_S = \frac{E^2}{X} \sin \delta$$

$$Q_S = -Q_R = \frac{E^2}{X} (1 - \cos \delta)$$

$$= \frac{1}{2} XI^2$$

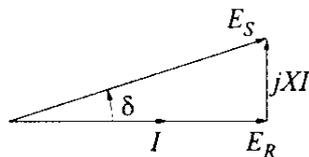
اگر  $\delta$  مثبت باشد،  $P_R$  و  $P_S$  مثبت هستند یعنی توان حقیقی از طرف فرستنده به طرف گیرنده منتقل می شود. در صورت منفی بودن  $\delta$ ، جهت انتقال توان حقیقی، معکوس می شود. در هر حالت، هیچ توان راکتیوی از یک طرف به طرف دیگر منتقل نمی شود بلکه هر طرف نیمی از  $XI^2$  مصرفی به وسیله  $X$  را تأمین می نماید. نمودار فازوری مربوط در شکل ۶-۲۳ آمده است.

اگر جریان  $I$  با  $E_R$  همفاز باشد (یعنی ضریب توان طرف گیرنده مساوی یک باشد)، نمودار فازوری مطابق با شکل ۶-۲۴ خواهد بود. در این حالت، مقدار  $E_S$  کمی بزرگتر از  $E_R$  است و طرف فرستنده تمام توان راکتیو مصرفی به وسیله  $X(XI^2)$  را تأمین می‌کند.



شکل ۶-۲۳ نمودار فازوری با  $E_S = E_R$

مشاهده می‌شود که توان حقیقی انتقال یافته ( $P_R$ )، تابعی از مقدار ولتاژ و زاویه  $\delta$  است. اما باید توجه کرد که در بهره‌برداری مناسب از سیستم قدرت، دامنه ولتاژ هر شین نمی‌تواند به مقدار زیادی از مقدار اسمی خود منحرف شود. از این رو عمدتاً کنترل انتقال توان حقیقی از طریق زاویه  $\delta$  امکان پذیر است.



شکل ۶-۲۴ نمایش فازوری با  $I$  همفاز با  $E_R$

ج) اکنون حالت کلی را در نظر می‌گیریم که در آن  $\delta$ ،  $E_S$  و  $E_R$  می‌توانند هر مقداری داشته باشند. در این صورت جریان  $I$  برابر است با:

$$I = \frac{E_S \cos \delta + j E_S \sin \delta - E_R}{jX} \quad (۸۳-۶)$$

از معادلات ۸۰-۶، ۸۲-۶، ۸۳-۶ داریم:

$$\begin{aligned} Q_S - Q_R &= \frac{E_S^2 + E_R^2 - 2E_S E_R \cos \delta}{X} \\ &= \frac{(XI)^2}{X} = XI^2 \end{aligned} \quad (۸۴-۶)$$

اگر علاوه بر اندوکتانس سری  $X$ ، مقاومت سری  $R$  را نیز در نظر بگیریم، در این صورت:

$$Q_{loss} = XI^2 = X \frac{P_R^2 + Q_R^2}{E_R^2} \quad (۸۵-۶)$$

$$P_{loss} = RI^2 = R \frac{P_R^2 + Q_R^2}{E_R^2} \quad (۸۶-۶)$$

از معادله ۸۴-۶ آشکار است که همواره، توان راکتیو جذب شده به وسیله  $X$  مساوی  $XI^2$  است. این به مفهوم تلفات توان راکتیو ناشی از راکتانس در مقابل تلفات توان حقیقی  $RI^2$  ناشی از مقاومت است.

از معادلات ۸۵-۶ و ۸۶-۶ مشاهده می شود که هرگونه افزایش در انتقال توان راکتیو، تلفات توانهای حقیقی و راکتیو را افزایش می دهد. این موضوع بر میزان بازده انتقال توان و تنظیم ولتاژ تأثیر می گذارد. از بررسیهای فوق می توان به نتایج زیر رسید:

- انتقال توان حقیقی به زاویه ای که ولتاژ طرف فرستنده نسبت به ولتاژ طرف گیرنده پیش فاز است، بستگی دارد.
- انتقال توان راکتیو به مقادیر ولتاژ بستگی دارد و از طرفی که دامنه ولتاژ آن بالاتر است به طرف دیگر انتقال می یابد.
- توان راکتیو را نمی توان در مسیرهای طولانی منتقل کرد زیرا در این صورت ولتاژ شدیداً افت می کند.
- هرگونه افزایش در انتقال توان راکتیو، تلفات توانهای حقیقی و راکتیو را افزایش می دهد. هرچند سیستم ساده ای را در نظر گرفته ایم، نتایج به دست آمده، در مورد هر

سیستم واقعی صادق است. در حقیقت، مشخصه‌های یک سیستم انتقال به صورت جریان متناوب، که در نتیجه گریه‌های فوق منعکس گردید، تأثیر عمده‌ای بر نحوه بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت دارد.

#### ۴-۶ تحلیل پخش بار

تاکنون در این فصل برای درک مشخصه‌های اصلی سیستم‌های انتقال به صورت جریان متناوب، سیستم‌های ساده‌ای را در نظر گرفته‌ایم و فرضیات ایده‌آلی را مورد توجه قرار داده‌ایم. در این بخش، روش‌های محاسباتی تحلیل مفصل پخش بار در شبکه‌های پیچیده و بزرگ را مورد بحث قرار می‌دهیم.

تحلیل پخش بار<sup>۱</sup> شامل محاسبه توانهای انتقالی و ولتاژهای شبکه انتقال در وضعیت خاصی از پایانه‌ها یا شینه‌هاست. چنین محاسباتی برای بررسی هم حالت ماندگار شبکه و هم عملکرد دینامیکی آن، مورد نیاز است. فرض می‌شود که سیستم متعادل است. در این صورت آن را می‌توان با نموداری تک فاز نمایش داد. در مطالعات سیستم‌های پیچیده قدرت، معمول است که بارهای مرکب<sup>۲</sup> را در نقاط عمده تحویل مورد توجه قرار دهند (به فصل هفتم، بخش ۷-۱ مراجعه شود). بنابراین تأثیر وسائل کنترل ولتاژ سیستم توزیع بر بارها به طور ضمنی نمایش داده می‌شود.

در این بخش، تحلیل پخش بار در مورد عملکرد حالت ماندگار سیستم قدرت را شرح می‌دهیم. معادلات اساسی شبکه که در اینجا مطرح می‌شوند، در بررسی مطالعات پایداری نیز اعمال می‌گردند. اما همچنان که در فصول آینده خواهیم دید، بسته به نوع مسأله پایداری مورد نظر، بعضی از قيود متفاوت خواهند بود.

#### طبقه‌بندی شین

چهار کمیت توان حقیقی  $P$ ، توان راکتیو  $Q$ ، دامنه ولتاژ  $V$  و زاویه ولتاژ  $\theta$  در مورد هر شین وجود دارد. انواع شینهای زیر مورد استفاده واقع می‌شود و در مورد هر شین، دو کمیت از چهار

1. Power – Flow (Load – Flow)

2. Composite Load

کمیت، فوق باید مشخص شود:

- در شین با ولتاژ کنترل شده (شین PV)؛ توان حقیقی و دامنه ولتاژ مشخص می شوند. بعلاوه، محدود توان راکتیو بسته به مشخصه های تجهیزات موجود، بیان می گردند. به عنوان نمونه، می توان از شین مربوط به ژنراتورها، کندانسورهای سنکرون<sup>۱</sup> و جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو<sup>۲</sup> نام برد
- در شین بار (شین PQ)؛ توان حقیقی و توان راکتیو مشخص می شوند. معمولاً فرض می شود که بارها از نوع توان ثابت هستند. اگر از تأثیر ترانسفورمرهای توزیع با تغییردهنده تپ زیربار، چشمپوشی شود، فرض می شود که P و Q به صورت تابعی از شین ولتاژ تغییر نمایند.
- در شین افزاری<sup>۳</sup>؛ شرایط مرزی بخصوصی مربوط به افزاری از قبیل کنورتورهای فشار قوی جریان مستقیم، در نظر گرفته می شود.
- در شین مبنا<sup>۴</sup>؛ دامنه ولتاژ و زاویه فاز مشخص می شوند. از آنجا که تلفات توان سیستم از قبل مشخص نیست، باید حداقل یک شین بدون P و Q مشخص اولیه، انتخاب شود. از این رو، شین مبنا تنها شین با ولتاژ (دامنه و زاویه) مشخص است. در بعضی حالات، لازم است که Q مربوط به شین مبنا در محدوده منطقی باقی بماند در غیراین صورت حل پخش بار، غیر واقعی می شود. اگر Q در حد خود واقع شود، فقط زاویه ولتاژ شین مبنا معلوم است.

#### نمایش اجزای شبکه

خطوط انتقال با مدارهای معادل  $\pi$  مطابق با آنچه در بخش ۶-۱-۴ شرح داده شد، مدل می شوند. راکتورها و خازنهای موازی به صورت ادمیتانسهای ساده متصل به زمین، نمایش داده می شوند. ترانسفورمرهای با نسبت تبدیل غیر اسمی مطابق با مدل شرح داده شده  $\pi$  در بخش ۶-۲-۲ نمایش داده می شوند. هرگونه تغییر فاز به علت نوع اتصال ترانسفورمر (مثلاً ستاره - مثلث) معمولاً مدل نمی شود. در شبکه های شعاعی چنین تغییر فازهایی بر تحلیل پخش بار

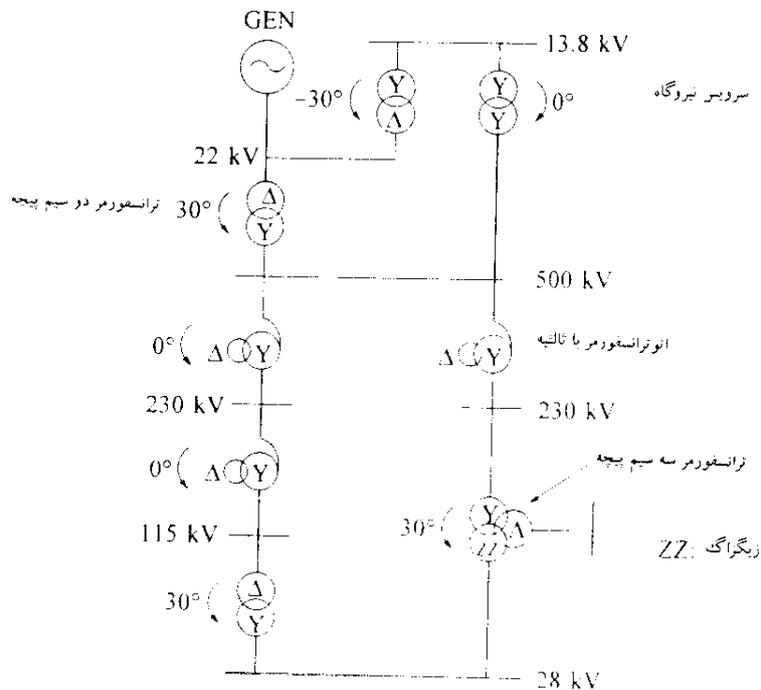
1. Synchronous Condenser

2. Static

3. Device Bus

4. Slack Bus

تأثیر نمی‌گذارد زیرا ولتاژها و جریانها هر دو فازشان به یک مقدار، تغییر می‌یابد. در شبکه‌های مدار بسته، شرکتهای برق دقت می‌کنند تا سیم‌پیچهای ترانسفورمرها را به گونه‌ای متصل کنند که هیچ تغییر فاز خالصی در یک جهت مشترک در اطراف یک حلقه ایجاد نشود در غیر این صورت جریان چرخشی<sup>۱</sup> عبور خواهد کرد که معمولاً غیرقابل قبول است. شکل ۶-۲۵ نمایشی را برای اتصال سیم‌پیچهای ترانسفورمرها با توجه به مسأله تغییر فاز نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۵ نمایش طرحی برای اتصالات سیم‌پیچهای ترانسفورمر

ترانسفورمرهای تغییر دهنده فاز که بخصوص در کنترل توان انتقالی استفاده می‌شوند بنا توجه به مدل بخش ۶-۲-۳، نمایش داده می‌شوند. این نحوه نمایش را می‌توان در وضع

#### 1. Circulating Current

خاصی که مورد نیاز است برای نمایش تأثیر تغییر فاز به علت نحوه اتصال سیم پیچهای ترانسفورمر (نظیر ستاره - مثلث و ستاره - زیگزاگ) به کار برد. اما مقدار تغییر فاز در چنین حالاتی، ثابت است.

از آنجا که وضعیت متعادل مدنظر است، هر عنصری را بر حسب معادل تکفاز (مؤلفه مثبت) آن، نمایش می دهیم.

#### ۶-۴-۱ معادلات شبکه

رابطه بین ولتاژها و جریانهای شینها را می توان بر حسب معادلات حلقه<sup>۱</sup> یا معادلات گره<sup>۲</sup> نمایش داد [۱]. معمولاً ساده تر است که از معادلات گره استفاده شود زیرا تعداد معادلات مستقل گره از تعداد معادلات مستقل حلقه، کمتر است. معادلات شبکه بر حسب ماتریس ادمیتانس گره<sup>۳</sup> به صورت زیر است:

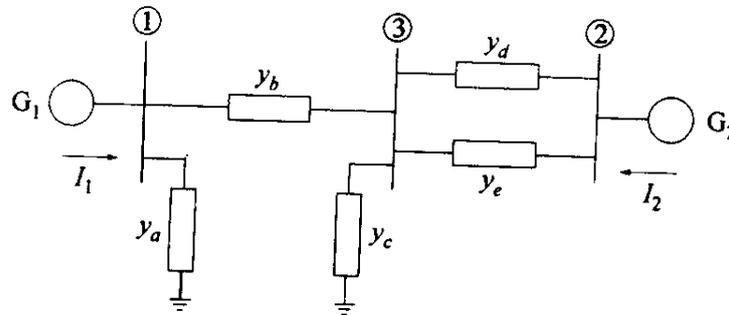
$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \dots \\ \tilde{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \dots \\ \tilde{V}_n \end{bmatrix} \quad (۸۷-۶)$$

که:

- $n$  : تعداد کل گره ها؛
  - $Y_{ii}$  : ادمیتانس خودی گره  $i$  ام؛ مساوی مجموع تمام ادمیتانسهایی که به آن ختم می شود،
  - $Y_{ij}$  : ادمیتانس متقابل بین گره های  $i$  ام و  $j$  ام مساوی با قرینه مجموع تمام ادمیتانسهای بین گره های  $i$  ام و  $j$  ام؛
  - $\tilde{V}_i$  : ولتاژ فازوری نسبت به زمین در گره  $i$  ام؛
  - $\tilde{I}_i$  : جریان فازوری تزریق شده به شبکه در گره  $i$  ام.
- است.

تأثیر ژنراتورها، بارهای غیر خطی و افزارهای دیگر (از قبیل جبرانگرهای دینامیکی توان

راکتیو و کنورتورهای فشار قوی جریان مستقیم) که به گره‌های شبکه متصل هستند در جریان گره، منعکس می‌شوند. اما بارهای امپدانس ثابت (خطی) در ماتریس ادمیتانس گره، در نظر گرفته می‌شود. نحوه تشکیل ماتریس ادمیتانس را با توجه به سیستم ساده سه شینه شکل ۶-۲۶، بیان می‌کنیم.



شکل ۶-۲۶ نمودار تک خطی یک سیستم سه شینه

اجزای ماتریس ادمیتانس گره به صورت زیر است:

$$\begin{array}{lll}
 Y_{11} = y_a + y_b & Y_{12} = 0 & Y_{13} = -y_b \\
 Y_{21} = 0 & Y_{22} = y_d + y_e & Y_{23} = -(y_d + y_e) \\
 Y_{31} = -y_b & Y_{32} = -(y_d + y_e) & Y_{33} = y_b + y_c + y_d + y_e
 \end{array}$$

جریانهای گره به قرار زیرند:

- $I_1$  : جریان تزریق شده به گره ۱ از ژنراتور  $G_1$ ؛
- $I_2$  : جریان تزریق شده به گره ۲ از ژنراتور  $G_2$ ؛
- $I_3$  : مساوی صفر.

بنابراین معادله گره شبکه شکل ۶-۲۶ به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} \\ 0 & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \tilde{V}_3 \end{bmatrix}$$

نتایج کلی زیر را می‌توان در خصوص ماتریس ادمیتانس گره بیان کرد:  
 الف) پراکنده<sup>۱</sup> است و درجه پراکندگی با اندازه شبکه، افزایش می‌یابد.  
 ب) اگر هیچ شاخه موازی به زمین وجود نداشته باشد، منفرد<sup>۲</sup> است.  
 ج) عناصر قطری آن تا حد کمی بر عناصر غیر قطری غالب هستند یعنی:

$$|Y_{ii}| \geq \sum_{j \neq i} |Y_{ij}|$$

د) اگر ترانسفورمر تغییر دهنده فاز وجود نداشته باشد، ماتریس، متقارن است.

#### معادلات غیر خطی پخش بار

اگر به یازدهای تزریقی  $\tilde{I}$  معلوم می‌بودند، معادله ۶-۸۷ خطی می‌بود. اما در عمل، جریانهای تزریقی برای اکثر گره‌ها معلوم نیست. در هر گره  $k$ ، جریان به صورت زیر با  $P$ ،  $Q$  و  $\tilde{V}$  رابطه دارد:

$$\tilde{I}_k = \frac{P_k - jQ_k}{\tilde{V}_k^*} \quad (۸۸ \text{ ب})$$

برای گره‌های (شین‌های)  $PQ$ ،  $P$  و  $Q$  مشخص است و برای گره‌های  $PV$ ،  $P$  و دامنه ولتاژ  $\tilde{V}$  نیز معلوم است. برای انواع دیگر گره‌ها، روابط بین  $P$ ،  $Q$ ،  $\tilde{V}$  و  $\tilde{I}$  با توجه به مشخصه‌های افزارهای متصل به گره، معلوم می‌شود. واضح است که شرایط مرزی که با توجه به وجود انواع مختلف گره دیکته می‌شود، مسأله را غیر خطی می‌کند و بنابراین باید معادلات پخش بار را با استفاده از روشهای تکرار نظیر گوس - سایدل<sup>۳</sup> یا نیوتن - رافسون<sup>۴</sup> حل کرد. در اینجا فقط اصول خاکم بر این روشها به طور خلاصه بیان می‌گردد. مروری جامع بر روشهای محاسباتی تحلیل پخش بار در مراجع ۱۵ و ۱۶ بیان شده است.

#### ۶-۴-۲ روش گوس - سایدل

این روش براساس الگوریتم تکرار است که اولین بار به وسیله سایدل (آکادمی علوم مونیخ) در

1. Sparse      2. Singular      3. Gauss - Seidel      4. Newton - Raphson

سال ۱۸۷۴ میلادی بیان شد. برای اعمال آن بر مسأله پخش بار، از معادلات ۶-۸۷ و ۶-۸۸ برای گره  $k$  ام می توان نوشت:

$$\frac{P_k - jQ_k}{\tilde{V}_k^*} = Y_{kk} \tilde{V}_k + \sum_{i=1, i \neq k}^n Y_{ki} \tilde{V}_i \quad (۸۹-۶)$$

که به کمک آن می توان ولتاژ  $\tilde{V}_k$  را به صورت زیر بیان کرد:

$$\tilde{V}_k = \frac{P_k - jQ_k}{Y_{kk} \tilde{V}_k^*} - \frac{1}{Y_{kk}} \sum_{i=1, i \neq k}^n Y_{ki} \tilde{V}_i \quad (۹۰-۶)$$

معادله ۶-۸۹ قلب روش تکرار است. تکرار، با یک حدس اولیه از دامنه و زاویه ولتاژ تمام شینهای بار و زاویه ولتاژ تمام شینهای تولید (ژنراتوری) شروع می شود. برای یک شین بار (مصرف)،  $P$  و  $Q$  معلوم است و می توان معادله ۶-۹۰ را به منظور محاسبه ولتاژ  $\tilde{V}_k$  و با استفاده از بهترین مقادیر موجود ولتاژ تمام شینها، به کاربرد. به عبارت دیگر از آخرین و بهنگام ترین مقادیر ولتاژ شینها به مجرد در دسترس بودن استفاده می کنیم. به عنوان مثال، در تکرار  $p$  ام برای محاسبه  $V_k$  در شین  $k$  ام، بهترین مقادیر موجود ولتاژ، به صورت زیر است:

$$V_1^p, V_2^p, \dots, V_{k-1}^p, V_k^{p-1}, V_{k+1}^{p-1}, \dots, V_n^{p-1}$$

اگر شین  $k$  ام، یک شین تولید باشد، روش زیر استفاده می شود:

الف) از معادله ۶-۸۹ داریم:

$$Q_k = -\text{Im} \left[ \tilde{V}_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki} \tilde{V}_i \right] \quad (۹۱-۶)$$

که  $Q_k$  را با استفاده از بهترین مقادیر موجود ولتاژ، محاسبه می کنیم. اگر  $Q_k$  در محدوده مجاز بین  $Q_{k\min}$  و  $Q_{k\max}$  قرار داشت، از آن در معادله ۶-۹۰ برای به دست آوردن مقدار بهنگام  $\tilde{V}_k$  استفاده می کنیم. مؤلفه های حقیقی و موهومی آن در نسبت بین دامنه مشخص شده ولتاژ شین تولید به دامنه بهنگام شده آن، ضرب می شود تا قید دامنه، مراعات گردد. به عبارت دیگر، دامنه ولتاژ مجبور می شود که برابر با مقدار مشخص شده خود شود و معادلات ۶-۹۰ و ۶-۹۱ برای محاسبه زاویه به کار می رود.

ب) اگر  $Q_k$  محاسبه شده از معادله ۶-۹۱، از مقدار حداکثر یا حداقل فراتر رود، آن را مساوی مقدار حد قرار می‌دهیم. در این صورت، مقدار بهنگام  $\tilde{V}_k$  را با در نظر گرفتن شین تولید به صورت یک شین PQ به دست می‌آوریم.

تکرارها آنقدر ادامه پیدا می‌کنند تا مؤلفه‌های حقیقی و موهومی ولتاژ هر شین در تکرارهای متوالی با یکدیگر اختلاف بسیار ناچیزی پیدا کنند. به علت غالب بودن ضعیف عناصر قطری ماتریس ادمیتانس گره، روش گوس سایدل سرعت همگرایی کندی دارد و برای افزایش سرعت همگرایی، از ضریب شتاب دهنده<sup>۱</sup> به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\tilde{V}_k^{new} = \tilde{V}_k^{old} + c(\tilde{V}_k^{new} - \tilde{V}_k^{old}) \quad (۹۲-۶)$$

که  $c$  ضریب شتاب دهنده و معمولاً در حدود  $1/4$  تا  $1/7$  است.

### ۶-۴-۳ روش نیوتن رافسون (NR)

این شیوه، روش تکراری برای حل مجموعه معادلات غیر خطی است.  $n$  معادله غیر خطی زیر را با  $n$  مجهول در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_2 \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_n \end{aligned} \quad (۹۳-۶)$$

اگر تکرارها با یک حدس اولیه  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$  برای  $n$  مجهول شروع شود و  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  مقادیر تصحیح لازم برای به دست آوردن مقادیر دقیق مجهولات باشد، داریم:

$$\begin{aligned} f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= b_1 \\ f_2(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= b_2 \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \\ f_n(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) &= b_n \end{aligned} \quad (۹۴-۶)$$

هر یک از معادلات فوق را می توان به کمک سری تیلور بسط داد. شکل بسط یافته معادله  $i$  ام به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & f_i(x_1^* + \Delta x_1, x_2^* + \Delta x_2, \dots, x_n^* + \Delta x_n) \\ &= f_i(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \left[ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right] \Delta x_1 + \left[ \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right] \Delta x_2 + \dots + \left[ \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right] \Delta x_n \\ &+ \Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n \\ &= b_i \end{aligned}$$

جمله هایی با توانهای بالاتر

اگر حدس اولیه، نزدیک به مقدار واقعی باشد، می توان از جمله های درجه بالا صرف نظر کرد. مجموعه معادلات خطی حاصل را می توان به صورت ماتریسی زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \\ b_2 - f_2(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ b_n - f_n(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right] & \left[ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right] & \dots & \left[ \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right] \\ \left[ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right] & \left[ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right] & \dots & \left[ \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left[ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right] & \left[ \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right] & \dots & \left[ \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (95-6)$$

یا:

$$\Delta f = J \Delta x \quad (96-6)$$

که از  $J$  به نام ژاکوبین<sup>۱</sup> یاد می شود. اگر حدس  $x_1^*, \dots, x_n^*$ ، دقیق باشد، در این صورت  $\Delta f$  و  $\Delta x$  صفر خواهند بود. اما چون  $x_1^*, \dots, x_n^*$  تنها حدس هستند  $\Delta f$  محدود است. معادله ۶-۹۵، رابطه ای خطی را بین خطاهای  $\Delta f$  و تصحیحات  $\Delta x$  از طریق ژاکوبین فراهم می آورد.  $\Delta x$  را می توان با اعمال هر روش مناسب برای حل مجموعه معادلات خطی به دست آورد. مقادیر بهنگام شده<sup>۲</sup>  $x$  از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$x_i^1 = x_i^* + \Delta x_i$$

مراحل آنقدر تکرار می‌گردد تا خطاهای  $\Delta f_i$  از حد خاصی کمتر شوند. تکرارها، همگرایی درجه دو دارند و در هر گام باید ژاکوبین محاسبه شود. این روش گاهی به روش نیوتن هم خوانده می‌شود اما بعد از آنکه رافسون (۱۶۴۸-۱۷۱۵ میلادی) آن را به صورت تکراری در آورد (که معمولاً امروزه استفاده می‌شود) به نام نیوتن - رافسون خوانده می‌شود.

اعمال روش نیوتن - رافسون به حل معادلات پخش بار

به منظور به کارگیری روش نیوتن - رافسون، لازم است که هریک از معادلات مختلط ۶-۸۹ را به صورت دو معادله حقیقی بر حسب دو متغیر حقیقی (به جای یک متغیر مختلط) نوشت. این بدان علت است که معادله ۶-۸۹ به دلیل وجود جملات مزدوج  $(\tilde{V}_k^*)$ ، تابعی ریاضی از ولتاژهای مختلط نیست و در نتیجه، مشتقهای مختلف آن وجود ندارد. اغلب برنامه‌های پخش بار از مختصات قطبی<sup>۱</sup> برای نمایش معادلات استفاده می‌کنند. برای گره  $k$  ام می‌توان نوشت:

$$\tilde{S}_k = P_k + jQ_k = \tilde{V}_k \tilde{I}_k^* \quad (۹۷-۶)$$

از معادله ۶-۸۷ داریم:

$$\tilde{I}_k = \sum_{m=1}^n \tilde{Y}_{km} \tilde{V}_m \quad (۹۸-۶)$$

با جایگزینی  $\tilde{I}_k$  از معادله ۶-۹۸ در معادله ۶-۹۷ داریم:

$$P_k + jQ_k = \tilde{V}_k \sum_{m=1}^n (G_{km} - jB_{km}) \tilde{V}_m^* \quad (۹۹-۶)$$

حاصل ضرب فازورهای  $\tilde{V}_k$  و  $\tilde{V}_m^*$  را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_k \tilde{V}_m^* &= (V_k e^{j\theta_k}) (V_m e^{-j\theta_m}) = V_k V_m e^{j(\theta_k - \theta_m)} \\ &= V_k V_m (\cos \theta_{km} + j \sin \theta_{km}) \quad (\theta_{km} = \theta_k - \theta_m) \end{aligned} \quad (۱۰۰-۶)$$

بنابراین، عبارات مربوط به  $P_k$  و  $Q_k$  به شکل حقیقی زیر خواهند بود:

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} V_m \cos \theta_{km} + B_{km} V_m \sin \theta_{km}) \quad (101-6)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} V_m \sin \theta_{km} - B_{km} V_m \cos \theta_{km})$$

بنابراین  $P$  و  $Q$  هر شین، توابعی از دامنه ( $V$ ) و زاویه ( $\theta$ ) و لتاژ تمام شینها خواهند بود. اگر توان حقیقی و راکتیو هر شین مشخص شده باشد و از بالانویس  $sp$  جهت نمایش مقادیر آنها استفاده کنیم، معادلات پخش بار را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} P_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) &= P_1^{sp} \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ P_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) &= P_n^{sp} \\ Q_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) &= Q_1^{sp} \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ Q_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) &= Q_n^{sp} \end{aligned} \quad (102-6)$$

با استفاده از روش مبتنی بر معادله ۶-۹۵ که قبلاً شرح داده شد، داریم:

$$\begin{bmatrix} P_1^{sp} - P_1(\theta_1^*, \dots, \theta_n^*, V_1^*, \dots, V_n^*) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ P_n^{sp} - P_n(\theta_1^*, \dots, \theta_n^*, V_1^*, \dots, V_n^*) \\ Q_1^{sp} - Q_1(\theta_1^*, \dots, \theta_n^*, V_1^*, \dots, V_n^*) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ Q_n^{sp} - Q_n(\theta_1^*, \dots, \theta_n^*, V_1^*, \dots, V_n^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \dots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_1 \\ \dots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (۱۰۳-۶)$$

ژاکوبین

پراکندگی هر یک از زیرماتریسهای ژاکوبین شبیه ماتریس ادمتیانس گره است. برای حل مؤثر معادله فوق، باید از روش مناسبی نظیر روش مبتنی بر خاصیت پراکندگی ماتریس<sup>۱</sup> و نیز تجزیه مثلثی شکل<sup>۲</sup> (بخش ۶-۴-۶) استفاده نمود.

در معادله ۱۰۳-۶ فرض شد که تمام شینها از نوع PQ هستند. برای شینهای PV، فقط P مشخص می شود و دامنه ولتاژ V معلوم و ثابت است. بنابراین جملات مربوط به  $\Delta V$  و  $\Delta Q$  برای شینهای PV وجود ندارند. از این رو برای هر شین PV، ژاکوبین، فقط یک ردیف و یک ستون دارد.

#### بررسی حساسیت با استفاده از ژاکوبین

وقتی با استفاده از روش نیوتن-رافسون به پاسخ رسیدیم، مدل را حول یک نقطه کار به صورت زیر خطی نموده ایم:

$$[J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (۱۰۴-۶)$$

از این رو، می توان به سهولت به ازای تغییرات کوچک در P و Q، تغییرات  $\theta$  و V را محاسبه نمود. این نمونه اطلاعات در بررسی حساسیت، و در تخمین تغییرات ولتاژ ناشی از به کارگیری جبرانگرهای توان راکتیو، مفید است.

همچنان که در فصل چهاردهم خواهیم داد، ژاکوبین می تواند اطلاعات مناسبی را در خصوص پایداری ولتاژ ارائه دهد.

1. Sparsity

2. Triangular Factorization

۴-۶-۶ روشهای پخش بار دکوپله سریع<sup>۱</sup> (FDLP) [۱۷ و ۱۸]  
 این روشها از توزیع ضعیف بین P و V و بین Q و  $\theta$  (به بخش ۳-۶ مراجعه کنید) حُسن استفاده را می‌برند. همچنین از تقریبهایی استفاده می‌کنند که حل مسأله پخش بار را ساده می‌کند. الگوریتم روش را می‌توان از معادله ۱۰۳-۶ به صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

اولین گام در خصوص دکوپله کردن  $P-\theta$  و  $Q-V$  این است که زیرماتریسهای توزیع  $\partial P / \partial V$  و  $\partial Q / \partial \theta$  در معادله ۱۰۳-۶ صرف نظر کرد و دو معادله جدای زیر را به دست آورد:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta \\ &= H \Delta \theta \end{aligned} \quad (۱۰۵-۶)$$

و:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V \\ &= L \Delta V \end{aligned} \quad (۱۰۶-۶)$$

عناصر ماتریسهای H و L را می‌توان از معادله ۱۰۱-۶ به صورت زیر به دست آورد [۱۷]:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad m \neq k \quad \text{برای:}$$

و:

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -B_{kk} V_k^2 - Q_k$$

به طور مشابه:

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

$$= H_{km} / V_m \quad m \neq k \quad \text{برای}$$

و:

$$L_{kk} = -B_{kk} V_k + Q_k / V_k$$

اکنون معادلات ۶-۱۰۵ و ۶-۱۰۶ را می‌توان به کمک روش دکوپله نیوتن - رافسون و با محاسبه و تجزیه مجدد به عوامل مثلثی شکل ماتریسهای  $H$  و  $L$ ، در هر تکرار حل کرد. اما می‌توان با توجه به اینکه تقریبهای زیر در مورد سیستمهای واقعی قدرت صادق است، باز هم مسأله را ساده‌تر کرد:

$$\cos \theta_{km} \approx 1 ; G_{km} \sin \theta_{km} \ll B_{km} ; Q_k \ll B_{kk} V_k^2$$

بنابراین، معادلات ۶-۱۰۵ و ۶-۱۰۶ به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\Delta P = (\mathbf{V} \mathbf{B}' \mathbf{V}) \Delta \theta \quad (107-6)$$

$$\Delta Q = (\mathbf{V} \mathbf{B}'' \mathbf{V}) \Delta V \quad (108-6)$$

در این مرحله، ماتریسهای  $\mathbf{B}'$  و  $\mathbf{B}''$  یکسان و برابر با  $-\mathbf{B}$  هستند که  $\mathbf{B}$ ، ماتریس سوسپیتانس شبکه است. اعمال ساده‌سازیهای زیر سرعت همگرایی روش تکرار را باز هم بیشتر می‌کند [۱۷]:

الف) عناصری از شبکه که به طور غالب بر انتقال توانهای راکتیو تأثیر می‌گذارند (یعنی راکتانسهای موازی و نسبتهای تبدیل غیر اسمی ترانسفورمرها) از  $\mathbf{B}'$  حذف می‌شوند. به طور مشابه، تأثیر مربوط به تغییر دهنده‌های فاز از  $\mathbf{B}''$  حذف می‌گردد.

ب) عبارات  $\mathbf{V}$  سمت چپ در معادلات ۶-۱۰۷ و ۶-۱۰۸ به طور سمت چپ معادلات منتقل می‌شوند و تأثیر توانهای انتقالی راکتیو بر محاسبه  $\Delta \theta$  با مساوی واحد قرار دادن عبارات  $\mathbf{V}$  سمت راست در معادله ۶-۱۰۷، کنار گذاشته می‌شود.

اکنون، معادلات ۶-۱۰۷ و ۶-۱۰۸ به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\Delta P / V = B' \Delta \theta \quad (109-6)$$

$$\Delta Q / V = B'' \Delta V \quad (110-6)$$

این روش، ابتدا در مرجع ۱۷ ارائه شد و علاوه بر تقریبهای فوق از تأثیر مقاومتهای سری در  $B'$  نیز صرف نظر می‌کرد و به طرح XB<sup>۱</sup> موسوم است. روشی که بعداً در مرجع ۱۸ ارائه شد، از تأثیر مقاومتهای سری در  $B''$  صرف نظر کرد و به طرح BX موسوم است.

ماتریسهای  $B'$  و  $B''$ ، حقیقی و دارای اجزای پراکنده هستند و فقط دارای ادمیتانسهای ثابت شبکه هستند. از این رو کافی است فقط یک بار در ابتدا آنها را به عوامل مثلثی شکل تجزیه کرد. ماتریس  $B''$ ، متقارن است به گونه‌ای که فقط لازم است عامل بالا مثلثی<sup>۲</sup> ذخیره گردد. اگر ترانسفورمرهای تغییردهنده فاز وجود داشته باشند،  $B'$  نیز متقارن است.

حُسن استفاده از معادلات ۱۰۹-۶ و ۱۱۰-۶ در آن است که می‌توان حل مکرر  $\Delta \theta$  و  $\Delta V$  را بسیار سریع و با استفاده از عوامل مثلثی شکل ثابت  $B'$  و  $B''$  به دست آورد. این حلها را می‌توان به نحو مشخصی و در جهت رسیدن به پاسخ دقیق، به صورت تکراری درآورد. زمانی به حل پخش بار می‌رسیم که مقادیر  $\Delta P / V$  و  $\Delta Q / V$  از حد بسیار کوچک مشخصی، کمتر شوند. در تکرار  $i$ ام؛  $\Delta P$ ،  $\Delta Q$  با استفاده از معادلات ۱۰۹-۶ و ۱۰۲-۶ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Delta P = P^{sp} - P(\theta^{i-1}, V^{i-1}) \quad (111-6)$$

$$\Delta Q = Q^{sp} - Q(\theta^{i-1}, V^{i-1}) \quad (112-6)$$

که به این ترتیب اطمینان حاصل می‌شود که معادلات کامل سیستم در حل نهایی ارضا شده‌اند. معادلات ۱۰۹-۶ و ۱۱۰-۶ تصحیح لازم برای  $\Delta V$  و  $\Delta \theta$  را در هر تکرار تأمین می‌کنند.

#### ۶-۴-۵ مقایسه روشهای حل پخش بار

روش گوس - سایدل قدیمترین روش حل پخش بار است. این روش، ساده و از قابلیت اعتماد

1. XB Scheme

2. Upper Triangular Factor

کافی برخوردار است و معمولاً حالت‌های ضعیف ولتاژ و توان راکتیو سیستم را نیز تحمل می‌کند. علاوه به حافظه کامپیوتری کمی نیاز دارد. اما زمان محاسبات با افزایش اندازه سیستم، سرعت افزایش می‌یابد. این روش، سرعت همگرایی کمی دارد و در صورتی که سیستم در اثر سطوح بالای توانهای حقیقی انتقالی تحت فشار باشد، در همگرایی با مشکل مواجه می‌شود.

روش نیوتن رافسون، سرعت همگرایی بسیار خوبی دارد و زمان محاسبات با افزایش اندازه سیستم به صورت خطی زیاد می‌شود. در صورتی که ولتاژهای انتخاب شده اولیه، بسیار متفاوت با مقادیر حقیقی خود باشند، این روش در همگرایی با مشکل مواجه می‌شود و از این رو یک ولتاژ مسطح اولیه<sup>۱</sup> برای شروع مناسب نیست. اما همینکه حل ولتاژها نزدیک به مقدار حقیقی شدند، همگرایی، بسیار سریع است. از این رو، روش نیوتن رافسون بخصوص در سیستمهای بسیار بزرگ که نیازمند حل دقیق هستند، مناسب است. خصوصیت خوب همگرایی روش نیوتن رافسون، روش گوس سایدل را تکمیل می‌کند. از این رو، بسیاری از برنامه‌های پخش بار از هر دو روش استفاده می‌کنند. می‌توان حل را با روش گوس - سایدل شروع کرد و سپس برای رسیدن به همگرایی سریع، به روش نیوتن - رافسون تغییر داد.

روشهای پخش بار سریع دکوپله، عملاً تقریبهایی از روش نیوتن - رافسون هستند. در روش نیوتن - رافسون، برای محاسبه  $\Delta V$  و  $\Delta \theta$ ، به ژاکوبین نیاز است. از این رو، ژاکوبین بر همگرایی روشن تکرار تأثیر می‌گذارد اما مستقیماً بر حل نهایی، مؤثر نیست. معمولاً تقریبهای استفاده شده در روش دکوپله سریع باعث افزایش تعداد تکرارها می‌شود. با وجود این، به علت اینکه لازم نیست در هر تکرار دوباره، ژاکوبین، محاسبه شده، به عوامل مثلثی شکل تجزیه گردد، زمان محاسبات به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد. به علاوه نیاز به حافظه کامپیوتری، کاهش می‌یابد. سرعت همگرایی روش دکوپله سریع در مقایسه با روش معمول که درجه دو است، خطی است و نسبت به آن، در مقابل شرایط اولیه ولتاژ و نیز توانهای راکتیو، کمتر حساس است. روش دکوپله سریع مبتنی بر طرح XB، مناسب سیستمهایی نیست که نسبت R/X آنها بالاست و

۱. اگر حلی از شرایط مشابه کاری وجود نداشته باشد مرسوم است که در ابتدا دامنه ولتاژ شینهای بار مساوی یک (در مبنای واحد) و زاویه آنها صفر، و دامنه ولتاژ شینهای تولید مساوی مقادیر تعیین شده و زاویه آنها را صفر قرار دهیم. چنین انتخابی به شروع با ولتاژ مسطح (Flat voltage start) مرسوم است.

طرح BX برای آنها، مناسبتر است. در بیشتر حالات کاری سیستم، روشهای سریع دکوپله سریع حل سریع با دقت خوبی را نتیجه می دهند. اما در وضعیتی که زوایای دوطرف خطوط، بسیار بزرگ باشند و افزارهای خاص کنترلی که بر توانهای انتقالی حقیقی و راکتیو تأثیر می گذارند، وجود داشته باشد، ممکن است روش معمول نیوتن - رافسون ضرورت پیدا کند.

#### ۶-۴-۶ استفاده از روش مبتنی بر خاصیت پراکندگی ماتریس و تجزیه به عوامل

##### مثلی شکل<sup>۱</sup>

بررسی مسأله پخش بار با استفاده از روشهایی از قبیل نیوتن - رافسون و پخش بار دکوپله سریع نیازمند حل معادلات ماتریسی پراکنده خطی است. از این رو امروزه استفاده از روش مبتنی بر خاصیت پراکندگی ماتریس و تجزیه به عوامل مثلی شکل، مرسوم است. یک ماتریس پراکنده خطی به صورت زیر است.

$$Ax = b \quad (۱۱۳-۶)$$

که برای هر  $b$  مشخص،  $x$  را می توان به دست آورد.  $A$  را می توان به صورت زیر به عوامل مثلی شکل تجزیه کرد:

$$(LDU)x = b \quad (۱۱۴-۶)$$

که

$L$  : ماتریس پایین مثلی؛

$U$  : ماتریس بالا مثلی؛

و  $D$  : ماتریس قطری

است. ماتریسهای  $L$  و  $U$  نیز پراکنده هستند. اگر  $A$ ، متقارن باشد،  $L$ ، ترانهاد  $U$  است و لازم نیست محاسبه یا ذخیره شود.

می توان معادله ۱۱۴-۶ را به منظور به دست آوردن  $x$  از  $b$  و با جایگزینی پیشرو<sup>۲</sup> و پسرو<sup>۳</sup> حل کرد. جایگزینی پیشرو، معادله را به صورت زیر درمی آورد:

1. Sparsity — Oriented Triangular Factorization

2. Forward Substitution

3. Backward Substitution

$$U \begin{bmatrix} x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b' \end{bmatrix} \quad (۱۱۵-۶)$$

که در حقیقت با استفاده از روش حذف گاوس<sup>۱</sup>، به شکل مثلثی در آمده است. حل  $x$  را می توان با جایگزینی پسرو به دست آورد بدین معنا که معادله آخر،  $x_n$  را نتیجه می دهد که با جایگزینی در معادله  $(n-1)$  ام،  $x_{n-1}$  به دست می آید و به همین ترتیب سایر متغیرها به دست می آیند.

استفاده از روشهای مبتنی بر خاصیت پراکندگی ماتریس و ترتیب بهینه<sup>۲</sup>، در حل معادلات شبکه های بزرگ ضروری است [۱۹]. می توان با استفاده از روشهای برداری پراکندگی<sup>۳</sup> [۲۰]، کارایی روشهای پراکندگی را بهبود بخشید. مرجع ۲۱، بحث مفصلی را در خصوص روشها و مفاهیم مربوط به ماتریسهای پراکنده ارائه می دهد.

#### ۶-۴-۷ کاهش اندازه شبکه

با حذف گره های غیر فعال، می توان اندازه شبکه را کاهش داد. اگر  $I_k=0$  باشد، می توان با جایگزین کردن عناصر  $(n-1)$  ام ردیف و ستون باقیمانده با:

$$y'_{ij} = y_{ij} - \frac{y_{ik}y_{kj}}{y_{kk}} \quad (۱۱۶-۶)$$

گره  $k$  را حذف کرد که  $k+1$  و  $k-1, \dots, i=1, 2, \dots, k-1$  و  $n, \dots, k+1, k-1$  و  $j=1, 2, \dots, k$  است. با استفاده مکرر از معادله ۱۱۶-۶ هر تعداد گره غیرفعال را می توان حذف کرد. معادله ۱۱۶-۶ به رابطه کاهش کرون<sup>۴</sup> موسوم است. اگر روشهای پراکندگی استفاده می شود، نباید بی قاعده تمام گره های غیرفعال را، حذف کرد. به طور کلی کاهش اندازه سیستم باعث متراکم شدن آن می گردد. بنابراین بهترین راه حل آن است که فقط گره هایی را حذف کرد که با حذف آنها، تعداد شاخه های سیستم افزایش نیابد. مرجع ۲۲، روش مؤثر کاهش اندازه سیستم را با استفاده از ویژگیهای خاص ماتریسهای پراکنده ارائه می دهد.

1. Gauss Elimination
2. Optimal Ordering
3. Sparse Vector Methods
4. Krons Reduction Formula

## منابع

- [1] W.D. Stevenson, Jr., *Elements of Power System Analysis*, Third Edition, McGraw-Hill, 1975.
- [2] O. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*, McGraw-Hill, 1971.
- [3] J. Zaborszky and J.W. Rittenhouse, *Electric Power Transmission*, Vols. 1 and 2, 3<sup>rd</sup> reprint, The Rensselaer Book Store, Troy, N.Y., 1977.
- [4] B.M. Weedy, *Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, Third Edition, 1979.
- [5] C.A. Gross, *Power System Analysis*, Second Edition, John Wiley & Sons, 1986.
- [6] C.F. Wagner and R.D. Evans, *Symmetrical Components*, McGraw-Hill, 1933.
- [7] M.E. El-Hawary, *Electrical Power Systems: Design and Analysis*, Reston Publishing Company, 1983.
- [8] *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, Pa., 1964.
- [9] J.J. Leforest (editor), *Transmission Line Reference Book-345 kV and Above*, Second Edition, EPRI, 1982.
- [10] T.J.E. Miller (editor), *Reactive Power Control in Electric Systems*, Wiley-Interscience, 1982.
- [11] H.P. St. Clair, "Practical Concepts in Capability and Performance of Transmission Lines," *AIEE Trans.*, Vol. 72, pp. 1152-1157, December 1953.
- [12] R.D. Dunlop, R. Gutman, and R.P. Marchenko, "Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Transmission Lines," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-98, pp. 606-617, March/April 1979.
- [13] IEEE Committee Report, "Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-92, pp. 1916-1925, November/December 1973.

- [14] G.W. Stagg and A.H. El-Abiad, *Computer Methods in Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1968.
- [15] M.A. Laughton and M.W.H. Davies, "Numerical Techniques in Solution of Power System Load-Flow Problems," *Proceedings of IEE*, Vol. III, No. 9, 1964.
- [16] B. Stott, "Review of Load-Flow Calculation Methods," *Proceedings of IEEE*, Vol. 62, pp. 916-929, July 1974.
- [17] B. Stott and D. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-93, pp. 859-869, May/June 1974.
- [18] R.A.M. Van Amerongen, "A General-Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, pp. 760-770, May 1989.
- [19] W.F. Tinney and J.W. Walker, "Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization," *Proceedings of IEEE*, Vol. 55, pp. 1801-1809, November 1967.
- [20] W.F. Tinney, V. Brandwajn, and S.M. Chan, "Sparse Vector Methods," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-104, pp. 295-301, February 1985.
- [21] F.L. Alvarado, W.F. Tinney, and M.K. Enns, "Sparsity in Large-Scale Network Computation," *Control and Dynamic Systems*, Vol. 41: *Analysis and Control System Techniques for Electric Power Systems*, Part 1, pp. 207-271, Academic Press, Inc., 1991.
- [22] W.F. Tinney and J.M. Bright, "Adaptive Reductions for Power Flow Equivalents," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-2, No. 2, pp. 351-360, May 1987.

## فصل هفتم

### بارهای سیستمهای قدرت

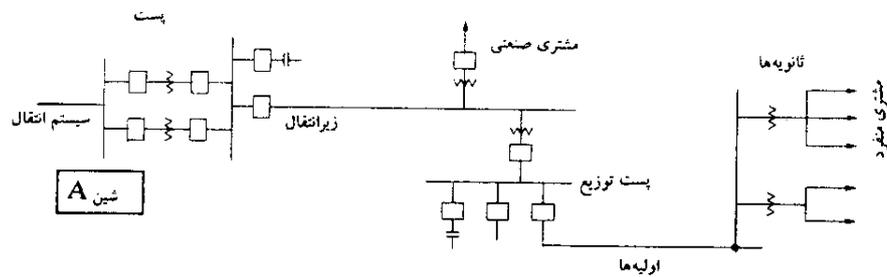
بهره‌برداری پایدار از سیستمهای قدرت، مستلزم توانایی آنها در حفظ تعادل بین توانهای الکتریکی خروجی نیروگاهها و بارهای الکتریکی سیستم است. از این‌رو، مشخصه‌های بار، تأثیر مهمی بر پایداری سیستم دارد. مدل‌سازی بار پیچیده است زیرا در مطالعات پایداری، به یک شین، افزارهای متنوعی از قبیل لامپهای فلوروسنت و معمولی، یخچال، گرم‌کننده، کمپرسور، موتور، کوره و غیره متصل است، از این‌رو تخمین ترکیب دقیق بار، مشکل است. بعلاوه، این ترکیب، ممکن است تحت تأثیر عواملی از قبیل زمان (ساعت، روز، فصل)، وضعیت آب و هوایی و وضعیت اقتصادی تغییر نماید. حتی اگر ترکیب دقیق هم مشخص می‌بود، عملی نبود که هر جزء بار را که میلیونها از آن نمونه در سراسر شبکه وجود دارد، در مطالعات نمایش داد. بنابراین نمایش بار در سیستمهای قدرت، مستلزم ساده‌سازیهای بسیار است.

در این فصل، مفهوم مدل‌سازی بار، ترکیب بار و مشخصه‌های اجزا و چگونگی کسب پارامترهای مدل بار مورد بحث قرار می‌گیرد. از آنجا که موتورهای القایی، بخش عمده‌ای از بارهای سیستم را تشکیل می‌دهند، مشخصه‌ها و مدل‌سازی آنها به طور مشروح بیان خواهد شد.

#### ۷-۱ مفاهیم اولیه مدل‌سازی بار

در مطالعات پایداری و پخش بار سیستمهای قدرت، مرسوم است که مشخصه‌های بارهای

ترکیبی را در نقاط عمده مصرف نمایش دهند. مطابق با شکل ۱-۷، مشاهده می‌شود که بار ترکیبی در پست انتقال (شین A)، علاوه بر تجهیزات مصرفی متصل شده، معمولاً شامل تأثیر ترانسفورهای کاهش دهنده فیدرهای زیر انتقال<sup>۱</sup>، فیدرهای توزیع، ترانسفورهای توزیع، تنظیم کننده‌های ولتاژ و تجهیزات مربوط به جبران‌گرهای توان راکتیو است.



شکل ۱-۷ ترکیب سیستم قدرت که بخشهایی از سیستم را نشان می‌دهد که به صورت بار در نقطه عمده تحویل توان (شین A) نمایش داده شده‌اند.

معمول است که مدل‌سازی بار را به دو بخش عمده مدل‌های استاتیکی و مدل‌های دینامیکی تقسیم می‌کنند.

### ۱-۱-۷ مدل‌های استاتیکی بار

مدل استاتیکی بار، مشخصه‌های بار را در هر لحظه زمان به صورت توابع جبری بر حسب دامنه ولتاژ شین و فرکانس در آن لحظه، بیان می‌کند. مؤلفه توان حقیقی (P) و مؤلفه توان راکتیو (Q) به طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود. وابستگی مشخصه‌های بار به ولتاژ معمولاً به صورت نمایی زیر نمایش داده می‌شود:

$$\begin{aligned} P &= P_0 (\bar{V})^a \\ Q &= Q_0 (\bar{V})^b \end{aligned} \quad (1-7)$$

#### 1. Subtransmission Feeders

در این مدل و مدل‌های دیگر مطرح در این بخش داریم:

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0}$$

که  $P$  و  $Q$  به ترتیب نمایش دهنده توانهای حقیقی و راکتیو بار است هنگامی که دامنه ولتاژ شین مساوی  $V$  است. زیرنویس  $0$  مقادیر متغیرهای مربوطه را در شرایط اولیه کاری نشان می‌دهد. پارامترهای این مدل، نماهای  $a$  و  $b$  است. اگر این مؤلفه‌ها به ترتیب، صفر، یک یا دو باشد، مدل نمایش داده شده، نشاندهنده مشخصه‌های بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت خواهد بود. در بارهای ترکیبی، مقادیر آنها بستگی به مشخصه‌های اجزای تشکیل دهنده بار ترکیبی دارد. نماهای  $a$  (یا  $b$ ) تقریباً مساوی شیب  $dP/dV$  (یا  $dQ/dV$ ) در  $V = V_0$  است. در بارهای ترکیبی،  $a$  معمولاً بین  $0/5$  تا  $1/8$  و  $b$  بین  $1/5$  تا  $6$  است. مشخصه مهم  $b$  آن است که به طور غیر خطی با ولتاژ، تغییر می‌کند که این موضوع به علت اشباع مغناطیسی در ترانسفورمرهای توزیع و موتورها، اتفاق می‌افتد. در ولتاژهای بالاتر،  $Q$  به میزان زیادی افزایش می‌یابد.

مرجع ۲ خلاصه‌ای از داده‌های موجود در خصوص وابستگی بار به ولتاژ را که در تحقیقات و مقالات وجود دارد، بیان می‌کند. در مراجع ۳ و ۴ نتایج اندازه‌گیری شده درباره وابستگی مشخصه بار به روز، فصل و یا دما بیان شده است. در صورتی که هیچ داده‌ای وجود نداشته باشد، معمولترین روش آن است که بار توان حقیقی را به صورت جریان ثابت ( $a = 1$ ) و بار توان راکتیو را به صورت امپدانس ثابت ( $b = 2$ ) مدل نمایند [۲].

روش دیگری برای نمایش وابستگی بار به ولتاژ، مدل چند جمله‌ای زیر است:

$$P = P_0 \cdot [p_1 \bar{V}^2 + p_2 \bar{V} + p_3] \quad (2-7)$$

$$Q = Q_0 \cdot [q_1 \bar{V}^2 + q_2 \bar{V} + q_3]$$

این مدل به مدل ZIP موسوم است زیرا که از مؤلفه امپدانس ثابت ( $Z$ )، جریان ثابت ( $I$ ) و توان ثابت ( $P$ ) تشکیل شده است [۱]. پارامترهای مدل،  $p_1$  تا  $p_3$  و  $q_1$  تا  $q_3$  است که سهم هر جزء را نمایش می‌دهند.

وابستگی مشخصه بار به فرکانس را معمولاً با ضرب مدل توانی یا مدل چند جمله‌ای با یک عامل به صورت زیر نمایش می‌دهند:

$$P = P_0 (\bar{V})^a (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (3-7)$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^b (1 + K_{qf} \Delta f)$$

یا:

$$P = P_0 [p_1 \bar{V}^1 + p_r \bar{V} + p_r] (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (4-7)$$

$$Q = Q_0 [q_1 \bar{V}^1 + q_r \bar{V} + q_r] (1 + K_{qf} \Delta f)$$

که  $\Delta f$ ، نمایش دهنده انحراف فرکانس ( $f - f_0$ ) است. به عنوان نمونه،  $K_{pf}$  بین ۰ تا ۳/۰ و  $K_{qf}$  بین ۰/۲ تا ۰ تغییر می‌کند [۲]. معمولاً در مدل مورد استفاده سیستم در مطالعات پایداری، فرکانس شین ( $f$ ) به صورت یک متغیر حالت نیست. از این رو، آن را به صورت مشتق زاویه ولتاژ و شین، محاسبه می‌نمایند.

مدل جامع استاتیکی که قابلیت انعطاف لازم را در نمایش انواع مدلها دارد به صورت زیر است [۵]:

$$P = P_0 [P_{ZP} + P_{EX1} + P_{EX2}] \quad (5-7)$$

که:

$$P_{ZP} = p_1 \bar{V}^1 + p_r \bar{V} + p_r$$

$$P_{EX1} = p_r (\bar{V})^{a1} (1 + K_{pf1} \Delta f) \quad (6-7)$$

$$P_{EX2} = p_0 (\bar{V})^{a2} (1 + K_{pf2} \Delta f)$$

و مؤلفه توان راکتیو، ساختار مشابهی دارد. جبرانگر توان راکتیو مربوط به بار به صورت جداگانه نمایش داده می‌شود.

مدلهای استاتیکی نمایش داده شده به کمک معادلات ۱-۷ تا ۶-۷ در ولتاژهای پایین مناسب نیستند و ممکن است مشکلات محاسباتی ایجاد نمایند. بنابراین در برنامه‌های پایداری،

معمولاً اگر ولتاژ شین از حد مشخصی کمتر شود، مشخصه بار به طور خودکار به مدل امپدانس ثابت تغییر می‌نماید. در مدل مورد استفاده در برنامه بسط یافته پایداری گذرا و میان مدت<sup>۱</sup> مؤسسه EPRI<sup>۲</sup> [۵]، نماهای  $a_1$ ،  $a_2$ ،  $b_1$ ،  $b_2$  پایتتر از حد به خصوصی از ولتاژ شین، به صورت تابعی از ولتاژ تغییر می‌کنند و مؤلفه‌های توان ثابت و جریان ثابت به نمونه امپدانس ثابت تغییر می‌یابند.

### ۷-۱-۲ مدل‌های دینامیکی بار

عکس‌العمل اغلب بارهای ترکیبی نسبت به ولتاژ و فرکانس سریع است و سریعاً به پاسخ حالت ماندگار می‌رسند. این موضوع حداقل برای زمانی که دامنه تغییرات و یا فرکانس نسبتاً کم است، صحیح است. در چنین حالاتی، استفاده از مدل‌های استاتیکی مذکور در بخشهای قبل مناسب است. اما حالات زیادی وجود دارد که لازم است دینامیک اجزای بار به حساب آید. مطالعات مربوط به نوسانهای بین ناحیه‌ای، پایداری ولتاژ و پایداری بلند مدت اغلب مستلزم مدلسازی دینامیکی بار است. در مطالعات سیستمهایی که موتورهای متمرکز بزرگی دارند نیز نیاز به نمایش دینامیک بار وجود دارد.

به طور نوعی موتورها حدود ۶۰٪ تا ۷۰٪ انرژی کل یک سیستم قدرت را مصرف می‌کنند. بنابراین دینامیک مربوط به موتورها معمولاً مهمترین جنبه مشخصه‌های دینامیکی بارهای سیستم است. مدلسازی موتورها در بخش ۷-۲ مطرح شده است. جنبه‌های دیگر دینامیکی اجزای بار که لازم است در مطالعات پایداری در نظر گرفته شود، شامل موارد زیر است [۱ و ۲ و ۶]:

الف) خاموش شدن لامپهای تخلیه‌ای<sup>۳</sup> پایین‌تر از حد بخصوصی از ولتاژ و روشن شدن مجدد به هنگام بهبود و افزایش ولتاژ؛ لامپهای تخلیه‌ای شامل لامپهای بخار جیوه‌ای، بخار سدیم و فلورسنت هستند. این خاموشی معمولاً در ولتاژهای بازه  $0/7$  تا  $0/8$  (در مبنای واحد) اتفاق می‌افتد. زمانی که ولتاژ افزایش می‌یابد، روشنی مجدد آنها با تأخیر زمانی ۱ تا ۲

1. Extended Transient / Midterm Stability Program

2. Electric Power Research Institute

3. Discharge Lamps

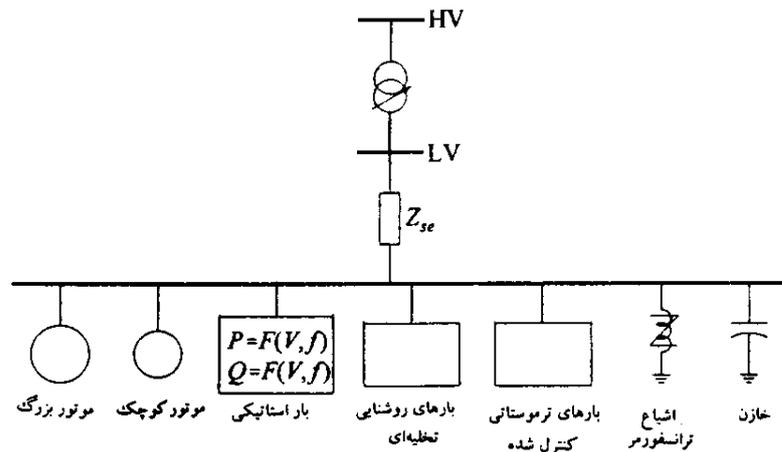
ثانیه صورت می‌پذیرد.

ب) عملکرد رله‌های حفاظتی نظیر رله‌های حرارتی و اضافه جریان<sup>۱</sup>؛ بسیاری از موتورهای صنعتی دارای استارترهایی<sup>۲</sup> با کنتاکتورهای الکترو مغناطیسی هستند و زمانی که ولتاژ به حدود ۰/۵۵ تا ۰/۷۵ (در مبنای واحد) برسد، با تأخیر زمانی حدود چند سیکل باز می‌شوند. موتورهای کوچکتتر یخچالها و تهویه مطبوع فقط دارای حفاظت حرارتی هستند که معمولاً ظرف ۱۰ تا ۳۰ ثانیه عمل می‌کنند.

ج) کنترل ترموستاتی بارهایی از قبیل گرمایش و یا سرمایش فضا، آب گرم‌کنها و یخچالها؛ چنین بارهایی مدت طولانی‌تری در ولتاژهای پایین کار می‌کنند. در نتیجه ظرف چند دقیقه پس از افت ولتاژ، تعداد کل چنین تجهیزاتی، افزایش می‌یابد. سیستمهای تهویه مطبوع و یخچالها، نیز چنین مشخصه‌هایی را در شرایط فرکانس پایین، از خود نشان می‌دهند.

د) عکس‌العمل تغییردهنده‌های تپ زیر بار ترانسفورمرهای توزیع، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و مجموعه‌های خازنی، با کنترل ولتاژ؛ این تجهیزات به طور مشخص در بسیاری مطالعات، مدل نمی‌شوند. در چنین حالاتی، تأثیر آنها به طور ضمنی در مدل بار معادلی که در نقاط عمده عرضه انرژی وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود. چون چنین تجهیزاتی به دنبال یک اغتشاش، ولتاژ توزیع را بهبود می‌بخشند، توان عرضه شده به بارهای حساس به ولتاژ به سطوح قبل از اغتشاش باز می‌گردد. عملکرد کنترلی حدود یک دقیقه بعد از تغییر در ولتاژ شروع می‌شود و بهبود ولتاژ در محدوده قابلیت این تجهیزات، ظرف ۲ تا ۳ دقیقه، پایان می‌پذیرد.

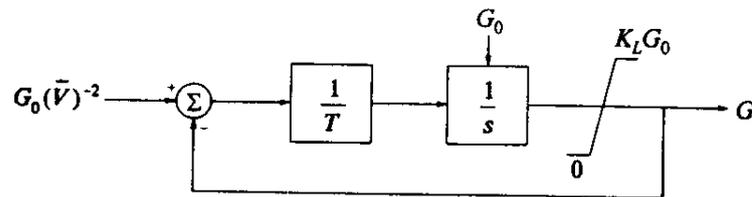
یک مدل ترکیبی بار که اجازه نمایش مشخصه‌های متنوعی از اجزای بار را می‌دهد، در شکل ۷-۲ نشان داده شده که شبیه مدل‌های پیچیده بار در مراجع ۶ و ۷ است. مدل، اجازه نمایش موتورهای القایی کوچک، موتورهای القایی بزرگ، مشخصه‌های استاتیکی بار (معادلات ۷-۵ و ۷-۶)، لامپهای تخلیه‌ای، بارهای با کنترل ترموستاتی، تأثیر اشباع ترانسفورمر و خازنهای موازی را می‌دهد.



شکل ۲-۷ مدل بار ترکیبی استاتیکی و دینامیکی

بارهای با کنترل ترموستاتی

شکل ۳-۷، مدل ساده‌ای از بارهای با کنترل ترموستاتی (یعنی انرژی ثابت) را نشان می‌دهد [ ۸ و ۹]. در این مدل،  $G$  نمایشگر کندانسانس بار،  $G_0$ ، مقدار اولیه  $G$ ،  $K_L G_0$ ، حداکثر مقدار  $G$  (که برای وضعیتی است که تمام اجزای بار متصل است) و  $T$ ، ثابت زمانی است. مدل واقعی تری از بارهای با کنترل ترموستاتی در مرجع ۵ استفاده شده است که در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. اساس این مدل به صورت زیر است:



شکل ۳-۷ مدل ساده برای بارهای کنترل با ترموستات

معادله دینامیکی عنصر حرارتی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$K \frac{d\tau_H}{dt} = P_H - P_L \quad (V-V)$$

که:

- $\tau_H$  : دمای ناحیه گرم شده ؛
- $\tau_A$  : دمای محیط ؛
- $P_H$  : توان گرم کننده مساوی با  $K_H GV^T$  ؛
- $P_L$  : تلفات حرارتی به محیط بیرون مساوی با  $K_A (\tau_H - \tau_A)$  ؛
- $G$  : کندانس بار ؛
- $K_p$  : بهره کنترل کننده تناسبی<sup>۱</sup> ؛
- $K_I$  : بهره کنترل کننده انتگرالی<sup>۲</sup> ؛
- $T_C$  : ثابت زمانی (ثانیه) مربوط به کنترل کننده انتگرالی ؛
- $\tau_{ref}$  : دمای مبنا ؛
- $T_I$  : ثابت زمانی بار (ثانیه) ؛
- $K_I$  : بهره مربوط به مدل بار ؛
- $G_0$  : مقدار اولیه  $G$  ؛
- و  $G_{MAX}$  : حداکثر مقدار  $G$  ؛

است. با جایگزینی جمله های مربوط به  $P_H$  و  $P_L$  در معادله  $V-V$  داریم.

$$K \frac{d\tau_H}{dt} = K_H GV^T - K_A (\tau_H - \tau_A) \quad (A-V)$$

یا:

$$\frac{d\tau_H}{dt} = \frac{K_H}{K} GV^T + \frac{K_A}{K} \tau_A - \frac{K_A}{K} \tau_H$$

یا:

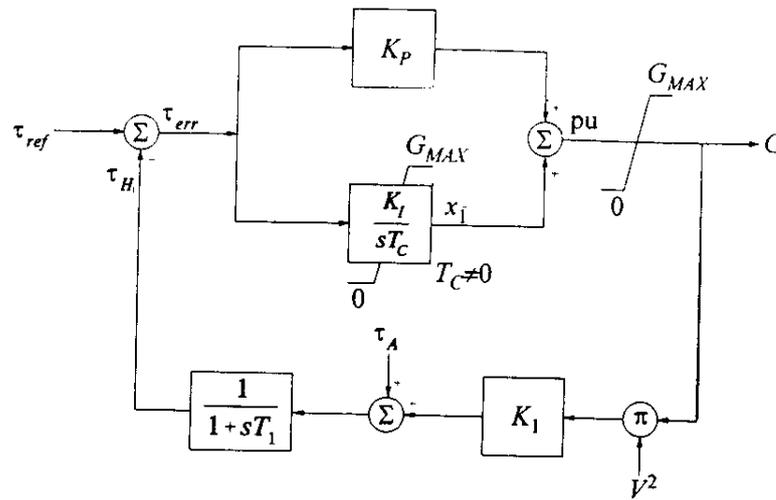
$$\frac{d\tau_H}{dt} = \frac{K_1}{T_1} GV^2 + \frac{1}{T_1} \tau_A - \frac{1}{T_1} \tau_H \quad (9-7)$$

که:

$$T_1 = \frac{K}{K_A}$$

و:

$$K_1 = \frac{K_H}{K_A}$$



- $K_p$  = بهره کنترلگر تناسبی
- $K_I$  = بهره کنترلگر انتگرالی
- $T_C$  = ثابت زمانی کنترلگر انتگرالی، s
- $\tau_{ref}$  = دمای مرجع
- $\tau_A$  = دمای محیط
- $T_1$  = ثابت زمانی بار، s
- $K_1$  = بهره مربوط به مدل بار
- $G_0$  = مدار اولیه G
- $G_{MAX}$  = مقدار حداکثر G

شکل ۴-۷ مدل حقیقی برای بارهای کنترل شده با ترموستات

دمای  $\tau_H$  با دمای مبنا مقایسه شده، خطای حاصل، گنداکنانس بار را از طریق یک کنترل کننده تناسبی-انتهگرالی، کنترل می کند. زمانی که تمام بارهای با کنترل ترموستاتی که به کمک شین بار تغذیه می شوند، متصل شدند،  $G$  به حداکثر مقدار خود یعنی  $G_{MAX}$  می رسد. از شکل ۴-۷ مشاهده می کنیم که قبل از افشاش،  $\tau_H$  مساوی  $\tau_{ref}$  است، بنابراین:

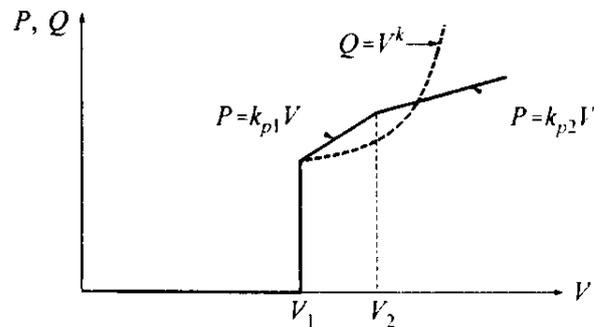
$$\tau_{ref} = K_1 V^T G_0 + \tau_A$$

یا:

$$K_1 = \frac{\tau_{ref} - \tau_A}{V^T G_0}$$

#### بارهای روشنایی تخلیه ای

شکل ۵-۷ مدلی را از بارهای روشنایی تخلیه ای که مناسب مطالعات پایداری است، نشان می دهد. در ولتاژهای شین کمتر از  $V_1$ ، لامپها خاموش می شوند. در ولتاژهای بزرگتر از  $V_1$ ،  $P$  و  $Q$  به صورت توابع غیر خطی از  $V$ ، تغییر می کنند.



شکل ۵-۷ مشخصه های روشنایی تخلیه ای

#### ۲-۷ مدل سازی موتورهای القایی

ممچنان که در بخش قبل بیان شد، موتورها بخش عمده ای از بارهای سیستم را تشکیل می دهند.

موتورهای القایی، بخصوص در صنعت زیاد استفاده می‌شوند و از این رو مدلسازی آنها در مطالعات پایداری سیستم، اهمیت دارد. در این بخش به طور مشروح، مدل ریاضی موتور القایی را بیان می‌کنیم.

### ۷-۲-۱ معادلات یک موتور القایی

یک ماشین القایی، جریان متناوب را در سیم‌پیچهای روتور و استاتور خود حمل می‌نماید. در یک موتور القایی سه فاز، سیم‌پیچهای استاتور به یک منبع سه فاز متعادل متصل است و سیم‌پیچهای روتور یا به صورت داخلی، اتصال کوتاه شده و یا از طریق جاروبکهای به یک مدار خارجی غیر فعال، متصل شده است. مشخصه بارز ماشین القایی آن است که جریانهای روتور از القای الکترومغناطیسی میدان استاتور ایجاد می‌شود. به این دلیل است که از ماشین به نام "القایی" یاد می‌شود.

سیم‌پیچهای استاتور ماشین القایی شبیه سیم‌پیچهای استاتور ماشین سنکرون است (به فصل سوم، بخش ۳-۱ مراجعه کنید). زمانی که جریان متعادل سه فاز با فرکانس  $f_s$  (Hz) از سیم‌پیچهای استاتور عبور کند، میدان دوار با سرعت سنکرون:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{P_r} \quad (7-11)$$

ایجاد می‌شود که  $n_s$  برحسب دور بر دقیقه و  $P_r$ ، تعداد قطبها (۲ به ازای هر مجموعه سیم‌پیچ سه فاز) است.

زمانی که حرکتی نسبی بین میدان استاتور و روتور وجود داشته باشد، ولتاژهایی در سیم‌پیچهای روتور القا می‌شود که فرکانس ولتاژهای القا شده ( $f_r$ ) به سرعت نسبی بین میدان استاتور و روتور بستگی دارد. جریان در هر سیم‌پیچ روتور، مساوی ولتاژ القا شده تقسیم بر امپدانس مدار روتور در فرکانس  $f_r$  است. در اثر تأثیر متقابل بین میدان استاتور و جریان روتور، گشتاوری ایجاد می‌شود که روتور را در جهت چرخش میدان استاتور، شتاب می‌دهد. زمانی که سرعت روتور ( $n_r$ ) به سرعت میدان استاتور ( $n_s$ ) نزدیک شود، ولتاژها و جریانهای القا شده در روتور به صفر میل می‌کنند. برای داشتن گشتاور مثبت، باید  $n_r$  از  $n_s$  کوچکتر باشد. از این رو،

نسبت به میدان استاتور، روتور با سرعت  $n_s - n_r$  دور بر دقیقه در جهت خلاف می‌چرخد. سرعت لغزشی<sup>۱</sup> روتور نسبت به سرعت سنکرون (در مبنای واحد) برابر است با:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (۷-۱۲)$$

و فرکانس ولتاژ القا شده در روتور ( $f_r$ ) نیز مساوی  $s f_s$  خواهد بود.

در حالت بی‌باری، ماشین در لغزش تقریباً صفر کار می‌کند. اگر اکنون یک بار مکانیکی را به محور ماشین اعمال کنیم، لغزش، افزایش می‌یابد (یعنی سرعت روتور کاهش می‌یابد) به طوری که ولتاژ و جریان القا شده در روتور، گشتاور مورد نیاز بار را تأمین نماید. در این صورت، ماشین، به صورت موتور کار می‌کند.

اگر روتور را به وسیله چرخاننده‌ای در سرعتی بالاتر از سرعت میدان استاتور بچرخانیم، لغزش، منفی می‌شود (یعنی سرعت روتور بالاتر از  $n_s$  است) و پلاریته ولتاژهای القایی معکوس می‌شود به گونه‌ای که گشتاور حاصل با حرکت مخالف می‌کند. در این صورت، ماشین، به صورت ژنراتور عمل می‌کند.

اکنون مدلی ریاضی از ماشینهای القایی را که مناسب مطالعات سیستم است به دست می‌آوریم. در مدل، از تأثیر شکافها بر عملکرد موتور صرف نظر می‌شود. در موتورهای با طراحی مناسب، این تأثیر واقعاً قابل چشمپوشی است. هر چند که توجه خاص در این فصل به موتور است، مدل‌های به دست آمده جامعیت کافی برای عملکرد ماشین القایی به صورت ژنراتور را هم دارند. روش کلی، مشابه روشی است که در مدلسازی ماشین سنکرون در فصول ۳ تا ۵ استفاده شد. ابتدا معادلات اساسی ماشین را بر حسب متغیرهای abc نوشته و سپس آنها را به چارچوب مبنای dq تبدیل می‌کنیم و سرانجام با استفاده از ساده‌سازیهایی لازم، معادلات سیستم را به صورت مناسب در مطالعات پایداری سیستم‌های بسیار بزرگ، بیان می‌نماییم. در دست آوردن مدل ماشین القایی، لازم است جنبه‌های زیر را در خصوص مشخصه‌های آن که با ماشین سنکرون متفاوت است، مورد توجه قرار دهیم:

● روتور ساختمان متقارنی دارد. این موضوع باعث می‌شود که مدارهای معادل دو محور

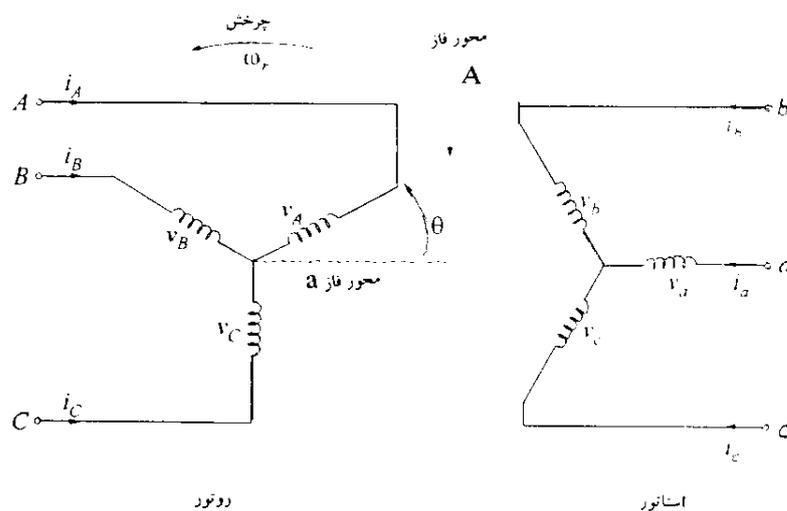
## 1. Slip Speed

d و q، یکسان شوند.

- سرعت روتور ثابت نیست بلکه با بار تغییر می‌کند. این موضوع بر انتخاب چارچوب مبنای dq تأثیر می‌گذارد.
- هیچ منبع تحریکی به سیم‌پیچهای روتور متصل نیست. از این رو، دینامیک مدارهای روتور به وسیله لغزش (به جای کنترل تحریک) تعیین می‌شود.
- جریانهای القا شده در سیم‌پیچهای اتصال کوتاه شده روتور، میدانی را با همان تعداد قطب میدان حاصل از سیم‌پیچهای استاتور، ایجاد می‌کنند. بنابراین سیم‌پیچهای روتور را می‌توان به صورت سیم‌پیچهای سه فاز معادل، مدل کرد.

#### معادلات اساسی ماشین القایی

شکل ۶-۷، مدارهای لازم برای بررسی ماشین القایی را نشان می‌دهد. سیم‌پیچهای استاتور (سه فاز a، b و c) از نظر فضایی،  $120^\circ$  با یکدیگر اختلاف فاز دارند. مدارهای روتور، سه سیم‌پیچ گسترده A و B و C هستند. فازهای استاتور و روتور ممکن است به صورت ستاره یا مثلث متصل شده باشند. در شکل ۶-۷، اتصال به صورت ستاره نشان داده شده است.



شکل ۶-۷ مدارهای استاتور و روتور ماشین القایی

ساختمان روتور ممکن است به یکی از دو صورت سیم‌پیچی شده<sup>۱</sup> یا قفس سنجابی<sup>۲</sup> باشد. در نوع اول، روتور دارای سیم‌پیچهای معمول سه فاز است که پایانه‌های آنها از طریق جاروبک‌هایی روی محور می‌تواند به یک مدار خارجی متصل شود. در نوع دوم، میله‌های فلزی در شکافهای روی روتور تعبیه شده‌اند که پایانه‌های آنها در دو طرف به هم اتصال کوتاه شده است. بنابراین در نوع قفس سنجابی، ولتاژهای روتور ( $v_A$  و  $v_B$  و  $v_C$ )، صفر هستند. به منظور سهولت در امر بررسی فقط یک زوج قطب را در نظر می‌گیریم و تمام زوایا را بر حسب رادیان یا درجه الکتریکی بیان می‌کنیم (به بخش ۳-۱-۲ فصل سوم مراجعه شود).

در شکل ۷-۶،  $\theta$ ، طبق تعریف زاویه‌ای است که محور فاز A روتور نسبت به فاز a استاتور در جهت حرکت، پیش است. اگر سرعت روتور، ثابت و مساوی  $\omega_r$  رادیان الکتریکی بر ثانیه باشد، داریم:

$$\theta = \omega_r t \quad (۱۳-۷)$$

که با لغزش ثابت s خواهیم داشت:

$$\theta = (1-s)\omega_s t \quad (۱۴-۷)$$

که  $\omega_s$ ، سرعت زاویه‌ای میدان استاتور بر حسب رادیان الکتریکی بر ثانیه است. با چشمپوشی از اشباع، پسماند و جریانهای گردابی و با فرض توزیع خالص سینوسی موجهای شار، معادلات ماشین را می‌توان به صورت زیر نوشت:

معادلات ولتاژ استاتور:

$$\begin{aligned} v_a &= p\psi_a + R_s i_a \\ v_b &= p\psi_b + R_s i_b \\ v_c &= p\psi_c + R_s i_c \end{aligned} \quad (۱۵-۷)$$

معادلات ولتاژ روتور:

$$\begin{aligned} v_A &= p\psi_A + R_r i_A \\ v_B &= p\psi_B + R_r i_B \\ v_C &= p\psi_C + R_r i_C \end{aligned} \quad (۱۶-۷)$$

در معادلات فوق،  $\Psi$  نشان دهنده شار دور سیم پیچ،  $R_s$  مقاومت فاز استاتور،  $R_r$  مقاومت فاز روتور و  $p$  علامت مشتق  $(d/dt)$  است. جهت مثبت جریانها به سمت داخل سیم پیچها فرض شده است.

در مطالعات پایداری سیستمهای قدرت، می توان از تأثیر شکافها چشمپوشی کرد و روتور را دارای یک ساختار متقارن فرض کرد. از این رو، فقط اندوکتانسهای متقابل بین سیم پیچهای استاتور و روتور تابع موقعیت روتور ( $\theta$ ) خواهند بود. شار دور سیم پیچ فاز  $a$  استاتور در هر لحظه برابر است با:

$$\Psi_a = L_{aa} i_a + L_{ab} (i_b + i_c) + L_{aA} [i_A \cos \theta + i_B \cos (\theta + 120^\circ) + i_C \cos (\theta - 120^\circ)] \quad (17-7)$$

که  $L_{aa}$ ، اندوکتانس خودی سیم پیچهای استاتور،  $L_{ab}$ ، اندوکتانس متقابل بین سیم پیچهای استاتور و  $L_{aA}$ ، حداکثر مقدار اندوکتانس متقابل بین سیم پیچهای استاتور و روتور است. معادلات مشابهی را می توان برای شار دور سیم پیچهای  $b$  و  $c$  استاتور نوشت. شار دور سیم پیچ فاز  $A$  روتور برابر است با:

$$\Psi_A = L_{AA} i_A + L_{AB} (i_B + i_C) + L_{aA} [i_a \cos \theta + i_b \cos (\theta - 120^\circ) + i_c \cos (\theta + 120^\circ)] \quad (18-7)$$

که روابط مشابهی را می توان برای  $\Psi_B$  و  $\Psi_C$  نوشت. در حالت متعادل داریم:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (19-7)$$

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

با فرض:

$$L_{ss} = L_{aa} - L_{ab} \quad (20-7)$$

$$L_{rr} = L_{AA} - L_{AB}$$

می توان روابط  $\Psi_a$  و  $\Psi_A$  را به صورت زیر نوشت:

$$\Psi_a = L_{ss} i_a + L_{aA} [i_A \cos \theta + i_B \cos (\theta + 120^\circ) + i_C \cos (\theta - 120^\circ)] \quad (21-7)$$

$$\Psi_A = L_{\sigma r} i_A + L_{\sigma A} [i_a \cos \theta + i_b \cos (\theta - 120^\circ) + i_c \cos (\theta + 120^\circ)] \quad (22-7)$$

## تبدیل dq

مشابه با ماشین سنکرون (فصل سوم، بخش ۳-۳)، معادلات فوق را می‌توان با تبدیل مناسب متغیرهای فاز به متغیرهای یک چارچوب چرخان ساده کرد. در حالت ماشین سنکرون، سرعت چارچوب چرخان را سرعت روتور اختیار نمودیم. در یک ماشین القایی، سرعت ارجح چارچوب مبنا، سرعت سنکرون است [۱۰ و ۱۱]. فرض می‌شود که در جهت حرکت، محور  $q$ ،  $90^\circ$  نسبت به محور  $d$ ، پیش‌فاز است. اگر محور  $d$  به گونه‌ای اختیار شود که بر محور فاز  $a$  در لحظه  $t=0$  منطبق شود، موقعیت آن نسبت به محور فاز  $a$  در هر لحظه زمان،  $\omega_s t$  است. تبدیل متغیرهای فاز استاتور به متغیرهای  $d$  و  $q$  به صورت زیر است:

$$i_{ds} = \frac{2}{3} [i_a \cos \omega_s t + i_b \cos (\omega_s t - 120^\circ) + i_c \cos (\omega_s t + 120^\circ)] \quad (23-7)$$

$$i_{qs} = -\frac{2}{3} [i_a \sin \omega_s t + i_b \sin (\omega_s t - 120^\circ) + i_c \sin (\omega_s t + 120^\circ)]$$

و عکس تبدیل به صورت زیر است:

$$i_a = i_{ds} \cos \omega_s t - i_{qs} \sin \omega_s t$$

$$i_b = i_{ds} \cos (\omega_s t - 120^\circ) - i_{qs} \sin (\omega_s t - 120^\circ) \quad (24-7)$$

$$i_c = i_{ds} \cos (\omega_s t + 120^\circ) - i_{qs} \sin (\omega_s t + 120^\circ)$$

تبدیل‌های مشابهی در مورد شاردهورها و ولتاژهای استاتور صادق است. اکنون تبدیلات لازم در خصوص کمیت‌های روتور را انجام می‌دهیم. اگر  $\theta_r$  زاویه‌ای باشد که محور  $d$  نسبت به محور فاز  $A$  روتور پیش‌فاز است و  $s$ ، لغزش روتور باشد، محور  $d$  نسبت به نقطه‌ای روی روتور با آهنگ تغییرات:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = p\theta_r = s\omega_s \quad (25-7)$$

پیش می‌افتد. تبدیل جریانهای روتور به مؤلفه‌های d و q به صورت زیر است:

$$i_{dr} = \frac{2}{3} \left[ i_A \cos \theta_r + i_B \cos (\theta_r - 120^\circ) + i_C \cos (\theta_r + 120^\circ) \right] \quad (26-7)$$

$$i_{qr} = -\frac{2}{3} \left[ i_A \sin \theta_r + i_B \sin (\theta_r - 120^\circ) + i_C \sin (\theta_r + 120^\circ) \right]$$

و عکس تبدیل به صورت زیر خواهد بود:

$$i_A = i_{dr} \cos \theta_r - i_{qr} \sin \theta_r$$

$$i_B = i_{dr} \cos (\theta_r - 120^\circ) - i_{qr} \sin (\theta_r - 120^\circ) \quad (27-7)$$

$$i_C = i_{dr} \cos (\theta_r + 120^\circ) - i_{qr} \sin (\theta_r + 120^\circ)$$

تبدیل‌های مشابهی در مورد شاردهای روتور و ولتاژهای روتور صادق است.

معادلات اساسی ماشین در چارچوب مبنای dq

از معادلات ۷-۱۴ و ۷-۲۵ داریم:

$$\theta = \omega_s t - \theta_r \quad (28-7)$$

از معادلات ۷-۲۱ و ۷-۲۲ می‌توان نشان داد که شاردهای استاتور و روتور را به صورت زیر می‌توان بر حسب مؤلفه‌های d و q بیان کرد.

شاردهای استاتور:

$$\psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (29-7)$$

$$\psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr}$$

شاردهای روتور:

$$\psi_{dr} = L_{rr} i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (30-7)$$

$$\psi_{qr} = L_{rr} i_{qr} + L_m i_{qs}$$

که  $L_m = \frac{3}{2} L_{\sigma A}$  است.



ولتاژهای استاتور بر حسب مؤلفه‌های  $d$  و  $q$  به صورت زیر است:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + p \Psi_{ds} \quad (31-7)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + p \Psi_{qs}$$

و ولتاژهای روتور:

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (p\theta_r) \Psi_{qr} + p \Psi_{dr} \quad (32-7)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (p\theta_r) \Psi_{dr} + p \Psi_{qr}$$

عبارت  $p\theta_r$  در معادله ۳۲-۷ سرعت زاویه‌ای لغزشی مطابق با رابطه زیر است:

$$p\theta_r = s\omega_s \quad (33-7)$$

که این رابطه، سرعت زاویه‌ای نسبی بین روتور و محورهای چارچوب مبنای  $dq$  را نشان می‌دهد.

بدین ترتیب، معادلات ماشین را در یک چارچوب مبنای  $dq$  با سرعت چرخشی سنکرون بیان نمودیم. در حالت عملکرد متعادل، امواج نیروی محرکه مغناطیسی روتور و استاتور با سرعت سنکرون حرکت می‌کنند. موج نیروی محرکه مغناطیسی حاصل از سیم‌پیچهای استاتور به دو مؤلفه نیروی محرکه مغناطیسی توزیع شده سینوسی که با سرعت سنکرون می‌چرخند، تجزیه می‌شود که اوج یکی بر محور  $d$  و اوج دیگری بر محور  $q$ ، منطبق است. بنابراین  $i_{ds}$  و  $i_{qs}$  نمایشگر جریانهایی هستند که از سیم‌پیچهای ساخگی که بر دو محور  $d$  و  $q$  قرار دارند و با سرعت سنکرون می‌چرخند، عبور می‌کنند. توجیه مشابهی را می‌توان در خصوص جریانهای  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  به کار برد.

از معادلات ۳۱-۷ و ۳۲-۷ مشاهده می‌کنیم که معادله هر ولتاژ از سه جمله تشکیل شده است: جمله افت ولتاژ  $Ri$ ، جمله گذرای  $p\Psi$  و جمله ولتاژ چرخشی. دو عبارت اول مشابه با هر سیم‌پیچ دیگر است. جمله‌های ولتاژ چرخشی مخصوص حالت خاص موجود است. جمله‌های  $\omega_s \Psi_{ds}$  و  $\omega_s \Psi_{qs}$  در معادلات ولتاژ استاتور نمایشگر ولتاژهایی است که به وسیله موج شاری که با سرعت سنکرون می‌چرخند، در سیم‌پیچهای ساکن، ایجاد می‌شود. به طور مشابه جمله‌های  $(p\theta_r) \Psi_{dr}$  و  $(p\theta_r) \Psi_{qr}$  در معادلات ولتاژ روتور، نمایشگر ولتاژهایی است که

در سیم پیچهای روتور، که با سرعت لغزشی ( $p\theta_r = sw_s$ ) نسبت به امواج شار چرخان با سرعت سنکرون، می چرخد، ایجاد می شود. در حالت موتوری،  $s$  و  $p\theta_r$  مثبت و در حالت ژنراتوری هر دو منفی هستند.

توان و گشتاور الکتریکی. توان ورودی لحظه‌ای به استاتور برابر است با:

$$p_s = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$$

رابطه فوق بر حسب مؤلفه‌های  $d$  و  $q$  به صورت زیر درمی آید:

$$p_s = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (34-7)$$

به طور مشابه، توان ورودی لحظه‌ای به روتور برابر است با:

$$p_r = \frac{3}{2} (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \quad (35-7)$$

گشتاور الکترومغناطیسی را می توان با تقسیم توان مربوط به ولتاژهای چرخشی بر سرعت محور بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه، به دست آورد. از معادله ۷-۳۲ جملات ولتاژ چرخشی مربوط به  $v_{qr}$  و  $v_{dr}$  به ترتیب  $-\psi_{qr}(p\theta_r)$  و  $\psi_{dr}(p\theta_r)$  است. با جایگزینی در معادله ۷-۳۵، توان مربوط به ولتاژ چرخشی برابر است با:

$$\frac{3}{2} (\psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr}) (p\theta_r)$$

سرعت روتور نسبت به محورهای  $d$  و  $q$  مساوی  $(2/p_r)(p\theta_r)$  است. بنابراین، گشتاور الکترومغناطیسی برابر است با:

$$T_e = \frac{3}{2} (\psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr}) \frac{p_r}{2} \quad (36-7)$$

معادله شتاب. گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد شده به وسیله موتور، بار مکانیکی را به حرکت در می آورد. اگر عدم تطابقی بین گشتاور الکتریکی الکترومغناطیسی و گشتاور مکانیکی بار ( $T_m$ ) وجود داشته باشد، اختلاف آنها، جرم روتور را شتاب می دهد. در نتیجه:

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (37-7)$$

که  $\omega_m$ ، سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه است و  $J$ ، گشتاور لختی مربوط به روتور و بار متصل به آن است. گشتاور بار با سرعت تغییر می‌کند. رابطه مرسوم مورد استفاده برای گشتاور بار به صورت زیر است:

$$T_m = T_r (\bar{\omega}_r)^m \quad (38-7)$$

که  $\bar{\omega}_r$ ، سرعت روتور در مبنای واحد و بر پایه سرعت سنکرون است. رابطه دیگری که اغلب استفاده می‌شود به شکل زیر است:

$$T_m = T_r [A\bar{\omega}_r^2 + B\bar{\omega}_r + C] \quad (39-7)$$

### ۷-۲-۲ مشخصه‌های حالت ماندگار

در وضعیت حالت ماندگار، جریانهای استاتور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$i_a = I_m \cos(\omega_s t + \alpha)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega_s t + \alpha - 120^\circ) \quad (40-7)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega_s t + \alpha + 120^\circ)$$

که  $\alpha$ ، زاویه فاز  $i_a$  نسبت به مبدأ زمان است. با اعمال تبدیل dq (معادله ۷-۲۳)، داریم:

$$i_{ds} = I_m \cos \alpha \quad (41-7)$$

$$i_{qs} = I_m \sin \alpha$$

بنابراین در وضعیت متعادل ماندگار، جریانهای استاتور چارچوب مبنای dq به صورت جریان مستقیم ظاهر می‌شوند. روابط مشابهی در مورد ولتاژهای استاتور و جریانهای روتور صادق است.

از معادله ۷-۲۴، جریان استاتور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} i_s = i_n &= i_{ds} \cos \omega_s t - i_{qs} \sin \omega_s t \\ &= i_{ds} \cos \omega_s t + i_{qs} \cos (\omega_s t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (42-7)$$

با استفاده از  $I_s$  به عنوان مقدار مؤثر جریان استاتور در مبنای واحد، معادله ۷-۴۲ را می‌توان به صورت فازوری زیر نوشت:

$$\tilde{I}_s = I_{ds} + jI_{qs} \quad (43-7)$$

که  $I_{ds} = i_{ds} / \sqrt{2}$  و  $I_{qs} = i_{qs} / \sqrt{2}$  است. به طور مشابه، می‌توان ولتاژهای فاز استاتور و جریانهای فاز روتور را به صورت زیر نوشت:

$$\tilde{V}_s = (v_{ds} + jv_{qs}) / \sqrt{2} \quad (44-7)$$

$$\tilde{I}_r = (i_{dr} + ji_{qr}) / \sqrt{2} \quad (45-7)$$

در حالت ماندگار، جمله  $p\psi$  در معادلات ۷-۳۱ و ۷-۳۲ حذف می‌شود. با جایگزینی شاردهورها از معادله ۷-۲۹ در معادله ۷-۳۱، می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} - \omega_s L_{ss} i_{qs} - \omega_s L_m i_{qr} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \omega_s L_{ss} i_{ds} + \omega_s L_m i_{dr} \end{aligned} \quad (46-7)$$

با توجه به معادلات ۷-۴۳ و ۷-۴۶ داریم:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_s &= R_s \tilde{I}_s + j\omega_s L_{ss} \tilde{I}_s + j\omega_s L_m \tilde{I}_r \\ &= R_s \tilde{I}_s + j\omega_s (L_{ss} - L_m) \tilde{I}_s + j\omega_s L_m (\tilde{I}_s + \tilde{I}_r) \\ &= R_s \tilde{I}_s + jX_s \tilde{I}_s + jX_m (\tilde{I}_s + \tilde{I}_r) \end{aligned} \quad (47-7)$$

که:

$$X_s = \omega_s (L_{ss} - L_m) \quad ; \quad \text{راکتانس نشتی استاتور؛}$$

و  $X_m = \omega_s L_m$  : راکتانس مغناطیس کننده؛

است. اگر روتور، اتصال کوتاه شده باشد،  $v_{dr} = v_{qr} = 0$  است. در نتیجه از معادلات ۷-۳۰، ۷-۳۲ و ۷-۳۳ داریم:

$$v_{dr} = 0 = R_r \dot{i}_{dr} - s\omega_s (L_{rr} \dot{i}_{qr} + L_m \dot{i}_{qs}) \quad (48-7)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r \dot{i}_{qr} + s\omega_s (L_{rr} \dot{i}_{dr} + L_m \dot{i}_{ds})$$

از معادلات ۷-۴۳، ۷-۴۵ و ۷-۴۸ می توان نوشت:

$$\tilde{V}_r = 0 = \frac{R_r}{s} \tilde{I}_r + j\omega_s L_{rr} \tilde{I}_r + j\omega_s L_m \tilde{I}_s \quad (49-7)$$

$$= \frac{R_r}{s} \tilde{I}_r + jX_r \tilde{I}_r + jX_m (\tilde{I}_s + \tilde{I}_r)$$

که:

$$X_r = \omega_s (L_{rr} - L_m) \quad \text{راکتانس نشتی روتور}$$

است.

#### مدار معادل

معادلات ۷-۴۷ و ۷-۴۹ نمایشگر عملکرد ماشین القایی در حالت ماندگار هستند. این معادلات مدار معادل تکفازی مطابق با شکل ۷-۷ را نتیجه می دهند. در مدار معادل، تمام کمیتها به طرف استاتور ارجاع داده شده است. جهت جریانهای نشان داده شده برای حالت موتور مثبت است که لغزش  $s$  در آن حالت نیز مثبت است.

توان انتقال یافته از طریق فاصله هوایی برابر است با:

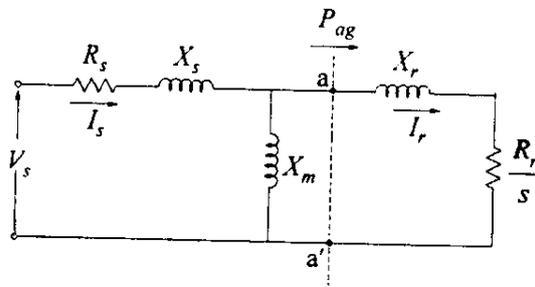
$$P_{ag} = \frac{R_r}{s} I_r^2 \quad (50-7)$$

و تلفات مقاومتی روتور برابر است با:

$$P_{lr} = R_r I_r^2 \quad (51-7)$$

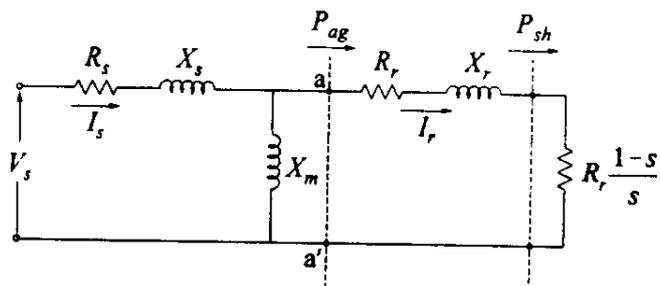
بنابراین، توان مکانیکی منتقل شده به محور برابر است با:

$$\begin{aligned}
 P_{sh} &= P_{ag} - P_{I_r} \\
 &= \frac{R_r}{s} I_r^2 - R_r I_r^2 \\
 &= R_r \frac{1-s}{s} I_r^2
 \end{aligned} \tag{۵۲-۷}$$



شکل ۷-۷ مدار معادل ماشین القایی سه فاز

مدار معادل دیگری که در آن توان روتور به تلفات مقاومتی و توان محور تفکیک می شود در شکل ۷-۸ نشان داده شده است.



شکل ۷-۸ صورت جایگزین مدار معادل ماشین القایی

مقادیر فوق، مقادیر بر مبنای یک فاز را نشان می‌دهند. در یک موتور سه فاز، گشتاور الکترو مغناطیسی موتور برابر است با:

$$T_e = \frac{3P_{sh}}{\omega_m}$$

که  $\omega_m$  سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}\omega_m &= \omega_r \frac{p_f}{p_r} \\ &= \omega_s (1-s) \frac{p_f}{p_r}\end{aligned}$$

بنابراین:

$$T_e = 3 \frac{p_f}{p_r} \frac{R_r}{s\omega_s} I_r^2 \quad (53-7)$$

که  $\omega_s = 2\pi f$  و  $p_f$ ، تعداد قطبهاست.

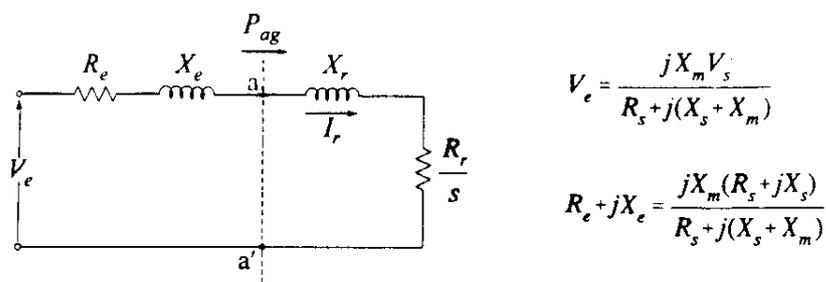
### مشخصه گشتاور - لغزش

گشتاور به لغزش وابسته است. برای به دست آوردن رابطه گشتاور - لغزش، مدار معادل شکل ۷-۷ را با جایگزینی بخشی که در سمت چپ گره‌های ساده  $a$  و  $a'$  قرار دارد با معادل تونن  $1$ ، ساده می‌کنیم. شکل ۹-۷ مدار معادل ساده شده حاصل را نشان می‌دهد. در این شکل جریان روتور برابر است با:

$$\tilde{I}_r = \frac{\tilde{V}_e}{(R_e + R_r/s) + j(X_e + X_r)} \quad (54-7)$$

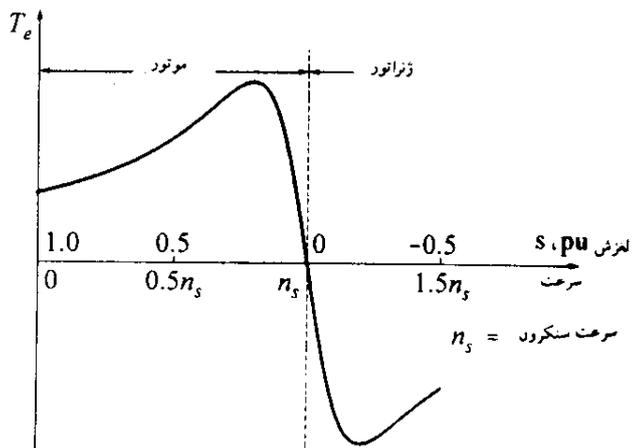
از معادله ۵۳-۷، گشتاور برابر است با:

$$T_e = 3 \frac{p_f}{p_r} \left[ \frac{R_r}{s\omega_s} \right] \frac{V_e^2}{(R_e + R_r/s)^2 + (X_e + X_r)^2} \quad (55-7)$$



شکل ۷-۹ مدار معادل مناسب برای محاسبه روابط گشتاور - لغزش

شکل ۷-۱۰ نمونه‌ای از رابطه بین گشتاور و لغزش (یا سرعت) را نشان می‌دهد. در حالت سکون (یعنی در شروع)، سرعت، صفر و لغزش مساوی ۱/۰ در مبنای واحد است. بین سرعت صفر و سرعت سنکرون، ماشین به صورت موتور عمل می‌کند. بالاتر از سرعت سنکرون، لغزش، منفی است و ماشین به صورت ژنراتور کار می‌کند.



شکل ۷-۱۰ مشخصه نوعی گشتاور - سرعت ماشین القایی

حداکثر گشتاور، زمانی رخ می‌دهد که داشته باشیم:

$$\frac{R_r}{s} = Z \quad (56-7)$$

که:

$$Z = \sqrt{R_e^2 + (X_e + X_r)^2} \quad (57-7)$$

بنابراین، لغزش در مبنای واحد در گشتاور حداکثر، برابر است با:

$$s_{Tmax} = \frac{R_r}{Z} \quad (58-7)$$

از معادله ۵۵-۷، گشتاور حداکثر مساوی است با:

$$\begin{aligned} T_{max} &= \frac{3}{\omega_s} \frac{P_r \cdot \frac{0.5 V_e^2}{R_e + Z}}{\omega_s} \\ &= \frac{3}{\omega_{ms}} \frac{0.5 V_e^2}{R_e + Z} \end{aligned} \quad (59-7)$$

که  $\omega_s = 2\pi f$  و  $\omega_{ms}$  سرعت سنکرون برحسب رادیان مکانیکی بر ثانیه است. از معادله ۵۸-۷ مشاهده می‌کنیم که لغزش در حداکثر گشتاور متناسب با مقاومت روتور ( $R_r$ ) است. اما از معادله ۵۹-۷ مشاهده می‌شود که مقدار حداکثر گشتاور مستقل از  $R_r$  است و عمدتاً از مقادیر راکتانسهای نشتی استاتور و روتور تأثیر می‌پذیرد.

#### تأثیر مقاومت روتور بر بازده

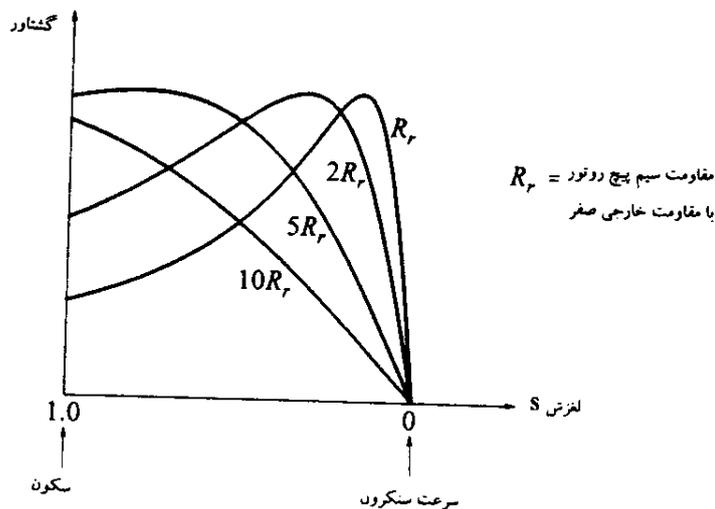
بازده موتور القایی از لغزش کاری آن شدت تأثیرپذیر است. اگر از تمام تلفات به جز تلفات مقاومتی روتور صرف‌نظر کنیم، بازده، مساوی یا نسبت توان مکانیکی منتقل شده به محور و توان فاصله‌هوائی است. بنابراین، با توجه به معادلات ۵۰-۷ و ۵۲-۷، بازده ایده‌آل برابر است با:

$$\eta = \frac{P_{sh}}{P_{ag}} \times 100 = 1 - s \quad \text{درصد} \quad (60-7)$$

از این رابطه مشخص است که برای داشتن بازده بالا، باید موتور با لغزش کم کار کند. از این رو بیشتر موتورهای القایی سه فاز به گونه‌ای طراحی می‌شوند که لغزش (در مبتای واحد) در بار کامل کمتر از ۰/۰۵ باشد. در موتورهای القایی بزرگ، حداکثر بازده ممکن است از ۹۵٪ هم بیشتر باشد.

### ۳-۲-۷ ساختارهای دیگر روتور

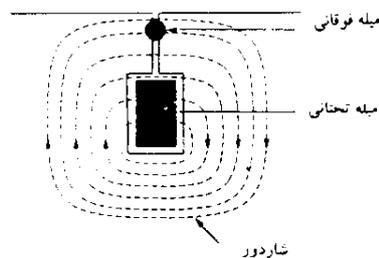
انتخاب مقداری مناسب برای مقاومت روتور موتور القایی از نظر طراحی دو جنبه دارد. از یک سو، بازده بالا در حالت عادی کاری، مستلزم داشتن مقاومت کم روتور است و از سوی دیگر برای داشتن گشتاور بالای راه‌اندازی و پایین نگه داشتن جریان راه‌اندازی و حفظ ضریب توان بالا در آن حالت، مقاومت روتور باید بزرگ باشد. استفاده از روتور سیم‌پیچی شده یکی از راههایی است که می‌تواند برای تأمین نیاز به مقادیر مختلف مقاومت روتور در شرایط مختلف، مطرح باشد. در راه‌اندازی، از طریق جاروبکها، مقاومتهایی به طور سری با سیم‌پیچهای روتور قرار می‌گیرد. زمانی که روتور سرعت گرفت، مقاومت خارجی کاهش می‌یابد. در حالت معمولی کار، مقاومت خارجی صفر می‌شود به گونه‌ای که لغزش در بار کامل، کوچک باشد. شکل ۷-۱۱



شکل ۷-۱۱ منحنی گشتاور - لغزش، بیانگر اثر مقاومت مدار روتور

تأثیر تغییر مقاومت روتور را بر گشتاور محور نشان می‌دهد. اما باید توجه کرد که موتورهای با روتور سیم‌پیچی شده از نوع قفس سنجایی گرانتر هستند.

می‌توان موتورهای قفس سنجایی خاصی ساخت که در راه‌اندازی دارای مقاومت مؤثر بالای روتور و در بار کامل دارای مقاومت کم روتور باشند. نوعی که اغلب مرسوم است و به موتور قفس سنجایی مضاعف<sup>۱</sup> موسوم است در شکل ۷-۱۲ نشان داده شده که از دو لایه میله‌های فلزی که از دو طرف به وسیله حلقه‌هایی به هم اتصال کوتاه شده‌اند، تشکیل شده است. میله‌های فوقانی دارای سطح مقطع کوچک و مقاومت بالا هستند و نزدیک سطح روتور واقع شده‌اند به گونه‌ای که شار ناشی، مسیری با مقاومت مغناطیسی بالا ببینند و در نتیجه اندوکتانس ناشی، کوچک باشد. میله‌های تحتانی دارای سطح مقطع بزرگتر، مقاومت کمتر و اندوکتانس ناشی بزرگتر هستند. در راه‌اندازی، فرکانس روتور بالاست و جریان بسیار کمی از میله‌های تحتانی عبور می‌کند و در نتیجه مقاومت مؤثر روتور، مقاومت نسبتاً بالای میله‌های فوقانی است. در حالت معمولی کار، راکتانس‌های ناشی قابل اغماض هستند و جریان روتور عمدتاً از میله‌های تحتانی مقاومت کم عبور می‌کند و مقاومت مؤثر، مساوی مقاومت بارها به طور موازی است.

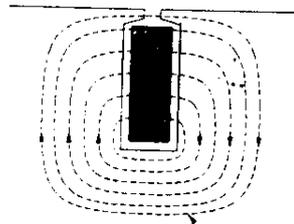


شکل ۷-۱۲ میله‌های مضاعف روتور قفس سنجایی

استفاده از میله‌های عمیق و باریک مطابق شکل ۷-۱۳، مشخصه گشتاور - سرعتی، مشابه

### 1. Double Squirrel Cage

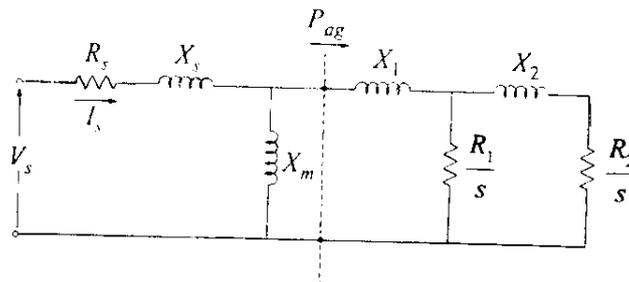
با روتور قفس سنجایی مضاعف ایجاد می‌کند. همچنان که از مسیرهای نشان داده شده شار مشخص است، اندوکتانس نشتی سطح مقطع قسمت فوقانی میله روتور، نسبتاً کم و رفته رفته به سمت پایین، مقدار آن افزایش می‌یابد. در راه اندازی، به علت فرکانس بالای روتور، جریان در زامهای فوقانی میله روتور متمرکز می‌شود. با شتاب گرفتن روتور و کاهش لغزش، توزیع جریان یکنواخت تر می‌شود. در حالت عادی کار، توزیع جریان تقریباً یکنواخت و مقاومت مؤثر، کم است.



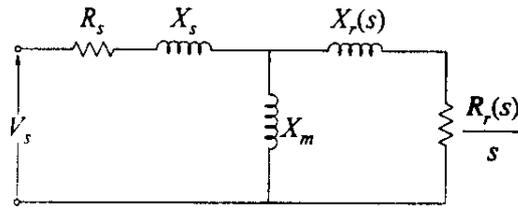
شار نشتی

شکل ۷-۱۳ ساختار روتور با میله عمیق

مدار معادل موتور قفس سنجایی با یک سیم پیچ روتور قبلاً در شکل ۷-۷ نشان داده شده بود. این مدار در شکل ۷-۱۴ برای موتور قفس سنجایی مضاعف تعمیم داده شده است. می‌توان مدار فوق را به صورت مدار شکل ۷-۱۵ ساده کرد که در آن پارامترهای روتور به صورت زیر به لغزش وابسته‌اند:



شکل ۷-۱۴ مدار معادل موتور القایی با روتور دو قفسی



شکل ۷-۱۵ نمایش مدار معادل تک روتوره موتوری با روتور دو قفسی یا روتوری با میله عمیق

$$R_r(s) = R_{r0} \frac{m^2 + ms^2 R_1/R_r}{m^2 + s^2} \quad (61-7)$$

$$X_r(s) = X_1 \frac{R_{r0} (mR_1/R_r)}{m^2 + s^2} \quad (62-7)$$

که:

$$R_{r0} = \frac{R_1 R_r}{R_1 + R_r} \quad (63-7)$$

$$m = \frac{R_1 + R_r}{X_r} \quad (64-7)$$

تأثیر میله عمیق و باریک (شکل ۷-۱۳) را می‌توان به صورت یک شبکه معادل نردبانی مدل کرد. اما در مطالعات سیستم، ارجح است که روتور را فقط با یک مدار که پارامترهای آن به صورت تابعی از لغزش تغییر می‌کنند (شکل ۷-۱۵)، نمایش داد. پارامترهای روتور را می‌توان براساس توزیع جریان گردابی در یک میله مستطیل شکل به صورت تابعی از لغزش بیان کرد

[۲۲]

$$R_r(s) = \frac{R_{r0}}{2} \frac{\beta (\sinh \beta + \sin \beta)}{(\cosh \beta - \cos \beta)} \quad (65-7)$$

$$X_r(s) = X_{r0} + \frac{R_{r0}}{2} \frac{\beta (\sinh \beta - \sin \beta)}{(\cosh \beta - \cos \beta)} \quad (66-7)$$

$$\beta = \sqrt{1s} B \quad (67-7)$$

که  $B$  ضریب عمق میله است که گشتاور راه‌اندازی موتور را تعیین می‌کند،  $X_{r0}$  راکتانس ناشی روتور است که مربوط به میله روتور نیست (به عنوان مثال راکتانس ناشی زیگزآگ) و  $R_{r0}$ ، مقاومت میله روتور در حال کار است.

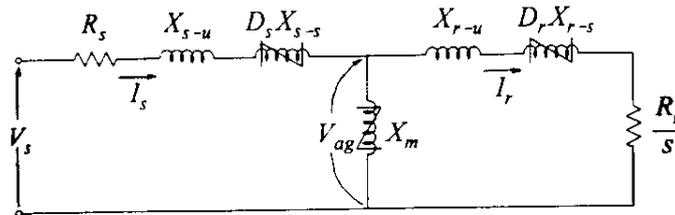
ضریب عمق میله، تابعی از فرکانس پایه، مقاومت مخصوص  $^1(\rho)$ ، عمق میله روتور ( $d$ ) و ضریب نفوذپذیری ( $\mu_0$ ) هوا به صورت زیر است:

$$B = 2d \sqrt{\mu_0 \omega_0 / (2\rho)}$$

در حالت حدی، اگر  $s$  به سمت صفر میل کند، مقاومت میله عمیق روتور مساوی  $R_{r0}$  خواهد بود.

#### ۷-۲-۴ نمایش اشباع

راکتانس مغناطیس کننده  $X_m$  با اشباع مغناطیسی تغییر می‌کند که آن را می‌توان به صورت تابعی از ولتاژ فاصله هوایی ( $V_{ag}$ ) مشابه آنچه در مورد ماشین سنکرون انجام شد، نمایش داد. موتورهای القایی معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌شوند که راکتانس ناشی آنها در سطوح بالای جریان، اشباع شود. این موضوع وجود گشتاور راه‌اندازی بالا را تضمین می‌کند. برای بررسی دقیق در وضعیتی که سطح جریان، زیاد است لازم است که تأثیر اشباع بر راکتانس ناشی را مطابق با شکل ۷-۱۶ نمایش داد. راکتانسهای ناشی استاتور و روتور به مؤلفه‌های اشباع شده ( $X_{s-u}$  و  $X_{r-u}$ ) و مؤلفه‌های اشباع نشده ( $X_{s-nu}$  و  $X_{r-nu}$ ) تفکیک می‌شوند. مؤلفه‌های اشباع شده راکتانسها، نمایشگر شار ناشی هستند که در لبه دندانه‌های شکافها متمرکز است و میدان مغناطیسی را در دهانه شکاف اشباع و محدود می‌سازد [۱۲]. مؤلفه‌های اشباع نشده، نمایشگر نشت انتهایی و نشت پیرامونی هستند.



شکل ۷-۱۶ مدار معادل موتور القایی شامل تأثیرات اشباع مغناطیسی

اشباع راکتانس ناشی بستگی به جریان دارد. مقدار حدی جریان ( $I_{sat}$ ) که در آن اشباع شروع می‌شود به طور نوعی در بازه  $1/3$  تا  $3/0$  در مبنای واحد است. اشباع راکتانسهای ناشی از جریان  $I$  را می‌توان به صورت توابع توصیف کننده<sup>۱</sup> زیر [۵ و ۱۲] بیان کرد:

$$D = 1/0, \quad \text{برای } I \leq I_{sat}$$

$$D = \frac{\gamma}{\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \right) + \gamma \sqrt{1-\gamma^2} \right], \quad \text{برای } I > I_{sat} \quad (68-7)$$

که:

$$\gamma = \frac{I_{sat}}{I} = \frac{\text{جریانی که در آن اشباع شروع می‌شود}}{\text{جریان اندوکتانس ناشی}}$$

### ۷-۲-۵ نمایش در مبنای واحد

مشابه آنچه که در مورد ماشین سنکرون انجام شد (به بخش ۳-۴ از فصل سوم مراجعه کنید)، کمیت‌های پایه زیر را برای استاتور انتخاب می‌کنیم:

$$V = V_{a \text{ base}} = \text{مقدار اوج ولتاژ نامی فاز، } V$$

$$I = I_{a \text{ base}} = \text{مقدار اوج جریان نامی فاز، } A$$

$$f_{s\text{base}} = \text{فرکانس نامی، Hz} ;$$

مقادیر پایه سایر کمیتها به طور خودکار به صورت زیر تعیین می شود:

$$\omega_{\text{base}} = 2\pi f_{\text{base}} \text{ , rad/s , الکتریکی}$$

$$\omega_{m\text{base}} = \omega_{\text{base}} (2/p_f) \text{ , rad/s , مکانیکی}$$

$$Z_{s\text{base}} = v_{s\text{base}} / i_{s\text{base}} \text{ , } \Omega$$

$$L_{s\text{base}} = v_{s\text{base}} / (i_{s\text{base}} \omega_{\text{base}}) \text{ , H}$$

$$\Psi_{s\text{base}} = v_{s\text{base}} / \omega_{\text{base}} \text{ , ویر-دور}$$

$$VA_{\text{base}} = 3/2 (v_{s\text{base}} i_{s\text{base}}) \text{ , VA سه فاز}$$

$$\text{گشتاور پایه} = 3/2 (p_f/2) \Psi_{s\text{base}} i_{s\text{base}} \text{ , N.m}$$

که اگر کمیتهای روتور را هم به طرف استاتور ارجاع دهیم، مقادیر پایه فوق در مورد روتور هم صادق است.

از معادله ۷-۳۱ داریم:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + p \Psi_{ds}$$

با تقسیم طرفین بر  $v_{s\text{base}}$  و با توجه به اینکه  $v_{s\text{base}} = Z_{s\text{base}} i_{s\text{base}} = \omega_{\text{base}} \Psi_{s\text{base}}$  داریم:

$$\frac{v_{ds}}{v_{s\text{base}}} = \frac{R_s}{Z_{s\text{base}}} \frac{i_{ds}}{i_{s\text{base}}} - \frac{\omega_s}{\omega_{\text{base}}} \frac{\Psi_{qs}}{\Psi_{s\text{base}}} + p \left[ \frac{1}{\omega_{\text{base}}} \frac{\Psi_{ds}}{\Psi_{s\text{base}}} \right]$$

که در نمایش در مبنای واحد:

$$\bar{v}_{ds} = \bar{R}_s \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_s \bar{\Psi}_{qs} + \bar{p} \bar{\Psi}_{ds} \quad (69-7)$$

و به طور مشابه:

$$\bar{v}_{qs} = \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_s \bar{\Psi}_{ds} + \bar{p} \bar{\Psi}_{qs} \quad (70-7)$$

با استفاده از همان روش، معادله ۷-۳۲ در مبنای واحد به شکل زیر خواهد شد:

$$\bar{v}_{dr} = \bar{R}_r \bar{i}_{dr} - (\bar{p}\theta_r) \bar{\Psi}_{qr} + \bar{p}\bar{\Psi}_{dr} \quad (71-7)$$

$$\bar{v}_{qr} = \bar{R}_r \bar{i}_{qr} + (\bar{p}\theta_r) \bar{\Psi}_{dr} + \bar{p}\bar{\Psi}_{qr} \quad (72-7)$$

که:

$$\bar{p}\theta_r = \frac{1}{\omega_{base}} (p\theta_r) = s\bar{\omega}_s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (73-7)$$

اگر معادلات ۷-۲۹ و ۷-۳۰ را بر  $\Psi_{s\ base} = L_{s\ base} i_{s\ base}$  تقسیم کنیم، می توان معادلات شاردر در مبنای واحد را به صورت زیر نوشت:

$$\bar{\Psi}_{ds} = \bar{L}_{ss} \bar{i}_{ds} + \bar{L}_m \bar{i}_{dr} \quad (74-7)$$

$$\bar{\Psi}_{qs} = \bar{L}_{ss} \bar{i}_{qs} + \bar{L}_m \bar{i}_{qr} \quad (75-7)$$

$$\bar{\Psi}_{dr} = \bar{L}_{rr} \bar{i}_{dr} + \bar{L}_m \bar{i}_{ds} \quad (76-7)$$

$$\bar{\Psi}_{qr} = \bar{L}_{rr} \bar{i}_{qr} + \bar{L}_m \bar{i}_{qs} \quad (77-7)$$

با تقسیم طرفین معادله ۷-۳۶ بر  $(p_f/2)$  داریم  $T_{base} = 3/2 (\Psi_{s\ base} i_{s\ base}) (p_f/2)$

$$\frac{T_e}{T_{base}} = \frac{3/2 (\Psi_{qr} i_{dr} - \Psi_{dr} i_{qr}) (p_f/2)}{3/2 (\Psi_{s\ base} i_{s\ base}) (p_f/2)}$$

یا:

$$\bar{T}_e = \bar{\Psi}_{qr} \bar{i}_{dr} - \bar{\Psi}_{dr} \bar{i}_{qr} \quad (78-7)$$

و با تقسیم معادله ۷-۳۷ بر  $T_{base} = VA_{base}/\omega_{m\ base}$  خواهیم داشت:

$$\frac{T_e}{T_{base}} - \frac{T_m}{T_{base}} = J \left[ \frac{\omega_{m\ base}}{VA_{base}} \right] \omega_{m\ base} p \left[ \frac{\omega_m}{\omega_{m\ base}} \right]$$

یا:

$$p(\bar{\omega}_r) = \frac{1}{\gamma H} (\bar{T}_e - \bar{T}_m)$$

یا:

$$\bar{p}(\omega_r) = \frac{1}{\sqrt{2}H\omega_{base}} (\bar{T}_e - \bar{T}_m) \quad (۷۹-۷)$$

که:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{J\omega_{m base}^2}{VA_{base}}$$

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{m base}} = \frac{\omega_r/p_f}{\omega_{base}/p_f} = \frac{\omega_r}{\omega_{base}}$$

پارامتر  $H$ ، ثابت لختی ترکیبی موتور و بار مکانیکی است. با تقسیم طرفین معادله ۷-۳۸ بر  $T_{base}$ ، به رابطه زیر برای گشتاور بار در مبنای واحد

می‌رسیم:

$$\frac{T_m}{T_{base}} = \frac{T_e}{T_{base}} (\bar{\omega}_r)^m$$

یا:

$$\bar{T}_m = \bar{T}_e (\bar{\omega}_r)^m \quad (۸۰-۷)$$

به طور مشابه، معادله ۷-۳۹ در مبنای واحد به صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{T}_m = \bar{T}_e [A\bar{\omega}_r^2 + B\bar{\omega}_r + C] \quad (۸۱-۷)$$

معادلات ۷-۶۹ تا ۷-۸۱ معادلات دینامیکی موتور القایی را در مبنای واحد نشان می‌دهند. مشتق زمانی  $\bar{p}$  در مبنای واحد که در معادلات فوق آمده با مشتق زمانی که  $t$  برحسب ثانیه بیان شود، به صورت زیر رابطه دارد:

$$\bar{p} = \frac{d}{dt} = \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} = \frac{1}{\omega_{base}} p$$

برای معرفی معادلات در مبنای واحد از بالانویس - برای نمایش کمیت‌های در مبنای واحد استفاده شد. تحلیلهای دیگر ماشین القایی در این کتاب همه برحسب مبنای واحد است ولی به منظور سهولت بالانویس فوق را حذف می‌کنیم.

## ۷-۲-۶ نمایش در مطالعات پایداری

در مطالعات پایداری از جمله‌های  $p\Psi_{qs}$  و  $p\Psi_{ds}$  در معادلات ۷-۶۹ و ۷-۷۰ چشمپوشی می‌شود. این جمله‌ها تأثیر گذرای استاتور را نشان می‌دهند و چشمپوشی از آنها معادل با صرف‌نظر کردن از مؤلفه جریان مستقیم در جریانهای گذرای استاتور است و به این ترتیب فقط مؤلفه‌های فوکانس اصلی، نمایش داده می‌شوند. همچنان که در مورد ماشین سنکرون مطرح شد، این ساده‌سازی ضروری است تا از سازگاری با مدل‌های مورد استفاده سایر اجزای شبکه بخصوص شبکه انتقال، اطمینان حاصل شود (به بخش ۵-۱-۱ از فصل پنجم مراجعه شود). با چشمپوشی از آثار گذرای استاتور و در حالی که سیم‌پیچهای روتور اتصال کوتاه شده‌اند، معادلات الکتریکی موتور القایی در مبنای واحد به صورت زیر خلاصه می‌شود:

معادلات ولتاژ استاتور:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} \quad (۸۲-۷)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} \quad (۸۳-۷)$$

معادلات ولتاژ روتور:

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - p\theta_r \Psi_{qr} + p\Psi_{dr} \quad (۸۴-۷)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + p\theta_r \Psi_{dr} + p\Psi_{qr} \quad (۸۵-۷)$$

معادلات شار دور:

$$\Psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (۸۶-۷)$$

$$\Psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (۸۷-۷)$$

$$\Psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_{rr} i_{dr} \quad (۸۸-۷)$$

$$\Psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_{rr} i_{qr} \quad (۸۹-۷)$$

که:

$$L_{ss} = L_s + L_m \quad \text{و} \quad L_{rr} = L_r + L_m$$

و  $L_s$  و  $L_r$  اندوکتانسهای ناشی استاتور و روتور در مبنای واحد هستند. معادلات فوق، موتوری را با فقط یک سیم پیچ روتور توصیف می کند. همچنانکه قبلاً ذکر شد، در حالت روتور قفس سنجابی مضاعف یا روتور با میله های عمیق و باریک، می توان مدار معادلی با یک سیم پیچ روتور به دست آورد که پارامترهای آن با لغزش تغییر می کند. به منظور بکارگیری معادلات در مطالعات و برنامه های پایداری، با حذف جریانهای روتور و بیان رابطه بین ولتاژ و جریان استاتور برحسب یک ولتاژ متصل به یک راکتانس گذرا (در معادلات ۷-۸۲ تا ۷-۸۹)، به صورت زیر به هدف مطلوب می رسیم. از معادله ۷-۸۸ داریم:

$$i_{dr} = \frac{\Psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_{rr}} \quad (90-7)$$

که با جایگزینی در معادله ۷-۸۶، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= L_{ss} i_{ds} + \frac{L_m (\Psi_{dr} - L_m i_{ds})}{L_{rr}} \\ &= \frac{L_m}{L_{rr}} \Psi_{dr} + \left[ L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right] i_{ds} \end{aligned} \quad (91-7)$$

به طور مشابه، از معادلات ۷-۸۷ و ۷-۸۹ داریم:

$$\Psi_{qs} = \frac{L_m}{L_{rr}} \Psi_{dr} + \left[ L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right] i_{qs} \quad (92-7)$$

با جایگزینی از رابطه فوق به جای  $\Psi_{qs}$  در معادله ۷-۸۲ خواهیم داشت:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - X'_s i_{qs} + v'_d \quad (93-7)$$

و به طور مشابه، جایگزینی  $\Psi_{ds}$  در معادله ۷-۸۳ نتیجه می دهد که:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + X'_s i_{ds} + v'_q \quad (94-7)$$

که:

$$v'_d = -\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \Psi_{qr} \quad (95-7)$$

$$v'_q = \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \Psi_{dr} \quad (96-7)$$

$$X'_s = \omega_s \left[ L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right] \quad (97-7)$$

که راکتانس  $X'_s$ ، راکتانس گذرای ماشین القایی است.

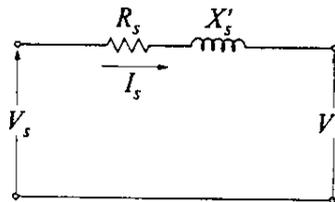
معادلات ولتاژ استاتور را می‌توان ترکیب و به صورت فازوری زیر بیان کرد:

$$v_{ds} + jv_{qs} = (R_s + jX'_s) (i_{ds} + ji_{qs}) + (v'_d + jv'_q)$$

با توجه به اینکه در مبنای واحد، مقادیر مؤثر و اوج با هم برابرند، رابطه فوق را میتوان به صورت زیر بیان نمود:

$$\tilde{V}_s = (R_s + jX'_s) \tilde{I}_s + \tilde{V}' \quad (98-7)$$

از این معادله، مشخص است که می‌توان ماشین القایی را با مدار معادل ساده شکل ۱۷-۷ یکی دانست.



$$V_s = \text{ولتاژ پایانه استاتور}$$

$$V' = \text{ولتاژ قبل از امپدانس گذرا}$$

شکل ۱۷-۷ مدار معادل گذرای ماشین القایی

با حذف جریانهای روتور و بیان شاردهورهای روتور برحسب  $v'_d$  و  $v'_q$ ، معادلات ۷-۸۴ و

۷-۸۵ را می‌توان به صورت ذیل نوشت:

$$p(v'_d) = -\frac{1}{T'_d} [v'_d + (X_s - X'_s) i_{qs}] + p\theta_e v'_q \quad (99-7)$$

$$p(v'_q) = -\frac{1}{T'_r} [v'_q - (X_s - X'_s) i_{ds}] - p\theta_r v'_d \quad (100-7)$$

که:

$$T'_r = \frac{L_r + L_m}{R_r} = \frac{L_{rr}}{R_r} \quad (101-7)$$

$$X_s = \omega_s (L_s + L_m) = \omega_s L_{ss} \quad (102-7)$$

$$p\theta_r = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (103-7)$$

$T'_r$ ، ثابت زمانی گذرای مدار باز ماشین القایی است و زمانی که استاتور، مدار باز شود، میرایی عکس‌العملهای گذرای روتور را نشان می‌دهد. در معادلات فوق،  $p$  علامت مشتق زمانی در مبنای واحد است (یعنی  $t$  برحسب رادیان است). در مطالعات سیستم معمولاً ترجیح می‌دهیم که  $t$  برحسب ثانیه باشد. معادلات فوق برای زمانی که  $t$  و ثابت زمانی  $T'_r$  برحسب ثانیه بیان شوند هم صادق است. در این حالت  $p\theta_r$  سرعت لغزشی برحسب رادیان برثانیه است. معادلات ۷-۹۹ و ۷-۱۰۰ بیانگر دینامیک مدار روتور هستند. معادله شتاب روتور، زمانی که  $t$  برحسب ثانیه بیان شود به صورت زیر است:

$$p(\bar{\omega}_r) = \frac{1}{\gamma H} (T_e - T_m) \quad (104-7)$$

از معادله ۷-۷۸، گشتاور الکترومغناطیسی در مبنای واحد برابر است با:

$$T_e = \Psi_{qr} i_{dr} - \Psi_{dr} i_{qr}$$

با بیان جریانهای روتور برحسب جریانهای استاتور و شاردهای روتور (معادله ۷-۹۰)، داریم:

$$\begin{aligned} T_e &= \Psi_{qr} \left[ \frac{\Psi_{dr} - L_m i_{dr}}{L_{rr}} \right] - \Psi_{dr} \left[ \frac{\Psi_{qr} - L_m i_{qs}}{L_{rr}} \right] \\ &= -\Psi_{qr} \left[ \frac{L_m}{L_{rr}} \right] i_{ds} + \Psi_{dr} \left[ \frac{L_m}{L_{rr}} \right] i_{qs} \\ &= \frac{v'_d i_{ds} + v'_q i_{qs}}{\omega_s} \end{aligned}$$

اگر  $\omega_s = 1/0$  pu باشد:

$$T_e = V_d' i_{ds} + V_q' i_{qs} \quad (105-7)$$

گشتاور بار  $T_m$  (که در حل معادله ۷-۱۰۴ لازم است) از معادله ۷-۸۰ یا ۷-۸۱ تعیین می‌شود. در معادلات ۷-۹۹ و ۷-۱۰۰، عبارت  $s\omega_s = p\theta_r$  نمایشگر سرعت زاویه‌ای بین روتور و چارچوب مبنایی (dq) است که با سرعت سنکرون  $\omega_s$  می‌چرخد. زمانی که  $\omega_r$  تغییر کند،  $s\omega_s$  مساوی با  $\omega_s - \omega_r$  محاسبه می‌شود.

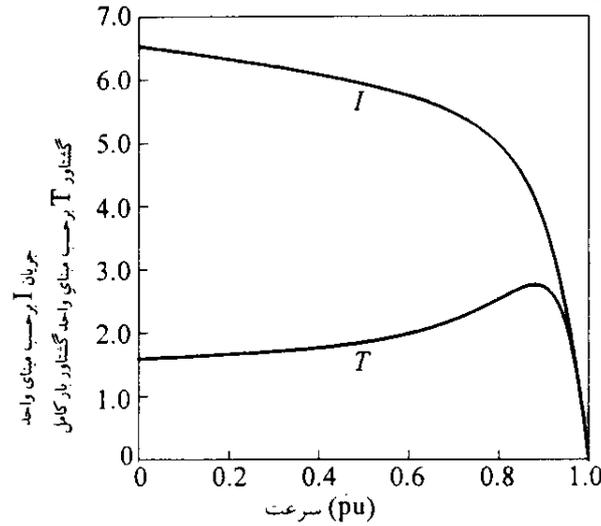
در معادلات فوق مربوط به ماشین القایی، لغزش روتور نسبت به میدان استاتور به طور مشخص ظاهر نشد. در طی نوسانهای الکترومغناطیسی سیستم، فرکانس ولتاژها و جریانهای استاتور از فرکانس سنکرون  $\omega_s$  منحرف می‌شود که در نتیجه به صورت نوسانهایی در  $v_{ds}$ ،  $v_{qs}$ ،  $i_{ds}$  و  $i_{qs}$  تأثیر می‌گذارد. اگر تغییرات گذرای لغزش مورد نیاز باشد، لازم است که میزان تغییر زاویه ولتاژ استاتور را به منظور مشخص کردن سرعت زاویه‌ای میدان استاتور، محاسبه نمود.

#### مدل ساده شده ماشین القایی

در بسیاری حالات، بخصوص زمانی که موتورهای کوچک مطرح است، نیازی به احتساب دینامیک مربوط به مدارهای الکتریکی روتور نیست. در چنین حالتی، فرض می‌شود که دینامیک مدار روتور بسیار سریع است (یعنی  $T_r'$  بسیار کوچک است) و در معادلات ۷-۹۹ و ۷-۱۰۰،  $p(v_q')$  و  $p(v_d')$  صفر هستند. با چنین فرضی، نمایش ماشین القایی شبیه حالت ماندگار آن در شکل ۷-۹ و رابطه گشتاور - لغزش مطابق با معادله ۷-۵۵ خواهد بود.

#### پارامترهای موتور القایی

پارامترهای مدار معادل یک موتور القایی از داده‌های طراحی آن به دست می‌آید. اگر این داده‌ها بسهولة در دسترس نباشد می‌توان آنها را با استفاده از روشهای استاندارد مرجع ۱۳ به دست آورد. شکل ۷-۱۸ اطلاعاتی را به صورت نمونه برای موتوری القایی قفس سنجابی مضاعف ۱۵۰ اسب بخار و مشخصه‌های گشتاور و جریان آن نمایش می‌دهد.



داده‌های مشخصه موتور

۰/۹۱۵۱	=	بازده بار کامل
۰/۸۸۹۵	=	ضریب توان بار کامل
۰/۰۱۶۶	=	لغزش بار کامل
۲/۵۹۴	=	تلفات بی‌باری (kW)
۶/۴۹۶۱	=	جریان راه‌اندازی (pu)
۱/۵۹۲۱	=	نسبت گشتاور راه‌اندازی
۲/۶۵۰	=	گشتاور کششی
۰/۰۹۱۴	=	لغزش کششی
۱۳۷/۰	=	ظرفیت kVA
۴۰۰	=	ولتاژ نامی (V)
۱۹۸	=	جریان نامی (A)

پارامترهای مدار معادل برحسب مبنای واحد ۱۳۷ kVA و ۴۰۰ V

$R_s = 0.0425$	$X_{s-u} = 0.0425$	$X_{s-s} = 0.0425$	$X_m = 2/9745$
$R_r = 0.0739$	$X_{r-u} = 0.0329$	$X_{r-s} = 0.0329$	$R_f = 0.0249$
$X_f = 0.0739$	$H = 0.6$	$I_{sat s} = 3/0$	$I_{sat r} = 3/0$

نمای گشتاور بار  $m = 2/0$

(برای تعریف پارامترها، به شکل‌های ۷-۱۴ و ۷-۱۶ مراجعه کنید)

شکل ۷-۱۸ داده‌های نوعی موتور القایی دو قفسی ۱۵۰ HP

### ۷-۳ مدل موتور سنکرون

یک موتور سنکرون مشابه یک ژنراتور سنکرون (فصل سوم تا پنجم) مدلسازی می‌شود. تنها تفاوت این است که به جای چرخاننده که ژنراتور را می‌چرخاند، موتور، یک بار مکانیکی را می‌چرخاند. مشابه با موتور القایی، رابطه مرسوم گشتاور بار به صورت زیر است:

$$T_m = T_e (\omega_r)^m \quad (7-106)$$

و معادله شتاب روتور به صورت زیر است:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - T_m) \quad (7-107)$$

که  $H$ ، ثابت لختی ترکیبی موتور و بار است. اطلاعات مربوط به موتور سنکرون با اطلاعات ژنراتور سنکرون یکسان است بجز در خصوص نمای  $m$  در مورد مشخصه بار که متفاوت است.

### ۷-۴ به دست آوردن پارامترهای مدل بار

دو روش کلی در تعیین مشخصه‌های بار سیستم وجود دارد:

- روش مبتنی بر آزمایش؛
- روش مبتنی بر مشخصه مؤلفه‌های تشکیل دهنده بار.

#### ۷-۴-۱ روش مبتنی بر آزمایش

در این روش، مشخصه‌های بار در پُستها و فیدرهای مشخص در زمانهای خاصی از روز و فصل، اندازه‌گیری می‌شود. از این اطلاعات برای برون‌یابی<sup>۱</sup> پارامترهای بار در سرتاسر سیستم استفاده می‌شود. مراجع ۱۴ و ۱۵ مدل‌های به دست آمده بار را از آزمایشهای مرحله‌ای نشان می‌دهند و مرجع شماره ۱۶، مدل‌های به دست آمده از عملکرد گذرای سیستم را نشان می‌دهد. مرجع ۳ روش جایگزینی را مطرح می‌کند که در آن مشخصه‌های بار به طور پیوسته از تغییراتی که به طور طبیعی در سیستم رخ می‌دهد، ارزیابی می‌شود.

1. Extrapolate

### مشخصه حالت ماندگار بار - ولتاژ

معمولاً مشخصه‌های بار را در بالاترین ولتاژی که می‌توان مقدار آن را برای باری به صورت شعاعی متصل شده و به کمک تغییردهنده‌های تپ ترانسفورمر تغییر داد، اندازه می‌گیرند. معمولاً، این حد ولتاژ، بالاترین سطح ولتاژ سیستم توزیع است. با تغییر دادن ولتاژ بار از طریق تغییردهنده‌های تپ ترانسفورمر و بالا و پایین مقدار اسمی، مشخصه‌های حالت ماندگار بار را می‌توان تعیین کرد. برای کسب نتایج با معنی، باید وضعیت تغییردهنده‌های تپ توزیع و خازنهای موجود را ثابت نگاه داشت. عکس‌العملهای اندازه‌گیری شده ولتاژ، توان حقیقی و توان راکتیو را با عبارات چند جمله‌ای و یا توانی، برازش منحنی<sup>۱</sup> می‌نمایند (معادلات ۱-۷، ۲-۷ یا ۵-۷).

### مشخصه حالت ماندگار بار - فرکانس

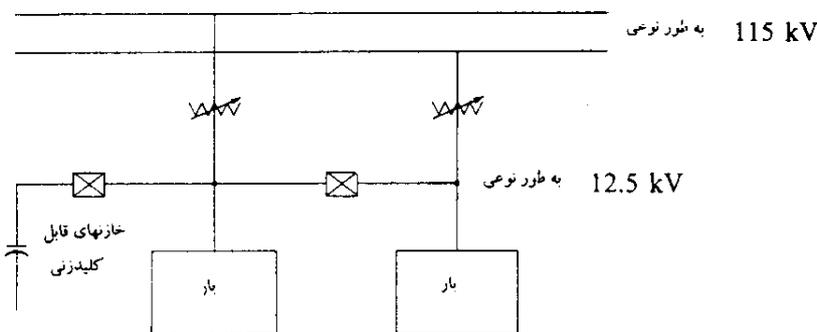
معمولاً بسیار مشکلتر است که مشخصه حالت ماندگار بار - فرکانس را تعیین کرد، زیرا برای اندازه‌گیری مشخصه ترکیب بار - فرکانس، باید یک سیستم منفک را تشکیل داد و فرکانس را در بازه مورد نظر تغییر داد. به منظور صحت داده‌ها، باید دقت کرد که تأثیر تغییرات ولتاژ و تغییرات فرکانس از هم جدا شود. در بسیاری از تحقیقات انجام یافته، این موضوع رعایت نشده و مشخصه  $dp/df$  تعیین شده، ترکیبی از تأثیر تغییر فرکانس و تغییر ولتاژ حاصل است.

### مشخصه دینامیکی بار - ولتاژ

با استفاده از آزمایشهای ساده‌ای می‌توان تقریباً به‌سبب سهولت مشخصه دینامیکی اغتشاش کوچک بارهای ترکیبی را تعیین کرد. شکل ۷-۱۹ نحوه انجام آزمایش را برای حالتی که بارها از دو ترانسفورمر دارای تغییردهنده تپ، تغذیه شده‌اند، نشان می‌دهد.

در ابتدا، تغییردهنده تپ یک ترانسفورمر را به سمت بالا و دیگری را به سمت پایین حرکت می‌دهیم به گونه‌ای که ولتاژ بار، ثابت بماند. پس از آن، یکی از ترانسفورمرها را از مدار خارج می‌کنیم. این موضوع باعث می‌شود که نه تنها دامنه ولتاژ بلکه زاویه لحظه‌ای در شین بار تغییر

نماید. با تغییر وضعیت‌های اولیه تپ‌ها، می‌توان محدوده‌ای از تغییرات ولتاژ را در دو جهت مثبت و منفی ایجاد کرد. با انتخاب مناسب موقعیت تپ‌ها، حتی می‌توان در وضعیتی که تغییر ولتاژ بسیار کم است تغییر زاویه ایجاد کرد. این موضوع در جداسازی تأثیر دامنه ولتاژ و تغییر زاویه مؤثر است.

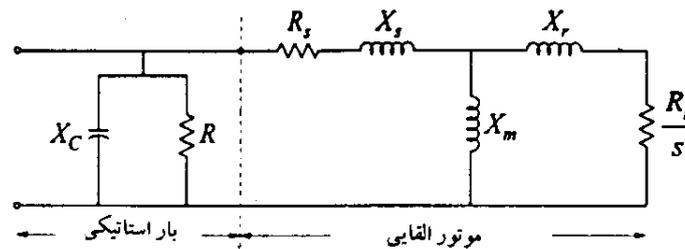


شکل ۷-۱۹ ترکیب نوعی پست برای آزمایش مشخصه‌های بار

اگر یک مجموعه خازنی در شین بار وجود داشته باشد، می‌توان آنرا به مدار وارد یا از آن خارج کرد تا در محل بار، تغییر دامنه ولتاژی بدون تغییر زاویه آن ایجاد شود. عکس‌العملهایی که به اینگونه به دست می‌آیند عملاً عکس‌العملهای دینامیکی سیگنال کوچک است. مرجع ۱۴ مدل‌های باری را که بدین ترتیب در شرکت انتاریو هیدرو (کانادا) به دست آمده بیان کرده است. عکس‌العملهای اندازه‌گیری شده زمانی از دامنه ولتاژ، زاویه، توان حقیقی و توان راکتیو بار برای تعیین پارامترهای مدلی که در شکل ۷-۲۰ نشان داده شده، مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل فرض می‌شود که بار ترکیبی را می‌توان به صورت یک موتور القایی و یک بار استاتیکی موازی بیان نمود.

برای بهینه‌سازی تطابق بین عکس‌العملهای اندازه‌گیری شده و مدل (با تغییر پارامترهای آن) از روش حداقل مربعات استفاده شده است. از آنجا که ساختار استفاده شده، مدل مناسب و واقعی بار است، احتمالاً استفاده از آن در حالت سیگنال بزرگ هم نتایج منطقی را به دست می‌دهد. در همان مرجع با استفاده از عکس‌العملهای اندازه‌گیری شده سیستم هنگام تغییرات و

اغتشاشهای طبیعی سیستم، مدل‌های به دست آمده سیگنال بزرگ برای بارهای صنعتی بیان شده است.



شکل ۷-۲۰ معادل ترکیبی موتور القایی و یا بار استاتیکی برای نمایش بار صنعتی

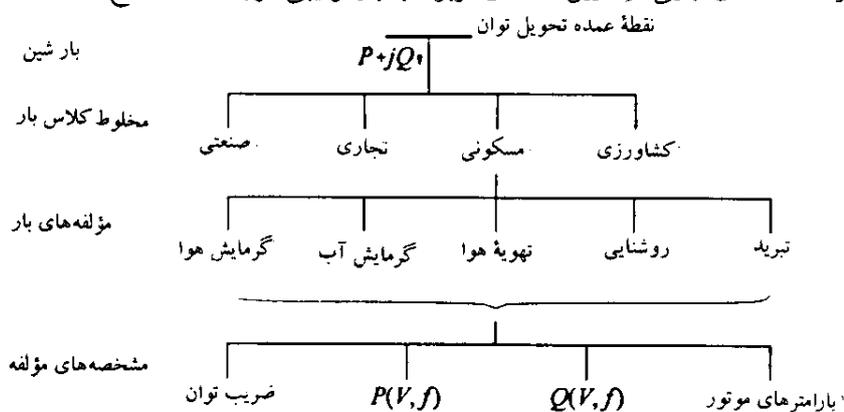
مرجع ۱۵ مدل‌های به دست آمده از آزمایشهای مرحله‌ای را بر سیستمهای کمکی<sup>۱</sup> نیروگاه و در نقاط عمده مصرف (هم صنعتی و هم مسکونی) در انگلستان بیان نموده است. مدل حاصل، از یک امپدانس استاتیکی ثابت به طور موازی با یک موتور القایی دارای یک مدار روتور، تشکیل شده است. بعلاوه جهت احتساب تأثیر مربوط به مشخصه‌های اشباع موتورها و ترانسفورمرها، یک راکتانس موازی غیرخطی اضافه شده است.

#### ۷-۴-۲ روش مبتنی بر مشخصه مؤلفه‌های تشکیل دهنده بار

این روش به وسیله مؤسسه ایپری<sup>۲</sup> طی چندین پروژه از سال ۱۹۷۶ میلادی مطرح شد [۱۶] تا [۱۹]. اساس مدل بار در این روش استفاده از اطلاعات مربوط به اجزای تشکیل دهنده بار مطابق با شکل ۷-۲۱ است. در یک نقطه عمده مصرف، بار به انواع مختلف از قبیل مسکونی<sup>۳</sup>، تجاری<sup>۴</sup>، صنعتی<sup>۵</sup>، کشاورزی<sup>۶</sup> و معدنی<sup>۷</sup> تقسیم بندی می‌شود و هر نوع بار برحسب مؤلفه‌های تشکیل دهنده آن از قبیل روشنایی، تهویه مطبوع، گرمایش، آب گرم و سرمایه‌گذاری بیان می‌شود. مشخصه‌های انواع وسایل، مورد مطالعه مشروح قرار گرفته و روشهایی برای به دست آوردن مدل ترکیبی بار با استفاده از مدل‌های اجزا، مطرح شده است [۱۶ و ۱۷].

- |               |                 |                |               |
|---------------|-----------------|----------------|---------------|
| 1. Auxillary  | 2. EPRI         | 3. Residential | 4. Commercial |
| 5. Industrial | 6. Agricultural | 7. Mining      |               |

برنامه لودسین<sup>۱</sup> این مؤسسه [۱۸] با استفاده از ترکیب انواع بارها و مؤلفه‌های تشکیل دهنده آنها، مدل بار مناسبی را به منظور مطالعات پخش بار و پایداری فراهم می‌آورد. در مورد مشخصه‌های انواع بارها و مؤلفه‌های آنها، داده‌های پیش فرض<sup>۲</sup> در برنامه مطرح شده است. روش مشابهی در مرجع ۲۰ مورد استفاده قرار گرفته که در آن داده‌های مربوط به مصرف انرژی مصرف‌کننده‌های نهایی در تعیین داده‌های مربوط به بار ترکیبی مورد استفاده واقع شده است.



شکل ۷-۲۱ روش مدلسازی مبتنی بر مؤلفه‌ها

در مرجع ۱۷، نتایج به دست آمده از روش مبتنی بر مشخصه مؤلفه‌های تشکیل دهنده بار با مشخصه‌های اندازه‌گیری شده بار در چندین سیستم واقعی<sup>۳،۴،۵</sup> مقایسه شده است. مدل‌های بار به طور دقیقی عکس‌العمل توان حقیقی حالت ماندگار در مقابل ولتاژ را پیش‌بینی کرده‌اند اما در خصوص توان راکتیو، توانایی کافی نداشته‌اند. همچنین در حالت‌های گذرا، نتوانسته‌اند عکس‌العمل هر دو نوع توان (حقیقی و راکتیو) را پیش‌بینی نمایند. در مرجع ۲۱، با استفاده از مدل‌های فیزیکی در مقابل نمایش چند جمله‌ای، این مشکل و اختلاف موجود حل شده است. از مدل‌های موتور القایی تکفاز برای نمایش کمپرسورها و دیگر بارهای چرخان استفاده شده است. مدل‌های جداگانه‌ای برای نمایش بارهای کمپرسوری و غیرکمپرسوری مطرح گردیده است.

1. LOADSIN
2. Default
3. Island Lighting Company
4. Aster Gas and Electric Company
5. Montana - Dakota

## ۷-۴-۳ مشخصه‌های نوعی بار [۲، ۱۴، ۱۶ و ۲۰]

الف) مشخصه‌های استاتیکی مؤلفه‌ها

جدول ۷-۱ مشخصه‌هایی نوعی را از مؤلفه‌های بار و از لحاظ وابستگی به ولتاژ و فرکانس بیان می‌نماید.

جدول ۷-۱ مشخصه‌های استاتیکی مؤلفه‌های بار

مؤلفه	ضریب توان	$\partial P/\partial V$	$\partial Q/\partial V$	$\partial P/\partial f$	$\partial Q/\partial f$
تهویه هوا					
مرکزی سه فاز	۰/۹۰	۰/۰۸۸	۲/۵	۰/۹۸	-۱/۳
مرکزی تک فاز	۰/۹۶	۰/۲۰۲	۲/۳	۰/۹۰	-۲/۷
نوع پنجره	۰/۸۲	۰/۴۶۸	۲/۵	۰/۵۶	-۲/۸
آبگرمکن، چراغ خوراک پزی، فر، کیاب پز	۱/۰	۲/۰	۰	۰	۰
ماشین ظرفشویی	۰/۹۹	۱/۸	۳/۶	۰	-۱/۴
ماشین لباسشویی	۰/۶۵	۰/۰۸	۱/۶	۳/۰	۱/۸
خشک کن لباس	۰/۹۹	۲/۰	۳/۲	۰	-۲/۵
یخچال	۰/۸	۰/۷۷	۲/۵	۰/۵۳	-۱/۵
تلویزیون	۰/۸	۲/۰	۵/۱	۰	-۴/۵
لامپهای رشته‌ای	۱/۰	۱/۵۵	۰	۰	۰
لامپهای فلوروسنت	۰/۹	۰/۹۶	۷/۴	۱/۰	-۲/۸
موتورهای صنعتی	۰/۸۸	۰/۰۷	۰/۵	۲/۵	۱/۲
موتورهای پنکه	۰/۸۷	۰/۰۸	۱/۶	۲/۹	۱/۷
پمپهای کشاورزی	۰/۸۵	۱/۴	۱/۴	۵/۰	۴/۰
کوره قوسی	۰/۷۰	۲/۳	۱/۶	-۱/۰	-۱/۰
ترانسفورمر (بی بار)	۰/۶۴	۳/۴	۱۱/۵	۰	-۱۱/۸

## ب) مشخصه‌های استاتیکی انواع بار

جدول ۲-۷ مشخصه‌هایی نوعی را از انواع بار مطرح می‌کند.

جدول ۲-۷

$\partial Q/\partial f$	$\partial P/\partial f$	$\partial Q/\partial V$	$\partial P/\partial V$	ضریب توان	کلاس بار
					مسکونی
-۲/۲	۰/۸	۲/۹	۱/۲	۰/۹	تابستان
-۱/۵	۱/۰	۳/۲	۱/۵	۰/۹۹	زمستان
					تجاری
-۱/۶	۱/۲	۳/۵	۰/۹۹	۰/۸۵	تابستان
-۱/۱	۱/۵	۳/۱	۱/۳	۰/۹	زمستان
۱/۶	۲/۶	۶/۰	۰/۱۸	۰/۸۵	صنعتی
۱/۸	۲/۹	۱/۶	۰/۱	۰/۸	تجهیزات جنبی نیروگاه

## ج) مشخصه‌های دینامیکی

داده‌های زیر، داده‌های نوعی برای سه نوع مختلف بار برحسب پارامترهای موتور القایی معادل است (جهت تعاریف پارامترها، به شکل ۷-۷ مراجعه شود).

۱. مشخصه ترکیبی دینامیکی یک فیدر که به طور عمده یک بار تجاری را تغذیه می‌کند:

$$R_s = 0.001 \quad X_s = 0.23 \quad X_r = 0.23$$

$$X_m = 7.0 \quad R_r = 0.02 \quad H = 0.663 \quad m = 5.0$$

۲. یک موتور صنعتی بزرگ:

$$\begin{array}{llll}
 R_s = 0.007 & X_{s-u} = 0.409 & X_{s-s} = 0.409 & X_{r-u} = 0.267 \\
 X_{r-s} = 0.267 & X_m = 3.62 & R_r = 0.062 & H = 1/6 \\
 m = 2/0 & I_{sat s} = 3/0 & I_{sat r} = 3/0 & 
 \end{array}$$

ضریب عمق میله =  $6/59$

۳. یک موتور صنعتی کوچک:

$$\begin{array}{llll}
 R_s = 0.078 & X_s = 0.65 & X_r = 0.49 & \\
 X_m = 2.67 & R_r = 0.44 & H = 0.5 & m = 2/0
 \end{array}$$

## منابع:

- [1] IEEE Task Force Report, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis," Paper 92WM126-3 PWRD, presented at the IEEE PES Winter Meeting, New York, January 26-30, 1992.
- [2] C. Concordia and S. Ihara, "Load Representation in Power System Stability Studies," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, pp. 969-977, April 1982.
- [3] K. Srinivasan, C.T. Nguyen, Y. Robichaud, A. St. Jacques, and G.J. Rogers, "Load Response Coefficients Monitoring System: Theory and Field Experience," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp. 3818-3827, August 1981.
- [4] T. Ohyama, A. Watanabe, K. Nishimura, and S. Tsuruta, "Voltage Dependence of Composite Loads in Power Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-104, pp. 3064-3073, November 1985.
- [5] EPRI Report of Project 1208-9, "Extended Transient-Midterm Stability Program," Final report, prepared by Ontario Hydro, December 1992.
- [6] H.K. Clark, "Experience with Load Models in Simulation of Dynamic Phenomena," Paper presented at the Panel Discussion on Load Modelling Impact on System Dynamic Performance, IEEE PES Winter Meeting, New York, February 1, 1989.
- [7] H.K. Clark and T.F. Laskowski, "Transient Stability Sensitivity to Detailed Load Models: A Parametric Study," Paper A78 559-7, IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, July 16-21, 1978.
- [8] Klaus-Martin Graf, "Dynamic Simulation of Voltage Collapse Processes in EHV Power Systems," *Proceeding: Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security*, EPRI EL-6183, Section 6.3, January 1989.
- [9] C.W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill, 1993.
- [10] D.S. Brereton, D.G. Lewis, and C.C. Young, "Representation of Induction-Motor Loads during Power System Stability Studies," *AIEE Trans.*, Vol. 76, Part III, pp. 451-460, August 1957.

- [11] A.E. Fitzgerald and C. Kingsley, *Electric Machinery*, Second Edition, McGraw-Hill, 1961.
- [12] G.J. Rogers and D.S. Benaragama, "An Induction Motor Model with Deep-Bar
- [13] G.J. Rogers, J. Di Manno, and R.T.H. Alden, "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-103, pp. 683-690, 1984.
- [14] S.A.Y. Sabir and D.C. Lee, "Dynamic Load Models Derived from Data Acquired during System Transients," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, pp. 3365-3372, September 1982.
- [15] G. Shackshaft, O.C. Symons, and J.G. Hadwick, "General Purpose Model of Power System Loads," *Proc IEE*, Vol. 124, No. 8, pp. 715-723, August 1977.
- [16] EPRI Report of Project RP849-3, "Determining Load Characteristics for Transient Performance," EPRI EL-840, Vols. 1 to 3, prepared by the University of Texas at Arlington, May 1979.
- [17] EPRI Report of Project RP849-1, "Determining Load Characteristics for Transient Performance," EPRI EL-850, prepared by General Electric Company, March 1981.
- [18] EPRI Report of Project RP849-7, "Load Modelling for Power Flow and Transient Stability Studies," EPRI EL-5003, Prepared by General Electric Company, January 1987.
- [19] T. Frantz, T. Gentile, S. Ihara, N. Simons, and M. Waldron, "Load Behaviour Observed in LILCO and RG&E Systems," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-103, No. 4, pp. 819-831, April 1984.
- [20] E. Vaahedi, M.A. El-Kady, J.A. Libaque-Esaine, and V.F. Carvalho, "Load Models for Large-Scale Stability Studies from End-User Consumption," *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-2, pp. 864-872, November 1987.
- [21] R.J. Frowd, R. Podmore, and M. Waldron, "Synthesis of Dynamic Load Models for Stability Studies," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, pp. 127-135, January 1982.
- [22] B. Adkins and R.G. Harley, *The General Theory of Alternating Current Machine*, Chapman and Hall, 1975.



## فصل هشتم

### سیستمهای تحریک

وظیفه اصلی سیستم تحریک، تأمین جریان مستقیم سیم پیچ تحریک ماشین سنکرون است. بعلاوه، سیستم تحریک، با کنترل ولتاژ تحریک (و در نتیجه جریان تحریک)، وظایف کنترل و حفاظت را که در عملکرد مناسب یک سیستم قدرت مهم است، اجرا می‌کند. وظایف کنترل، شامل کنترل ولتاژ و توان انتقالی راکتیو و تقویت پایداری سیستم است. توابع حفاظتی این اطمینان را فراهم می‌آورد که از حدود توانایی ماشین سنکرون، سیستم تحریک و دیگر تجهیزات تجاوز نشده باشد.

در این فصل مشخصه‌ها و مدل‌سازی انواع گوناگون سیستمهای تحریک بیان می‌گردد. ضمناً معیارهای عملکرد دینامیکی مورد بحث قرار می‌گیرد و تعاریفی در خصوص واژه‌های مورد استفاده در شناسایی و مشخصه‌های مورد نیاز سیستم تحریک مطرح می‌شود. این موضوع در چندین گزارش IEEE مطرح شده است [۱ تا ۸]. این اطلاعات مبنای مناسبی برای شرکتها، سازندگان و تحلیلگران سیستم است که با اصطلاحات مشترک، مدل‌های استاندارد و روشهای شناسایی مشخصه‌ها و آزمایشهای مربوط به آن سروکار دارند. مدلها و واژه‌های مورد استفاده در این فصل به طور عمده بر این گزارشها منطبق است.

#### ۸-۱ نکات مربوط به سیستم تحریک

وظایف سیستم تحریک با توجه به ملاحظات مربوط به ژنراتور سنکرون و سیستم قدرت

تعیین می‌شود. [۹ و ۶].

#### ملاحظات مربوط به ژنراتور

وظیفه اصلی سیستم تحریک آن است که به منظور ثابت نگه داشتن ولتاژ پایانه ماشین هنگام تغییر خروجی، جریان تحریک ماشین سنکرون را در محدوده ظرفیت پیوسته ژنراتور، تأمین و به طور خودکار تنظیم نماید. این وظیفه را می‌توان با استفاده از منحنیهای V شکل ژنراتور (شکل ۵-۱۹ از فصل پنجم) مجسم کرد هنگامی که ظرفیت نامی توان حالت ماندگار تعیین می‌شود، باید حاشیه اطمینانی برای تغییرات دما، خرابی اجزا، اضافه بار در حالت اضطراری و غیره به حساب آید. معمولاً ظرفیت سیستم تحریک حدود  $2/5$  تا  $3/5$  کیلو وات به ازای هر مگاوات ظرفیت ژنراتور است.

علاوه بر این باید سیستم تحریک قادر باشد با تنظیم تحریک منطبق با تواناییهای لحظه‌ای و کوتاه مدت ژنراتور، در مقابل اغتشاشهای گذرا عکس العمل نشان دهد. تواناییهای ژنراتور در این مورد با چندین عامل محدود می‌شود: شکست عایقی روتور ناشی از ولتاژ تحریک قوی، گرم شدن روتور به علت عبور جریان شدید تحریک، گرم شدن استاتور ناشی از عبور جریان شدید بار آرمیچر، گرم شدن انتهای هسته هنگام عملکرد زیر تحریک و گرم شدن ناشی از شار بیش از حد (ولت بر هر تن). حدود گرمایی، مشخصه‌هایی وابسته به زمان دارند و قابلیت کوتاه مدت ژنراتور ممکن است بین ۱۵ تا ۶۰ ثانیه باشد. به منظور اطمینان از استفاده حداکثر از سیستم تحریک، این سیستم باید قادر باشد با به کارگیری مناسب و کامل از قابلیت‌های کوتاه مدت ژنراتور و بدون انحراف از محدوده‌های مجاز، نیازهای سیستم را برآورده سازد.

#### ملاحظات مربوط به سیستم قدرت

از دیدگاه سیستم قدرت، باید سیستم تحریک به کنترل مؤثر ولتاژ و تقویت پایداری شبکه کمک نماید. این سیستم باید قادر باشد به منظور تقویت پایداری گذرا سریعاً به اغتشاش پاسخ دهد و به منظور تقویت پایداری اغتشاش کوچک، به تحریک ژنراتور، سیگنال مناسب را اعمال نماید. از نظر تاریخی، وظیفه و نقش سیستم تحریک در تقویت عملکرد سیستم قدرت همواره فزونی داشته است. سیستمهای تحریک اولیه برای تأمین ولتاژ مناسب پایانه ژنراتور و بارگذاری

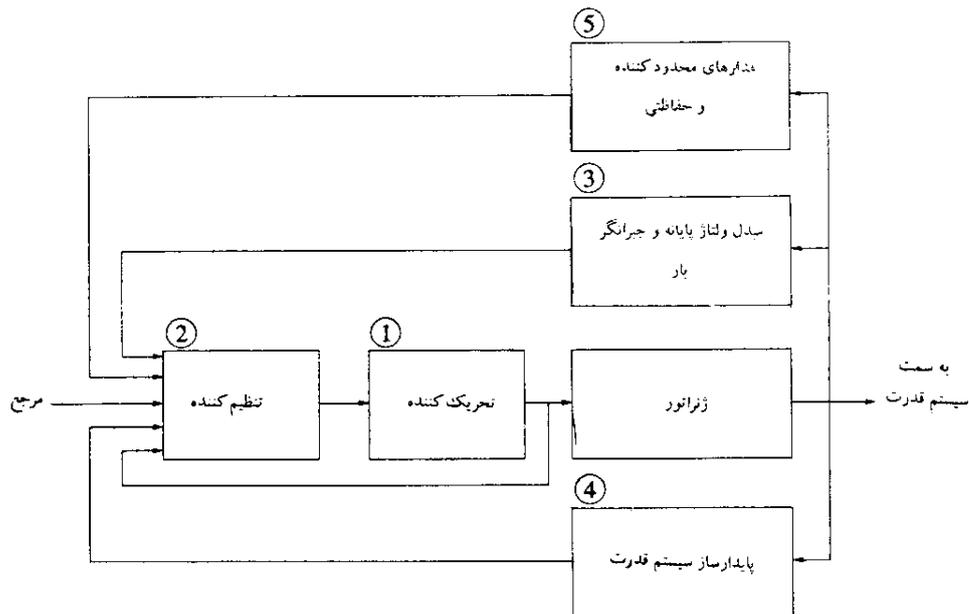
توان راکتیو به طور دستی کنترل می شدند. زمانی که کنترل ولتاژ به صورت خودکار در آمد، این سیستمها بسیار کند بودند و عملاً نقش یک اپراتور ماهر را بازی می کردند. اوایل دهه ۱۹۲۰ میلادی، امکان بالقوه بهبود پایداری گذرا و اغتشاش کوچک سیستم با استفاده از تنظیم کننده های پیوسته و سریع تشخیص داده شد. توجه بیشتری به طراحی این سیستمها معطوف گردید و تحریک کننده و تنظیم کننده های ولتاژ با عکس العمل سریع تر به صنعت وارد شد. از آن تاریخ، سیستمهای تحریک، پیوسته رشد و تکامل داشته اند. در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی با اعمال سیگنالهای کمکی پایداری (علاوه بر سیگنال خطای ولتاژ) به ورودی آن به منظور کنترل ولتاژ تحریک و میرا کردن نوسانهای سیستم، نقش مهمتری به سیستمهای تحریک داده شد. این بخش از کنترل سیستم تحریک به پایداری سیستم قدرت<sup>۱</sup> موسوم است. سیستمهای مدرن تحریک عملاً قادرند به صورت لحظه ای عکس العمل نشان دهند و دارای ولتاژهای سقفی<sup>۲</sup> بالایی هستند. استفاده از ترکیب قابلیت سرعت و حد بالای سیستم تحریک و نیز سیگنالهای کمکی پایداری، به تقویت عملکرد کلی دینامیکی سیستم کمک زیادی می نماید. این موضوع به طور مشروح در فصول ۱۲، ۱۳ و ۱۷ مطرح خواهد شد.

برای اجرای شایسته وظایف فوق، در یک سیستم تحریک باید نکات زیر رعایت شود:

- معیارهای عملکرد را ارضا کند.
- با استفاده از توابع محدود کننده و حفاظتی، از آسیب به خود، ژنراتور و دیگر تجهیزات جلوگیری نماید
- جهت انعطاف در بهره برداری نکات لازم را رعایت نماید.
- با در نظر گرفتن افزونگی<sup>۳</sup> لازم و تشخیص داخلی خطا و قابلیت جداسازی، قابلیت اعتماد و امکان دسترسی مطلوب را فراهم آورد.

## ۸-۲ اجزاء سیستم تحریک

شکل ۸-۱ نمودار بلوکی یک نمونه سیستم کنترل تحریک را برای ژنراتورهای سنکرون بزرگ نشان می دهد. در اینجا شرح مختصری از هر بلوکی شکل بیان می شود:



شکل ۸-۱ نمودار بلوکی تابعی سیستم کنترل تحریک ژنراتور سنکرون

۱. تحریک کننده<sup>۱</sup>: تأمین کننده توان جریان مستقیم مورد نیاز سیم پیچ تحریک ماشین سنکرون است و بخش توان سیستم تحریک را تشکیل می دهد.
۲. تنظیم کننده<sup>۲</sup>: سیگنالهای کنترل ورودی را به سطح و شکلی که برای کنترل تحریک کننده، مناسب است، تقویت و پردازش می نماید. این بلوک عملاً شامل تنظیم کننده و نیز توابع پایدارساز سیستم تحریک (به صورت سیگنال فیدبک<sup>۳</sup> یا جبرانگرهای پیش - پس فاز<sup>۴</sup>) است.
۳. مبدل<sup>۵</sup> ولتاژ پایانه و جبرانگر بار<sup>۶</sup>: ولتاژ پایانه ماشین را اندازه گیری و یکسوسازی کرده، آن

- |                            |               |                     |
|----------------------------|---------------|---------------------|
| 1. Exciter                 | 2. Regulator  | 3. Feedback         |
| 4. Lead - lag Compensation | 5. Transducer | 6. Load Compensator |

را به کمیت جریان مستقیم تبدیل می‌کند و سپس با مرجعی که نشاندهنده ولتاژ مطلوب پایانه است مقایسه می‌نماید. بعلاوه، اگر خواستار آن باشیم که ولتاژ را در نقطه‌ای که از نظر الکتریکی از پایانه ژنراتور دور است (مثلاً ترانسفورمر بالا برنده)، ثابت نگه داریم، این بلوک دارای جبرانگر بار نیز خواهد بود.

۴. پایدارساز سیستم قدرت<sup>۱</sup>: تأمین کننده سیگنال ورودی اضافی به تنظیم کننده ولتاژ، برای میرا کردن نوسانهای سیستم قدرت است. سیگنالهای ورودی مرسوم شامل انحراف سرعت روتور، توان شتاب دهنده و انحراف فرکانس است.

۵. مدارهای محدود کننده و حفاظتی: شامل مجموعه‌ای وسیع از توابع کنترلی و حفاظتی برای اطمینان از این موضوع است که از حدود توانایی تحریک کننده و ژنراتور تجاوز نشود. بعضی از توابع مرسوم شامل محدود کننده جریان تحریک، محدود کننده حداکثر تحریک، محدود کننده ولتاژ پایانه، تنظیم کننده و سیستم حفاظتی ولت بر هر تزی و محدود کننده زیر تحریک است. معمولاً این توابع شامل مدارهای مشخصی هستند و سیگنالهای خروجی آنها را می‌توان در محل‌های مختلف به صورت جمع کننده به سیستم تحریک اعمال کرد. به منظور سهولت در شکل ۸-۱، این مجموعه در یک بلوک جای داده شده‌اند.

### ۸-۳ انواع سیستم تحریک

در طول دوره تکامل، سیستمهای تحریک شکل‌های مختلفی به خود گرفته‌اند. براساس منبع توان تحریک، این سیستمها را می‌توان به سه طبقه عمده تقسیم کرد [۸ و ۴]:

- سیستمهای تحریک جریان مستقیم؛
- سیستمهای تحریک جریان متناوب؛
- سیستمهای تحریک استاتیکی.

در این بخش مروری بر طبقه‌بندیهای فوق، صورتهای مختلفی که در هر طبقه وجود دارد و ساختار کلی آنها خواهیم داشت. جزئیات مربوط به توابع مختلف تنظیم کننده و حفاظتی، که اغلب در سیستمهای تحریک وجود دارد، در بخش ۸-۵ مطرح خواهد شد.

1. Power System Stabilizer

### ۸-۳-۱ سیستمهای تحریک جریان مستقیم

سیستمهای تحریک از این نوع، از ژنراتورهای جریان مستقیم به عنوان منبع توان تحریک استفاده می‌کنند که از طریق جاروبکها، جریان مورد نیاز تحریک ژنراتور را فراهم می‌کنند. تحریک کننده، ممکن است به وسیله یک موتور و یا محور ژنراتور چرخانده شود و ممکن است خود تحریک یا تحریک مستقل باشد. در حالت تحریک مستقل، تحریک آن از طریق یک تحریک کننده کمکی<sup>۱</sup>، که دارای میدان مغناطیسی دائم<sup>۲</sup> است، تأمین می‌شود.

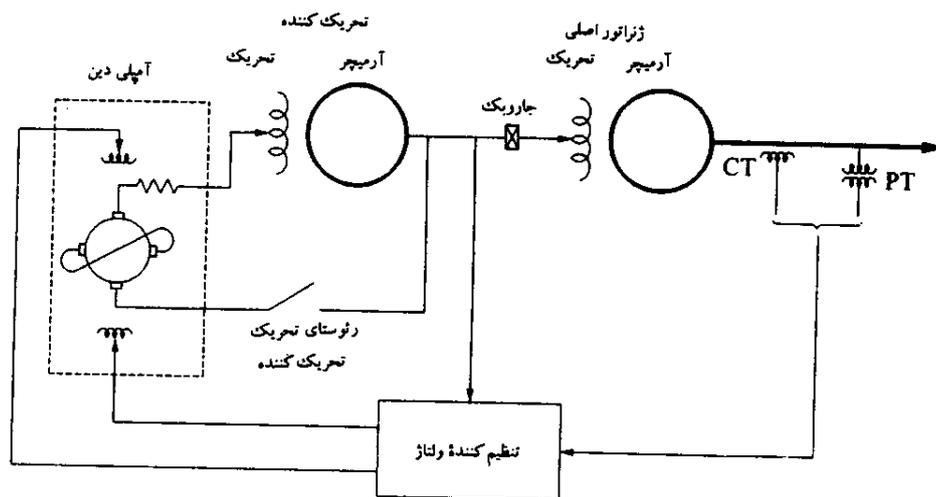
سیستمهای تحریک جریان مستقیم، سیستمهای اولیه‌ای بودند که از دهه ۱۹۲۰ تا دهه ۱۹۶۰ میلادی مورد استفاده واقع می‌شدند. در اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی این سیستمها با سیستمهای تحریک جریان متناوب جایگزین شدند. تنظیم کننده‌های ولتاژ چنین سیستمهایی ممکن است از انواع اولیه رثوستایی غیرپیوسته (گسسته و مرحله‌ای) تا انواع جدیدتری باشد که از چندین مرحله تقویت کننده مغناطیسی<sup>۳</sup> و چرخان<sup>۴</sup> استفاده کنند [۱۱ و ۱۰]. این سیستمها رفته‌رفته از صحنه نیروگاهها حذف می‌شوند و اکنون اغلب آنها جای خود را به سیستمهای تحریک جریان متناوب یا استاتیکی داده‌اند. در بعضی حالات فقط بخش تنظیم کننده‌های ولتاژ آنها با انواع جدیدتری از نوع الکترونیکی نیمه رسانا، جایگزین شده‌اند. از آنجا که هنوز بسیاری از این سیستمها مشغول به کار هستند، باید به طور مناسب در مطالعات پایداری، مدل شوند.

در شکل ۸-۲ نموداری ساده از یک نمونه سیستم تحریک جریان مستقیم که از تنظیم کننده ولتاژ آمپلی دین<sup>۵</sup> استفاده می‌کند، نشان داده شده که از یک تحریک کننده کموتاتوری جریان مستقیم تشکیل شده که جریان مستقیم مورد نیاز تحریک ژنراتور اصلی را از طریق جاروبکها تأمین می‌نماید. تحریک این تحریک کننده، به وسیله آمپلی دین کنترل می‌شود.

آمپلی دین نوع خاصی از طبقه کلی تقویت کننده‌های چرخان به نام متادین<sup>۶</sup> است [۱۱ و ۱۲]. آمپلی دین نوعی ماشین جریان مستقیم و دارای دو مجموعه زغال است که با یکدیگر ۹۰° الکتریکی اختلاف موقعیت دارند. یک مجموعه از زغالها روی محور طولی و مجموعه دیگر روی محور عرضی قرار دارد. سیم پیچهای کنترل تحریک روی محور d واقع هستند. یک

- |                       |                     |                       |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1. Pilot Exciter      | 2. Permanent Magnet | 3. Magnetic Amplifier |
| 4. Rotating Amplifier | 5. Amplidyne        | 6. Metadyne           |

سیم‌پیچ جبرانگر به طور سری با بار محور طولی قرار دارد که شاری مساوی و مخالف با شار جریان آرمیچر محور طولی ایجاد می‌کند و به این ترتیب اثر فیدبک منفی<sup>۱</sup>، عکس‌العمل آرمیچر را خنثی می‌کند. زغال‌های موجود روی محور  $q$  اتصال کوتاه می‌شوند و به این ترتیب توان تحریک بسیار کمی لازم است که جریان شدیدی را در آرمیچر محور  $q$  ایجاد کند. میدان مغناطیسی اصلی به وسیله جریان محور  $q$  ایجاد می‌شود و توان مورد نیاز برای حفظ جریان محور  $q$  به طور مکانیکی از طریق موتوری که آن را می‌چرخاند، تأمین می‌شود. در نتیجه، آمپلی دین، تقویت‌کننده‌ای با تقویت توان حدود ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ و ثابت زمانی در حدود ۰/۲ تا ۰/۲۵ ثانیه است.



شکل ۸-۲ سیستم تحریک DC با تنظیم کننده ولتاژ آمپلی دین

در سیستم تحریک شکل ۸-۲، آمپلی دین در یک طرح تقویتی، تغییرات افزایشی تحریک کننده را فراهم می‌کند. بقیه تحریک مورد نیاز تحریک کننده با استفاده از خروجی آن و به صورت خود تحریک تأمین می‌شود. اگر تقویت کننده آمپلی دین از مدار خارج شود، تحریک

تحریک کننده را می توان روی کنترل دستی قرار داد و با استفاده از تنظیم رثوستای تحریک، آن را تغییر داد.

### ۸-۳-۲ سیستمهای تحریک جریان متناوب

سیستمهای تحریک از این نوع، از ژنراتورهای جریان متناوب برای تأمین تحریک مورد نیاز ژنراتور اصلی استفاده می کنند. معمولاً تحریک کننده، روی همان محور اصلی توربوژنراتور قرار دارد. خروجی جریان متناوب تحریک کننده های با و یا بدون کنترل، یکسوسازی شده تا جریان مستقیم مورد نیاز تحریک ژنراتور فراهم شود. یکسو کننده ها ممکن است ساکن یا چرخان باشند. سیستمهای اولیه تحریک جریان متناوب از ترکیبی از تقویت کننده های مغناطیسی و چرخان به عنوان تنظیم کننده استفاده می کردند [۱۱]. اغلب سیستمهای جدید از تقویت کننده های الکترونیکی استفاده می کنند.

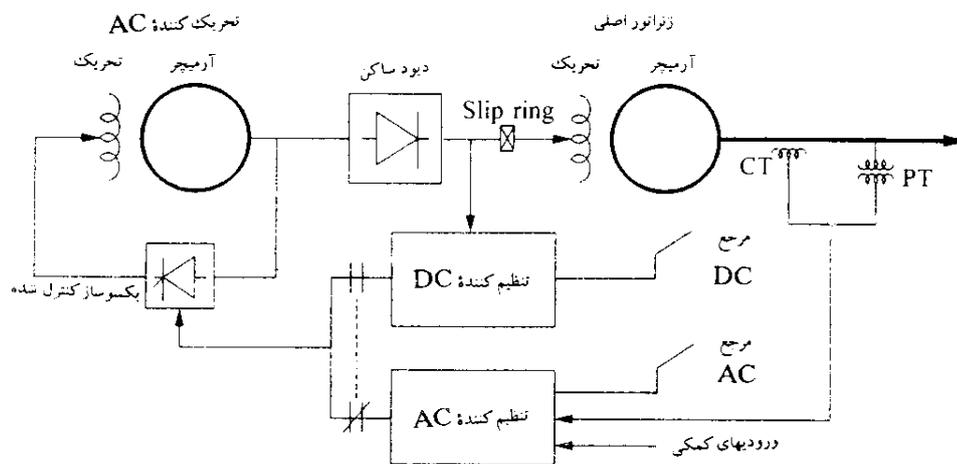
بدین ترتیب مشاهده می شود که ممکن است سیستمهای تحریک جریان متناوب بسته به ترکیب یکسوسازها، روش کنترل خروجی تحریک کننده و نیز منبع تحریک کننده صورت های مختلفی به خود بگیرند [۱۳ تا ۱۷]. در اینجا شرحی بر انواع مختلف مرسوم این سیستمها خواهیم داشت.

#### الف) سیستمهای با یکسوساز ساکن

اگر یکسوسازهای سیستم ساکن باشند، خروجی جریان مستقیم آنها از طریق جاروبکها به سیم پیچ تحریک ژنراتور اصلی اعمال می شود. در صورتی که از یکسوسازی بدون کنترل استفاده شود، تنظیم کننده، تحریک کننده جریان متناوب را کنترل می کند که آن نیز به نوبه خود، ولتاژ خروجی تحریک کننده را کنترل می نماید. نموداری از چنین سیستم تحریکی در شکل ۸-۳ نشان داده شده است. در این سیستم که نشان دهنده سیستمهای تحریک آلترکس<sup>۱</sup> از جی ای سی<sup>۲</sup> است [۱۴]، تحریک کننده به وسیله روتور ژنراتور اصلی چرخانده می شود. در اینجا تحریک کننده به صورت خود تحریک عمل می کند و توان تحریک آن از طریق یکسوسازهای

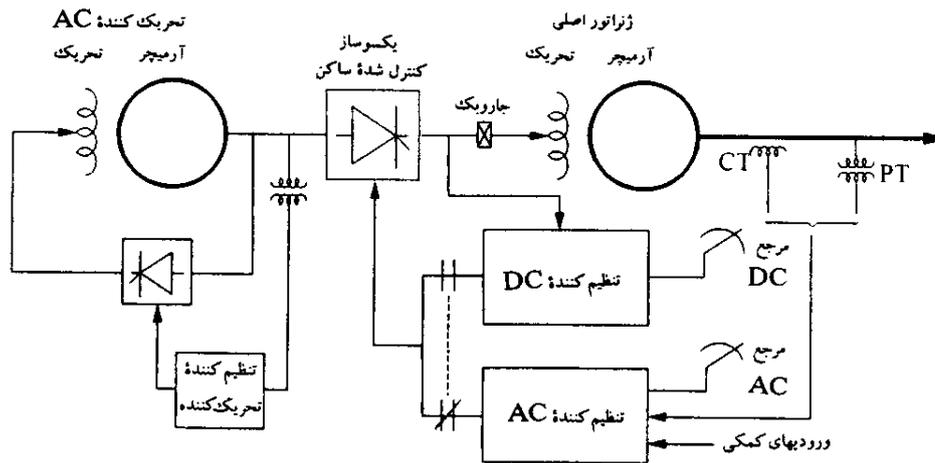
1. ALTÉREX      2. General Electric Company

تریستوری تأمین می‌شود. تنظیم کننده ولتاژ، توان مورد نیاز خود را از طریق ولتاژ خروجی تحریک کننده تأمین می‌نماید. نوع دیگری از همین سیستم از یک تحریک کننده کمکی برای تأمین توان تحریک کننده اصلی استفاده می‌کند.



شکل ۳-۸ سیستم تحریک از نوع یکسوساز آلترناتوری با تحریک کنترل شده.

در صورتی که از یکسوسازی (تریستوری) قابل کنترل استفاده شود، تنظیم کننده به طور مستقیم، کنترل ولتاژ جریان مستقیم خروجی تحریک کننده را به عهده می‌گیرد. نموداری از این نوع، در شکل ۴-۸ نشان داده شده که مربوط به نوع آلتی رکس<sup>۱</sup> از جی ای سی است [۱۷]. تنظیم کننده ولتاژ، نقطه آتش تریستورها را کنترل می‌کند. تحریک کننده خود تحریک است و برای حفظ ولتاژ خروجی از یک تنظیم کننده استاتیکی و مستقل ولتاژ استفاده می‌کند. از آنجا که تریستورها به طور مستقیم خروجی تحریک کننده را کنترل می‌نمایند، عملاً این سیستم عکس‌العمل اولیه سریعی (پاسخ زمانی کوتاه) دارد.



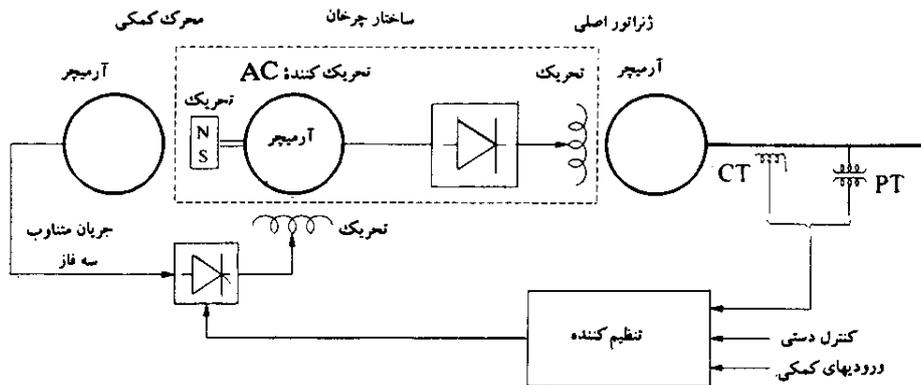
شکل ۴-۸ سیستم تحریک تغذیه آترناتوری با یکسوساز کنترل شده

مطابق با دو شکل ۳-۸ و ۴-۸، در هر شکل دو مُد تنظیم وجود دارد: (۱) تنظیم‌کننده جریان متناوب که به طور خودکار ولتاژ پایانه استاتور ژنراتور اصلی را در مقدار مطلوب که مطابق با مقدار مبنای جریان متناوب است، حفظ می‌کند و (۲) تنظیم‌کننده جریان مستقیم که ولتاژ تحریک ژنراتور را در مقدار مطلوب، که مطابق با مقدار مبنای جریان مستقیم است، حفظ می‌نماید. تنظیم‌کننده جریان مستقیم یا حالت کنترل دستی برای مواقعی است که تنظیم‌کننده جریان متناوب خراب است و یا لازم است از کاز انداخته شود. تنظیم‌کننده جریان متناوب امکان اعمال سیگنالهای اضافی را فراهم می‌سازد که می‌توانند وظایف کنترلی و حفاظتی را انجام دهند. این موضوع در بخش ۵-۸ مطرح خواهد شد.

#### ب) سیستمهای با یکسوساز چرخان

در صورتی که یکسوسازها، چرخان باشند نیاز به جاروبکها یا زغال حذف می‌شود و خروجی جریان مستقیم تحریک کننده به طور مستقیم به تحریک ژنراتور اصلی اعمال می‌شود. مطابق با شکل ۵-۸، در این حالت آرمیچر تحریک کننده جریان متناوب و یکسوسازهای دیودی با

تحریک ژنراتور اصلی می‌چرخند. یک تحریک کننده کمکی جریان متناوب که دارای روتور مسغناطیس دائم آهنربای NS در شکل ۵-۸ است، به همراه آرمیچر تحریک کننده و یکسوسازهای دیودی می‌چرخد. خروجی یکسوسازی شده استاتور تحریک کننده کمکی، تحریک ساکن تحریک کننده جریان متناوب را تغذیه می‌کند. تنظیم کننده ولتاژ، تحریک کننده جریان متناوب را کنترل می‌کند که آن نیز به نوبه خود تحریک ژنراتور اصلی را کنترل می‌نماید.



شکل ۵-۸ سیستم تحریک بدون جاروبک

چنین سیستمی به سیستم تحریک بدون زغال<sup>۱</sup> موسوم است. این سیستم بدین منظور ابداع شد که از مسائلی که در اثر استفاده از زغال هنگام تأمین جریانهای شدید تحریک ژنراتورهای بسیار بزرگ (به عنوان مثال توان مورد نیاز تحریک یک ژنراتور ۶۰۰ مگاواتی، حدود یک مگاوات است) ایجاد می‌شود، اجتناب گردد. اما در صورتی که جاروبکها و زغالها به طور صحیح و مرتب تعمیر و نگهداری شوند مسأله مهمی در این خصوص اتفاق نمی‌افتد. از این رو سیستمهای تحریک جریان متناوب با و یا بدون زغال هر دو خوب عمل کرده‌اند. با طراحی خاص تحریک کننده جریان متناوب و ولتاژ بالای اجباری سیم پیچ تحریک

1. Brushless Excitation System

ساکن تحریک کننده، می توان به عکس العملهای اولیه بسیار سریع در سیستمهای تحریک بدون زغال دست یافت. شرکت وستینگهاوس چنین نمونه ای را ساخته است [۱۳].

سیستمهای تحریک بدون زغال امکان اندازه گیری مستقیم ولتاژ و جریان تحریک ژنراتور را فراهم نمی کنند. با تنظیم ورودی جریان مستقیم به مدارهای کنترل ترستور، امکان اعمال کنترل دستی ولتاژ ژنراتور اصلی فراهم می شود. به منظور سهولت، توابع مربوط به مدارهای کنترل در شکل ۸-۵ نشان داده نشده است.

### ۸-۳-۳ سیستمهای تحریک استاتیکی

تمام اجزای چنین سیستمهایی ساکن هستند. یکسوسازهای استاتیکی (با یا بدون کنترل) مستقیماً تحریک ژنراتور اصلی را از طریق جاروبکها تغذیه می کنند. توان مورد نیاز یکسوسازها از ژنراتور اصلی (یا شین اضافی پست) و از طریق یک ترانسفورمر کاهنده که ولتاژ را به سطح مطلوب می رساند، تأمین می شود. در بعضی حالات، این توان از طریق سیم پیچهای اضافی در ژنراتور تأمین می گردد. در اینجا مروری بر سه نوع از سیستمهایی که به طور وسیع استفاده می شوند، خواهیم داشت:

#### الف) سیستمهای با یکسوساز قابل کنترل و منبع ولتاژ<sup>۱</sup>

در این سیستم، توان سیستم تحریک از طریق یک ترانسفورمر و از پایانه های ژنراتور یا شین اضافی پست تأمین می شود و سیستم به وسیله یک یکسوساز قابل کنترل تنظیم می گردد (شکل ۸-۶). این نوع سیستم تحریک همچنین به سیستم استاتیکی با تغذیه شین<sup>۲</sup> یا تغذیه ترانسفورمر<sup>۳</sup> موسوم است. ثابت زمانی این سیستم بسیار کوچک است و حداکثر ولتاژ خروجی تحریک کننده (ولتاژ سقف<sup>۴</sup>) آن به ولتاژ ورودی جریان متناوب بستگی دارد. بنابراین در حالتی که خطا در سیستم باعث افت ولتاژ پایانه ژنراتور می شود، ولتاژ سقف تحریک کننده کاهش می یابد. این محدودیت تا حد زیادی به وسیله عکس العمل عملاً لحظه ای و توانایی بالای

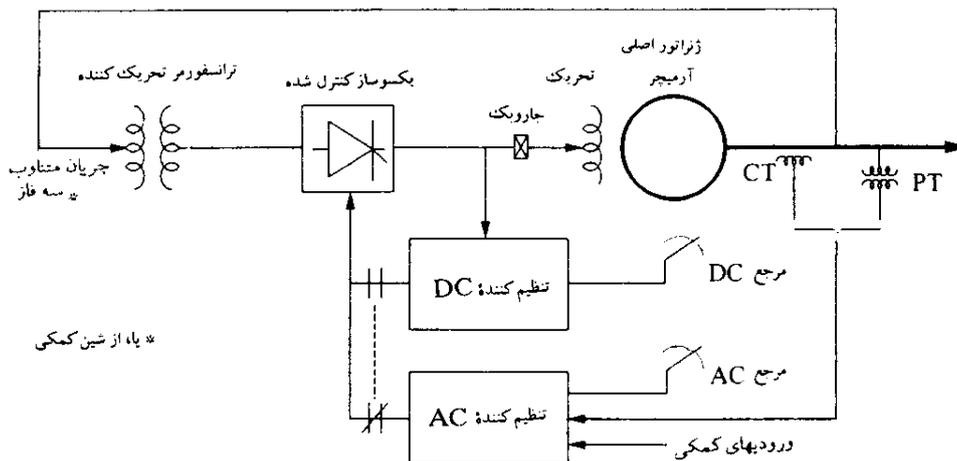
1. Potential Source Controlled — rectifier System

2. Bus - fed

3. Transformer — fed

4. Ceiling Voltage

تحریک اجباری آن بعد از اغتشاشها، جبران می‌شود [۱۸ و ۱۹]. بعلاوه سیستم، گران نیست و پراحتی قابل تعمیر و نگهداری است. برای ژنراتورهایی که به یک سیستم بزرگ قدرت متصلند، چنین سیستمهای تحریکی، عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهند [۱۸]. روشهای ترکیبی که شرح داده خواهد شد، معمولاً در چنین حالتی استفاده نمی‌شود، بلکه بیشتر برای ژنراتورهایی است که توان را مستقیماً به شبکه‌های کوچک صنعتی عرضه می‌کنند و دارای سیستمهای گند رفع خطا هستند.



شکل ۸-۶ سیستم تحریک منبع ولتاژ با یکسوساز کنترل شده

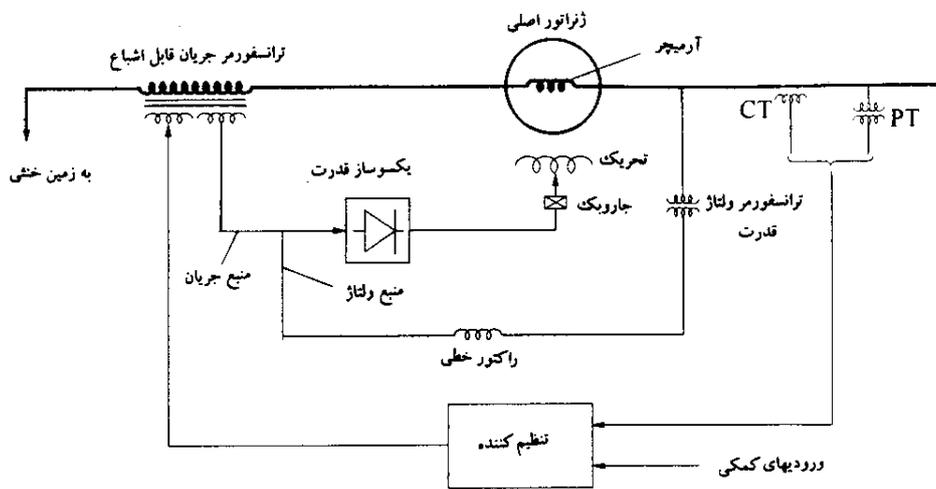
به عنوان نمونه سیستم تحریک سی جی ای اس<sup>۱</sup>، سیستم تحریک نوع پی اس شرکت وستینگهاوس، سیستم تحریک استاتیکی منبع ولتاژ شرکت جی ای<sup>۲</sup> و سیستمهای تحریک استاتیکی شرکتهای اِ بی بی، جی ای سی الیوت، نوشیبا، میتسوبیشی و هیتاچی از این نوع هستند.

1. Canadian General Electric Silicomatic

2. General Electric

### ب) سیستمهای با یکسوساز و منبع ترکیبی<sup>۱</sup>

در این حالت، توان مورد نیاز سیستم تحریک به وسیله هم ولتاژ و هم جریان ژنراتور اصلی تأمین می‌شود که این کار با استفاده از یک ترانسفورمر ولتاژ قدرت<sup>۲</sup> و یک ترانسفورمر جریان قابل اشباع<sup>۳</sup>، مطابق با شکل ۷-۸ تأمین می‌گردد. راه دیگر آن است که دو وظیفه فوق را در یک ترانسفورمر تحریک به نام ترانسفورمر ولتاژ و جریان قابل اشباع (SCPT) ادغام کرد.



شکل ۷-۸ سیستم تحریک با یکسوساز و منبع ترکیبی

خروجی تحریک کننده از طریق اشباع کنترل ترانسفورمر تحریک به وسیله تنظیم کننده، کنترل می‌شود. زمانی که ژنراتور، باری را تغذیه نمی‌کند، جریان آرمیچر صفر است و منبع ولتاژ تمام توان مورد نیاز سیستم تحریک را تأمین می‌کند. اما در حالتی که ژنراتور دارای بار است، بخشی از توان مزبور به وسیله جریان ژنراتور تأمین می‌شود. در حالتی که در سیستم، خطایی رخ دهد و ولتاژ پایانه ژنراتور بشدت افت کند ورودی جریان، سیستم تحریک را قادر می‌سازد که بخوبی

1. Compound - source Rectifier System

2. Power Potential Transformer (PT)

3. Saturable - current Transformer (SCT)

به وظیفه خود عمل کند. به عنوان نمونه سیستمهای تحریک اس سی تی - پی پی تی و اس سی پی تی شرکت جی ای از این نوع هستند.

### ج) سیستمهای تحریک با یکسوساز و منبع ترکیبی قابل کنترل<sup>۱</sup>

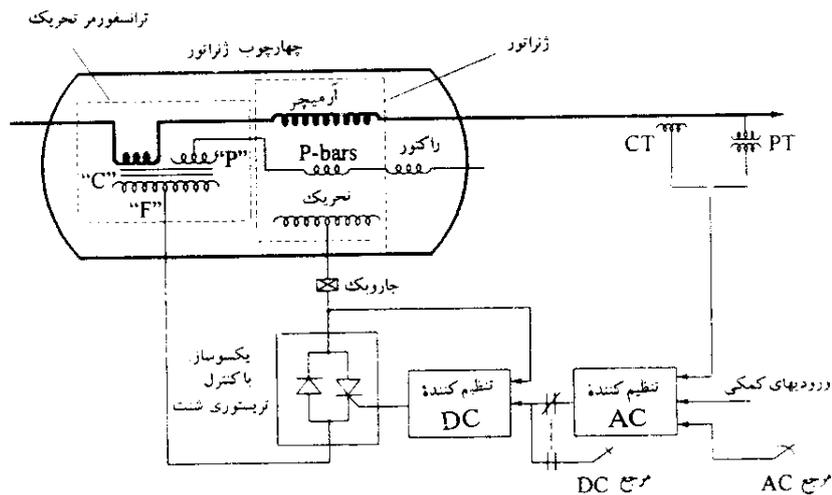
در این سیستم از یکسوسازهای قابل کنترل در مدارهای خروجی تحریک کننده و ترکیبی از منابع ولتاژ و جریان در استاتور ژنراتور به منظور تأمین توان مورد نیاز تحریک استفاده می شود. در نتیجه سیستم تحریک فوق، بسیار سریع و هنگام بروز خطا دارای توانایی بالایی است. به عنوان نمونه می توان از سیستمهای تحریک جنرکس<sup>۲</sup> از جی ای سی نام برد [۱۵ و ۱۶]. شکل ۸-۸ نمودار ساده ای از این نوع را نشان می دهد. منبع ولتاژ از یک مجموعه سیم پیچ سه فازه واقع در سه شکاف استاتور ژنراتور، و یک راکتور خطی سری، تشکیل می شود. منبع جریان از طریق ترانسفورمرهای جریان، که در نقطه خنثای سیم پیچهای استاتور قرار گرفته اند، تأمین می شود. خروجی این منابع از طریق عمل ترانسفورمری با هم ترکیب شده، خروجی جریان متناوب حاصل، به کمک نیمه رساناهای توان بالای ساکن، یکسو می شود. ابزار کنترلی با ترکیبی از دیودها و ترستورهایی که به هم متصل شده و تشکیل پلی موازی را داده اند، تأمین می شود. یک تنظیم کننده ولتاژ استاتیکی و جریان متناوب، مدارهای آتش ترستورها را کنترل می کند و بنابراین تحریک مورد نیاز ژنراتور اصلی را تنظیم می کند.

ترانسفورمر تحریک از سه ترانسفورمر تک فاز با سه سیم پیچی تشکیل می شود: سیم پیچهای اولیه جریان (C)، ولتاژ (P) و یک سیم پیچ خروجی ثانویه (F). هنگام بروز خطا، جریان خطایی که از ترانسفورمر C می گذرد هنگام افت ولتاژ ژنراتور، تحریک اجباری سیستم تحریک را تأمین می کند.

راکتور موجود دو وظیفه را به عهده دارد: کمک به مشخصه مطلوب ترکیبی سیستم تحریک و کاهش جریانهای خطا در مورد خطاهایی که در سیستم تحریک یا ژنراتور اتفاق می افتد. ترانسفورمرهای تحریک و راکتورها درون محفظه ای در بالای بدنه ژنراتور واقع شده اند و در حقیقت بخشی از بدنه را تشکیل می دهند.

1. Compound – controlled Rectifier System

2. GENERREX



شکل ۸-۸ سیستم تحریک با یکسوساز کنترل ترکیبی جنرکس IEEE ۱۹۷۶ میلادی [۱۶]

### شعله‌وری تحریک<sup>۲</sup> در تحریک کننده‌های استاتیکی

از آنجا که منبع توان سیستم تحریک استاتیکی، ژنراتور اصلی است لذا در عمل، این سیستم، سیستمی خود تحریک است. اما ژنراتور نمی‌تواند ولتاژی ایجاد کند مگر اینکه جریان تحریک وجود داشته باشد. از این رو برای تأمین جریان تحریک و انرژی‌دار کردن ژنراتور لازم است برای چند ثانیه منبع توان دیگری در دسترس باشد. فرایند ایجاد و افزایش شار تحریک ژنراتور به شعله‌وری تحریک موسوم است. منبع معمول مورد نیاز برای شعله‌وری، باتری پُست است.

### ۸-۳-۴ پیشرفتهای اخیر و جهتگیری آینده

در طی بیست سال گذشته، پیشرفتهای موجود در زمینه سیستمهای کنترل تحریک، تحت تأثیر

1. GENERREX 2. Field Flashing

پیشرفتهای شگرف الکترونیک نیمه رساناها بوده است. پیشرفت در زمینه مدارهای مجتمع آنالوگ این امکان را فراهم ساخته است که به سهولت استراتژیهای پیچیده کنترلی به کار گرفته شوند. آخرین پیشرفت در سیستمهای تحریک استفاده از تکنولوژی دیجیتال است. هنوز از ترسورها در بخش توان استفاده می شود و توابع کنترلی، حفاظتی و منطقی به صورت دیجیتالی، اعمال شده و به کار گرفته می شوند که قبلاً همه این وظایف به کمک مدارهای آنالوگ تأمین می شد. از آنجا که سیستمهای کنترل دیجیتالی ارزانتر و دارای قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به سیستمهای آنالوگ هستند، پیش بینی می شود در آینده از آنها به طور وسیع استفاده شود. ضمناً این سیستمها، این مزیت را دارند که دارای قابلیت انعطاف بیشتری هستند و امکان اعمال ساده توابع پیچیده کنترلی و ترکیب با سایر توابع کنترلی و حفاظتی ژنراتور را فراهم می سازند.

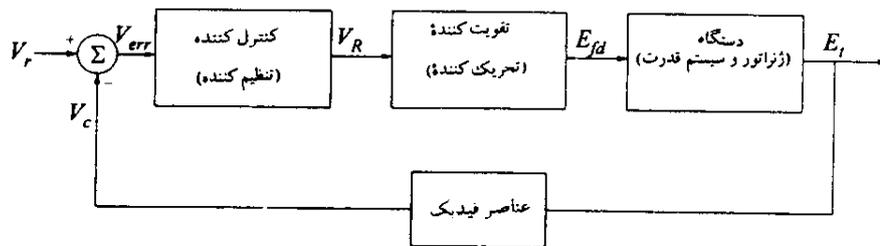
#### ۸-۴ معیارهای عملکرد دینامیکی

تأثیر سیستم تحریک در تقویت پایداری سیستم قدرت به کمک بعضی از مشخصه های مهم آن تعیین شود. در این بخش معیارهای عملکرد یک سیستم تحریک که این مشخصه ها را تعیین کرده، می تواند به عنوان مبنایی برای ارزیابی و تشخیص عملکرد دینامیکی سیستم کنترل تحریک به کار رود را تعیین و تعریف می نمایم. شکل ۸-۹ نمایی از سیستم کنترل تحریک را به صورت کلاسیک، که برای بیان سیستمهای کنترلی فیدبکی به کار می رود، نشان می دهد.

عملکرد سیستم کنترل تحریک به مشخصه های سیستم تحریک، ژنراتور و سیستم قدرت بستگی دارد. چون سیستم، غیرخطی است بهتر است که عملکرد دینامیکی آن از دو دیدگاه عملکرد سیگنال بزرگ و عملکرد سیگنال کوچک بررسی گردد. در نوع اول، مشخصات غیر خطی قابل توجه است ولی در نوع دوم، عملکرد به صورت خطی است.

#### ۸-۴-۱ معیارهای عملکرد سیگنال بزرگ [۷]

معیارهای عملکرد سیگنال بزرگ وسیله ای برای ارزیابی عملکرد سیستم تحریک در مقابل اغتشاشهای شدیدی است که مثلاً هنگام بررسی پایداری گذرا، میان مدت و بلند مدت روی می دهد. این معیارها براساس کمیتهایی است که بیان خواهد شد. به منظور دستیابی به حداکثر



شکل ۸-۹ سیستم کنترل تحریک به صورت کنترل فیدبک معمولی

قابلیت انعطاف در طراحی، ساخت و کاربرد سیستم تحریک، بعضی از معیارها "تحت وضعیت خاص" تعریف شده که این وضعیت را می توان با توجه به حالت خاص موجود، مشخص کرد. الف) ولتاژ سقف<sup>۱</sup> سیستم تحریک: حداکثر ولتاژ مستقیمی است که سیستم تحریک قادر است تحت وضعیتی خاص در پایانه های خود عرضه کند [۷ و ۲۰]. ولتاژ سقف نمایانگر قابلیت و توانایی تحریک سیستم تحریک است و هر چه این ولتاژ بالاتر باشد، تأثیر آن بر بهبود پایداری گذرا زیادتر است. در سیستمهای تحریک با منبع ولتاژ و منبع ترکیبی که تغذیه به ولتاژ و جریان ژنراتور بستگی دارد، ولتاژ سقف در ولتاژ و جریان مشخص تغذیه، تعریف می شود. در سیستمهای تحریک با تحریک کننده های چرخان، ولتاژ سقف در سرعت نامی تعیین می شود. ب) جریان سقف سیستم تحریک: حداکثر جریان مستقیمی است که سیستم تحریک قادر است برای مدت زمانی مشخص در پایانه های خود عرضه کند [۷ و ۲۰]. زمانی که اغتشاشهای طولانی مطرح باشد، می توان جریان سقف را براساس تحمل گرمایی سیستم تحریک قرار داد. ج) پاسخ زمانی ولتاژ<sup>۲</sup>: ولتاژ خروجی سیستم تحریک است که تحت وضعیت خاص به صورت تابعی از زمان بیان شده باشد [۷ و ۲۰].

د) زمان پاسخ ولتاژ<sup>۳</sup> سیستم تحریک: زمانی (برحسب ثانیه) است که تحت وضعیت خاص، ولتاژ تحریک به ۹۵٪ اختلاف بین ولتاژ سقف و ولتاژ تحریک بار نامی می رسد [۷ و ۲۰]. ولتاژ تحریک بار نامی، ولتاژ تحریک در حالت پیوسته بار نامی است که سیم پیچ تحریک در

1. Ceiling Voltage

2. Voltage Time Response

3. Voltage Response Time

یکی از دو حالت ذیل باشد :

۱. ۷۵ درجه سانتیگراد برای سیم پیچهایی که برای کار با افزایش دمای ۶۰ درجه سانتیگراد یا کمتر طراحی شده‌اند،

۲. ۱۰۰ درجه سانتیگراد برای سیم پیچهایی که برای کار با افزایش دمای بیش از ۶۰ درجه سانتیگراد طراحی شده‌اند.

ها سیستم تحریک با پاسخ اولیه سریع<sup>۱</sup>: سیستم تحریکی است که زمان پاسخ و لتاژ آن ۰/۱ ثانیه یا کمتر باشد [۷] که نمایشگر سیستمی با عکس‌العمل سریع است.

و) پاسخ اسمی سیستم تحریک<sup>۲</sup>: میزان افزایش و لتاژ خروجی سیستم تحریک است که از حاصل تقسیم و لتاژ تحریک از منحنی پاسخ بر و لتاژ نامی تحریک به دست می‌آید. اگر بتوان این نرخ را ثابت نگه داشت، در منحنی و لتاژ- زمان همان سطحی را ایجاد می‌کند که منحنی واقعی در طی نیم ثانیه اول ایجاد می‌کند (مگر اینکه دوره زمانی دیگری مشخص شده باشد) [۷ و ۲۰]. پاسخ اسمی به این صورت به دست می‌آید که ابتدا سیستم تحریک را در و لتاژ (و جریان) تحریک در بار نامی، مورد بهره‌برداری قرار دهیم و سپس به طور ناگهانی، و لتاژ پایانه سه فاز ورودی را مقداری کنیم که و لتاژ سیستم تحریک را به سقف برساند. باید هر تأخیر زمانی را که ممکن است سیستم تحریک در مقابل یک اغتشاش ناگهانی از خود بروز دهد، لحاظ کرد. مطابق با شکل ۸-۱۰، پاسخ سیستم تحریک با خط ac، مشخص شده است. این خط بامساوی قرار دادن دو سطح acd و abd به دست می‌آید.

$$\text{پاسخ اسمی} = \frac{cd}{(ao)(oe)}$$

که

oe: نیم ثانیه؛

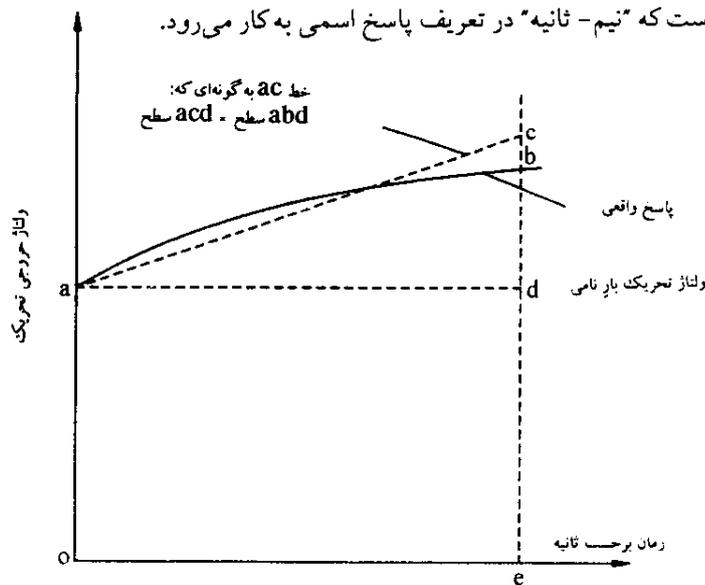
ao: و لتاژ تحریک در بار نامی؛

است. توجیهی که برای استفاده از نیم ثانیه، در بحث وجود دارد این است که به دنبال بروز

1. High Initial Response

2. Nominal Response

اغتشاشی شدید، زاویه روتور ژنراتور در زمانی در حدود  $0/4$  تا  $0/75$  ثانیه به اوج خود می‌رسد. اگر قرار باشد سیستم تحریک به پایداری گذرا کمک نماید باید در این بازه زمانی عمل نماید. از این روست که "نیم-ثانیه" در تعریف پاسخ اسمی به کار می‌رود.



شکل ۸-۱۰ پاسخ اسمی سیستم تحریک

در گذشته، پاسخ اسمی، معیار مناسب و ارزشمندی برای ارزیابی عملکرد سیستمهای تحریک در مقابل اغتشاشهای بزرگ بود. در سیستمهای قدیمتر و کندتر، این معیار مناسب بود اما نمی‌تواند در مورد بسیاری از سیستمهای مدرن تحریک کفایت کند. بخصوص این معیار، معیار مناسبی برای سیستمهای تحریکی که از ژنراتور یا سیستم قدرت تغذیه می‌شوند، نیست زیرا قابلیت چنین سیستمهایی هنگام بروز خطای سیستم، کاهش می‌یابد. در سیستمهای تحریک با پاسخ اولیه سریع، پاسخ اسمی فقط ولتاژ سقف مورد نیاز را مشخص می‌کند. برای چنین سیستمهایی، ولتاژ سقف و زمان پاسخ ولتاژ معنادارتر است.

#### ۲-۴-۸ معیارهای عملکرد سیگنال کوچک [۷ و ۳]

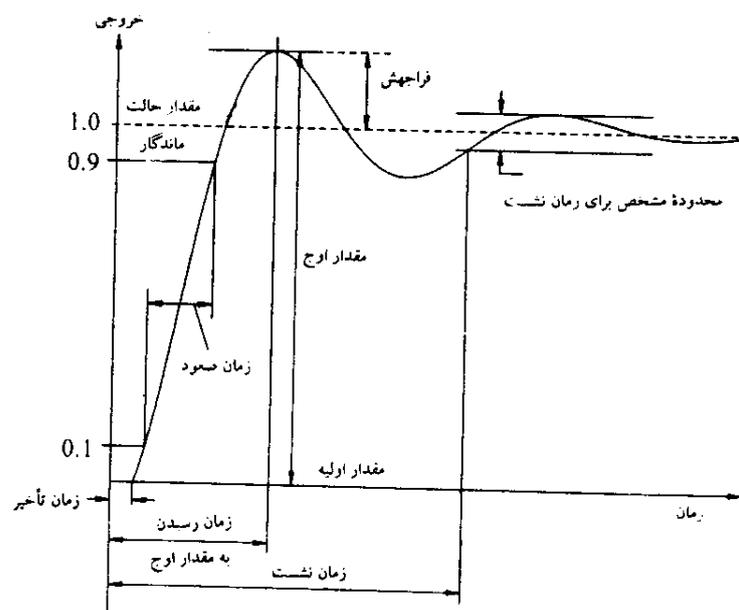
معیارهای عملکرد سیگنال کوچک وسیله‌ای برای ارزیابی پاسخ سیستم کنترل حلقه-بسته

تحریک به تغییرات کوچک در وضعیتهای مختلف سیستم است. بعلاوه، مشخصه‌های عملکرد سیگنال کوچک، وسیله مناسبی در تعیین یا تشخیص صحت و سقم پارامترهای مدل سیستم تحریک در مطالعات سیستم است.

عملکرد سیگنال کوچک را می‌توان برحسب معیارهای عملکردی که در نظریه سیستمهای کنترل به کار می‌رود به صورت زیر بیان کرد:

- معیارهای مربوط به پاسخ زمانی؛
- معیارهای مربوط به پاسخ فرکانسی.

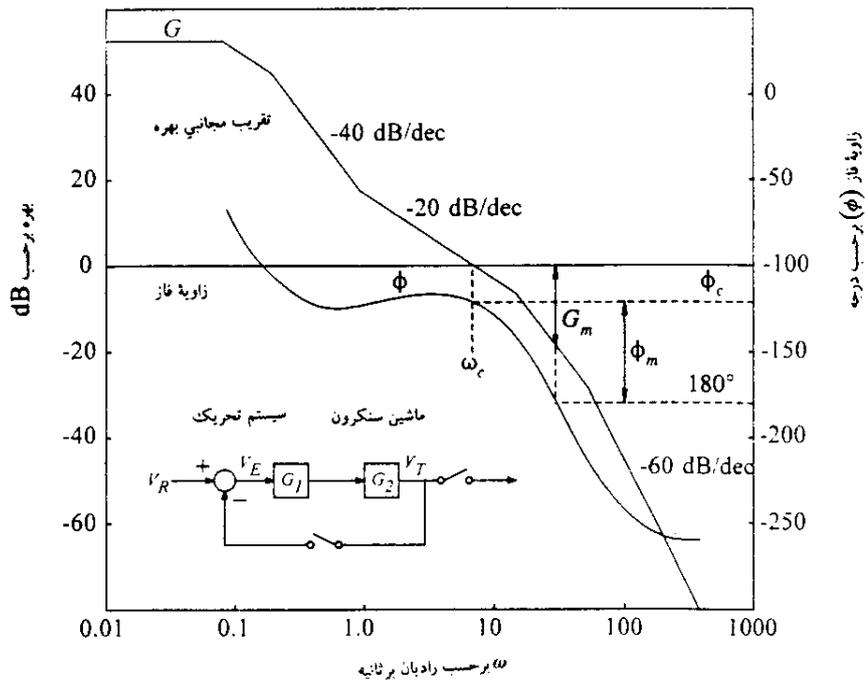
نمونه پاسخ زمانی یک سیستم کنترل فیدبک به تغییری پله‌ای در ورودی در شکل ۸-۱۱ نمایش داده شده است. معیارهای مربوطه، زمان خیز<sup>۱</sup>، فراجهش<sup>۲</sup> و زمان نشست<sup>۳</sup> است.



شکل ۸-۱۱ پاسخ زمانی نوعی به ورودی پله، آی. ای. ای. ۱۹۹۰ میلادی [۷]

1. Rise Time
2. Overshoot
3. Settling Time

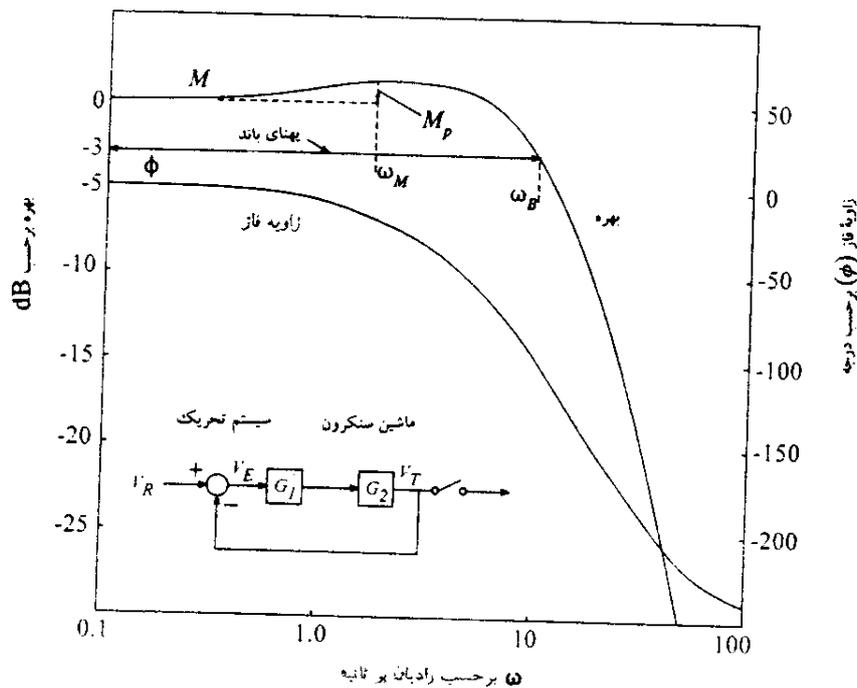
نمونه پاسخ فرکانسی حلقه- باز یک سیستم کنترل تحریک، زمانی که ژنراتور بدون بار باشد، در شکل ۸-۱۲ نشان داده شده است. معیارهای مربوط به پاسخ فرکانسی مدار باز، مقدار بهره  $(G)$  در فرکانس کم، فرکانس قطع  $(\omega_c)$ ، حد فاز  $(\phi_m)$ ، و حد بهره  $(G_m)$  است. مقادیر بزرگتر  $G$ ، نشاندهنده تنظیم بهتر و لتاژ در حالت ماندگار و مقادیر بزرگتر فرکانس قطع، نشاندهنده عملکرد و پاسخ سریعتر سیستم است. مقادیر بالای حد فاز و بهره، نمایشگر پایداری بیشتر حلقه- بسته سیستم کنترل است (در اینجا اشاره به پایداری سیستم کنترل تحریک و نه پایداری سیستم قدرت است).



شکل ۸-۱۲ پاسخ فرکانسی نوعی مدار باز سیستم کنترل تحریک با ژنراتور مدار باز آی. ای. ای. ۱۹۹۰ میلادی [۷]

1. Crossover Frequency
2. Phase Margin
3. Gain Margin

معمولاً هر اقدامی در بهبود یک معیار بر سایر معیارها تأثیر منفی می‌گذارد. به عنوان مثال، اگر بهره سیستم را افزایش دهیم، منحنی بهره در شکل ۸-۱۲ به سمت بالا تغییر موقعیت خواهد داد. این موضوع باعث افزایش بهره در فرکانس کم و فرکانس قطع خواهد شد اما در مقابل با کاهش حد فاز و بهره، تأثیر نامطلوب خواهد داشت. به طور کلی، حد فاز حدود  $40^\circ$  یا بیشتر و حد بهره حدود ۶ dB یا بیشتر را به عنوان معیارهای مطلوب یک سیستم تحریک پایدار و غیر نوسانی در نظر می‌گیرند. شکل ۸-۱۳، پاسخ فرکانسی سیستم حلقه- بسته را، زمانی که ژنراتور بدون بار باشد، نشان می‌دهد. معیارهای مورد نظر در این حالت، پهنای باند  $(\omega_B)$  و مقدار اوج  $M_p$  است.



شکل ۸-۱۳ پاسخ فرکانسی نوع حلقه بسته با ژنراتور مدار باز آی. ای. ای. ۱۹۹۰ میلادی [۷]

## 1. Bandwidth

مقدار زیاد  $M_p$  (بزرگتر از  $1/6$ )، نشاندهنده سیستمی نوسانی با فراجاهش زیاد در پاسخ گذرا است. به طور کلی، مقدار مطلوب  $M_p$  بین  $1/1$  تا  $1/5$  است. پهنای باند، معیاری مهم در پاسخ فرکانسی یک سیستم حلقه - بسته است. مقادیر بزرگتر، نشاندهنده عکس‌العمل سریعتر آن است. این معیار، تقریباً مشخصه نویز دایمی<sup>۱</sup> سیستم را نشان می‌دهد. به طور کلی، مقادیر مطلوب یک سیستم کنترل فیدبک به صورت زیر است:

- حد بهره : بزرگتر از ۶ dB
- حد فاز : بزرگتر از  $40^\circ$
- فراجاهش : ۵-۱۵٪
- $M_p$  :  $1/1 - 1/6$ .

نمی‌توان مقادیر مطلوب مشابهی را برای سایر معیارهای عملکرد سیگنال کوچک، از قبیل: زمان خیز، زمان نشست و پهنای باند بیان کرد. این معیارها، سرعت نسبی عملکرد کنترلی را نشان می‌دهند و معمولاً به کمک مشخصه‌های دینامیکی ماشین سنکرون تعیین می‌شوند. معیارهای بیان شده فوق، در مورد هر سیستم کنترلی که دارای یک حلقه عمده فیدبک باشد، صادق است. از این رو، این معیارها در مورد سیستم کنترل تحریک، در صورتی که ماشین سنکرون بدون بار باشد (مدار باز) یا یک بار محلی را تغذیه کند، می‌توانند به کار روند. می‌توان با توجه به این معیارها و روشهای محاسباتی مربوطه، از عملکرد پایدار سیستم کنترل تحریک با ژنراتور خارج از مدار، اطمینان حاصل کرد [۳]. از طرف دیگر، ماشینهای سنکرون متصل به سیستم قدرت، یک سیستم کنترل پیچیده چند حلقه‌ای، چند متغیره و درجه بالا را تشکیل می‌دهند. در چنین سیستمی، معیارهای بیان شده فوق صادق نیست. روش فضای حالت با استفاده از بررسی مقادیر ویژه<sup>۲</sup>، روش مناسبی در ارزیابی عملکرد چنین سیستمهای پیچیده‌ای است. این موضوع، به طور مشروح در فصل دوازدهم مطرح خواهد شد.

## ۵-۸ توابع کنترلی و حفاظتی

سیستمهای مدرن کنترل تحریک بسیار بیشتر از یک تنظیم کننده معمولی ولتاژ عمل می‌کنند و به منظور تأمین وظایفی که در بخش ۸-۱ مطرح شد، مجهز به توابع کنترلی، محدود کننده و حفاظتی هستند. این توابع و نحوه ارتباط بین آنها در شکل ۸-۱۴ نمایش داده شده است. هر سیستم تحریک ممکن است دارای بعضی از یا همه این توابع باشد که به وضعیت خاص کاربرد آن و نیز نوع تحریک کننده مورد استفاده بستگی دارد. فلسفه اصلی، این است که توابع کنترلی، کمیت‌های بخصوصی را در مقادیر مطلوب تنظیم نمایند و توابع محدود کننده، از خروج کمیت‌ها از محدوده مجازشان، جلوگیری نمایند. اگر هر یک از این محدود کننده‌ها به طور مطلوب عمل نمایند، در این صورت توابع حفاظتی، اجزای خاصی از سیستم یا واحد را از مدار خارج می‌کنند. در اینجا شرح مختصری از توابع گوناگون کنترلی و حفاظتی و اجزای آنها، که در شکل ۸-۱۴ نشان داده شده، بیان می‌شود.

### ۸-۵-۱ تنظیم کننده‌های جریان متناوب و مستقیم

وظیفه اصلی تنظیم کننده جریان متناوب، تأمین و حفظ ولتاژ استاتور ژنراتور است. به علاوه، سایر توابع کمکی کنترلی و حفاظتی مطابق با شکل ۸-۱۴ از طریق تنظیم کننده جریان متناوب عمل می‌کنند تا ولتاژ تحریک ژنراتور را کنترل نمایند.

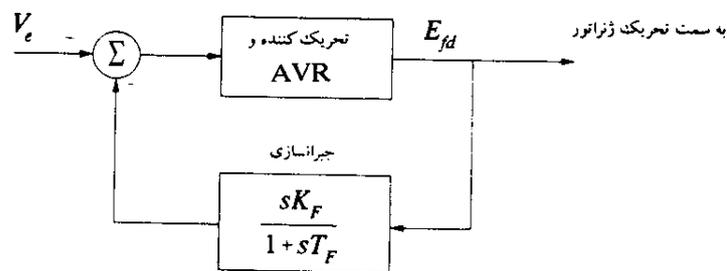
تنظیم کننده جریان مستقیم، ولتاژ تحریک ژنراتور را ثابت نگاه می‌دارد و معمولاً به کنترل دستی موسوم است. این تنظیم کننده، به طور عمده برای آزمایش و راه‌اندازی در وضعیتی که تنظیم کننده جریان متناوب خراب است، به کار می‌رود. در این وضعیت کاری، ولتاژ تحریک کنترل می‌شود و اپراتور با تنظیم آن، ولتاژ تحریک را تغییر می‌دهد. در بعضی سیستمهای تحریک، تنظیم خودکار نقطه تنظیم<sup>۱</sup> نیز امکان پذیر است. این موضوع باعث می‌شود که نقطه تنظیم دستی به طور پیوسته تغییر تحریک ژنراتور ناشی از تنظیم کننده جریان متناوب را ردیابی<sup>۲</sup> کند و به این ترتیب تغییرات شدید ولتاژ و توان راکتیو را، که هنگام خروج ناگهانی تنظیم کننده جریان متناوب از مدار پیش می‌آید، حداقل کند. البته باید اطمینان حاصل کرد که

1. Setpoint

2. Track



نشود، سیستم کنترل تحریک (با سیگنال فیدبک از ولتاژ استاتور ژنراتور) در حالتی که ژنراتور مدار باز باشد، ناپایدار خواهد بود. بنابراین، باید از پایدارساز به طور سری یا از طریق جبرانگر فیدبک، برای بهبود عملکرد دینامیکی سیستم کنترل تحریک استفاده شود. مرسومترین روش، استفاده از یک جبرانگر مشتقی مطابق با شکل ۸-۱۵ است. تأثیر جبرانگر این است که تغییر فاز را که در اثر تأخیرهای زمانی پیش می‌آید، در یک بازه انتخاب شده فرکانسی، حداقل سازد [۳]. این موضوع باعث عملکرد پایدار ژنراتور در حالت بی‌باری (به عنوان مثال درست قبل از سنکرون کردن آن با سیستم و یا بعد از یک باربرداری) می‌شود. می‌توان با تنظیم پارامترهای مدار فیدبک، عملکرد ژنراتور را در حال کار نیز بهبود بخشید. بستگی به نوع سیستم تحریک، ممکن است سطوح زیادی از پایدارساز شامل یک حلقه خارجی اصلی و حلقه‌های داخلی فرعی، وجود داشته باشد. سیستمهای کنترل تحریک استاتیکی تأخیر زمانی ندارند و از این رو به پایدارساز برای حصول اطمینان از پایداری خود در حالت بی‌باری ژنراتور نیاز ندارند (به انتهای مرجع ۲۱ مراجعه شود).



شکل ۸-۱۵ پایدارسازی سیستم کنترل تحریک با فیدبک مشتقی

### ۸-۵-۳ پایدارساز سیستم قدرت

پایدارساز سیستم قدرت وسیله‌ای است که با افزودن سیگنالهای کمکی به سیستم تحریک، عملکرد دینامیکی سیستم قدرت را بهبود می‌بخشد. این پایدارساز معمولاً از سیگنالهایی از قبیل سرعت محور، فرکانس و توان پایانه ژنراتور تغذیه می‌شود و بر عملکرد دینامیکی سیستم

قدرت با میرا کردن نوسانهای آن، تأثیر مطلوب می‌گذارد. این روش، روش بسیار مؤثری در تقویت عملکرد پایداری سیگنال کوچک سیستم است. اصول مربوط به عملکرد پایدارسازهای سیستم قدرت و ساختار و نحوه تنظیم آنها به طور مشروح در فصول دوازدهم و هفدهم بیان خواهد شد.

#### ۴-۵-۸ جبرانگر بار<sup>۱</sup>

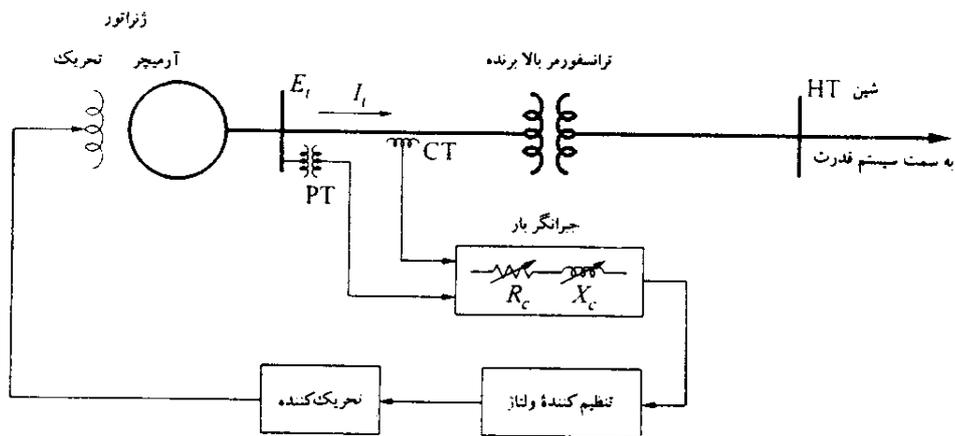
تنظیم کننده خودکار ولتاژ (AVR)<sup>۲</sup>، معمولاً ولتاژ پایانه استاتور ژنراتور را کنترل می‌کند. گاهی، از جبرانگر بار برای کنترل ولتاژی که نمایشگر ولتاژ نقطه‌ای درون یا خارج از ژنراتور است، استفاده می‌شود. این موضوع با افزودن مداری اضافی به حلقه تنظیم کننده خودکار ولتاژ مطابق با شکل ۸-۱۶ عملی می‌شود. جبرانگر، دارای مقاومت ( $R_c$ ) و راکتانس اندوکتیو ( $X_c$ ) قابل تنظیم است که می‌توانند امپدانس بین پایانه‌های ژنراتور و نقطه‌ای را که ولتاژ آن کنترل می‌شود، نشان دهند. با استفاده از این امپدانس و جریان اندازه‌گیری شده آرمیچر، افت ولتاژ محاسبه می‌شود و به ولتاژ پایانه افزوده یا از آن کم می‌گردد. دامنه ولتاژ جبران شده حاصل ( $V_c$ ) که به تنظیم کننده خودکار ولتاژ اعمال می‌شود، برابر است با:

$$V_c = \left| \vec{E}_t + (R_c + jX_c) \vec{I}_t \right| \quad (۸-۱)$$

با مثبت بودن  $R_c$  و  $X_c$  در معادله ۸-۱، افت ولتاژ دو سر جبرانگر به ولتاژ پایانه افزوده می‌شود. جبرانگر، ولتاژ را در نقطه‌ای درون ژنراتور تنظیم می‌کند و بنابراین شیب افقی ولتاژ<sup>۳</sup> را تأمین می‌کند. در این صورت از تقسیم صحیح توان راکتیو بین دو ژنراتوری که به یک شین متصلند و دارای یک ترانسفورمر بالابرنده مشترک هستند، اطمینان حاصل می‌شود. چنین ترکیبی معمولاً در مورد واحدهای آبی و واحدهای حرارتی ترکیبی متقاطع<sup>۴</sup> به کار می‌رود. جبرانگر با ایجاد تزویج مصنوعی بین ژنراتورها، به صورت یک جبرانگر جریان راکتیو عمل می‌کند. بدون این وسیله، یکی از ژنراتورها سعی در کنترل ولتاژ پایانه، کمی بالاتر از دیگری

1. Load Compensator
2. Automatic Voltage Regulator
3. Voltage Droop
4. Cross - compound

دارد. از این رو یک ژنراتور تمام توان راکتیو مورد نیاز را تأمین می‌کند در حالی که دیگری تا اندازه‌ای که حد زیر تحریک آن اجازه دهد، توان راکتیو جذب می‌نماید.



شکل ۸-۱۶ نمودار نمادین جبرانگر بار

اگر  $R_c$  و  $X_c$ ، منفی باشند، جبرانگر، ولتاژ را در نقطه‌ای خارج از پایانه‌های ماشین، تنظیم می‌کند. این شکل جبرانسازی، زمانی استفاده می‌شود که دو یا تعداد بیشتری واحد از طریق ترانسفورمرهای خود به هم متصل شده‌اند و جبرانگر، افت ولتاژ دو سر ترانسفورمر بالا برنده را جبران می‌کند. به طور نوعی، ۵۰ تا ۸۰ درصد امپدانس ترانسفورمر جبران می‌شود و بدین وسیله از شیب افقی ولتاژ در نقطه‌ای که ژنراتورها با هم موازی شده‌اند اطمینان حاصل می‌شود و آنها می‌توانند به طور رضایت بخشی به صورت موازی به کار خود ادامه دهند. اگر چه همیشه از این وسیله برای جبرانسازی افت ولتاژ ترانسفورمر استفاده می‌شود، لیکن معمولاً به جبرانگر افت خط<sup>۱</sup> موسوم است. به نظر می‌رسد که نام آن از جبرانگر مشابهی که بر روی تنظیم کننده‌های ولتاژ سیستم توزیع استفاده می‌شود (فصل یازدهم، بخش ۱۱-۲) اخذ شده است.

1. Line - drop Compensator

در اغلب حالات، مؤلفه مقاومت امپدانس قابل چشمپوشی است و مساوی صفر فرض می‌شود. صورتهای دیگری از جبرانگرهای جریان راکتیو و افت خط در مراجع ۸ و ۲۲ شرح داده شده‌اند.

### ۸-۵-۵ محدود کننده زیر تحریک<sup>۱</sup> [۲۳ تا ۲۶]

هدف از محدود کننده زیر تحریک آن است که از کاهش تحریک ژنراتور به سطحی که باعث خروج از حد پایداری سیگنال کوچک (حالت ماندگار) یا حد گرمایی ناحیه انتهایی هسته استاتور شود، جلوگیری کند. این محدود کننده به نامهای دیگری از قبیل محدود کننده زیر تحریک جریان راکتیو و محدود کننده حداقل تحریک<sup>۲</sup> نیز خوانده می‌شود.

سیگنال کنترلی این محدود کننده از ترکیبی از ولتاژ و جریان یا توان حقیقی و راکتیو ژنراتور تأمین می‌شود. حدود، با افزایش سیگنال بیش از یک مقدار مرجع، تعیین می‌شوند. روشهای مختلفی برای پیاده‌سازی این تابع وجود دارد. بعضی بر سیگنال خطای ولتاژ، ورودی به تنظیم کننده خودکار ولتاژ عمل می‌کنند. زمانی که سیگنال کنترلی به حد خود رسید، یک عنصر غیرخطی (مثل یک دیود) شروع به هدایت می‌کند و سیگنال خروجی محدود کننده، با سیگنالهای دیگر ترکیب شده، سیستم تحریک را کنترل می‌نماید. در نوع دیگری که بیشتر مرسوم است، سیگنال خروجی محدود کننده به یک مدار مزایده‌ای<sup>۳</sup> اعمال می‌شود که با توجه به اینکه هر یک از دو سیگنال تنظیم کننده ولتاژ و محدود کننده زیر تحریک بزرگتر باشند، کنترل را به آن سیگنال واگذار می‌کند. زمانی که حد تنظیم محدود کننده زیر تحریک فرا رسد، محدود کننده، تا زمانی که سیگنال زیر حد تنظیم خود برسد، کنترل کامل سیستم تحریک را به عهده می‌گیرد.

روشهای تنظیم مشخصه‌های محدود کننده زیر تحریک در مراجع ۲۳ تا ۲۵ بیان شده است.

1. Underexcitation Limiter

2. Minimum Excitation Limiter

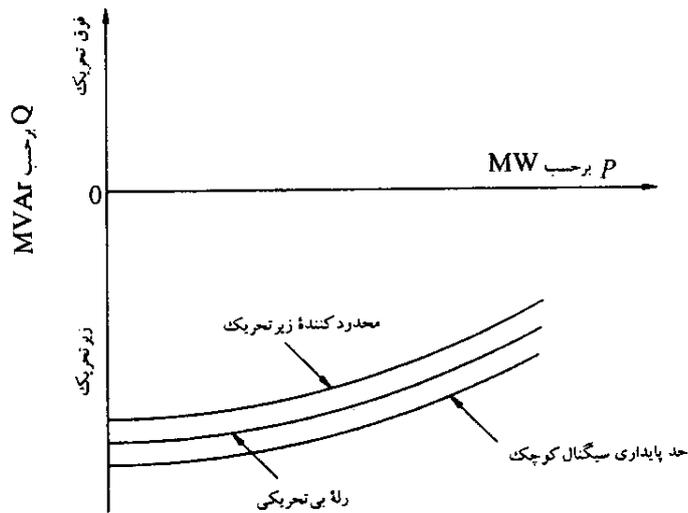
3. Auctioneering

تنظیم، براساس ملاحظات پایداری سیستم یا حد گرمایی هسته استاتور انجام می‌گیرد. بعلاوه باید عملکرد محدود کننده با تابع حفاظتی که بی‌تحریکی<sup>۱</sup> ژنراتور را کنترل می‌کند، هماهنگ شود (به فصل سیزدهم مراجعه شود). شکل ۸-۱۷ طریقی را که در آن مشخصه محدود کننده (در صفحه P-Q) معمولاً با حد پایداری سیگنال کوچک و مشخصه رله بی‌تحریکی، هماهنگ می‌شود، نشان می‌دهد [۲۸]. اگر قرار باشد که محدود کننده زیر تحریک برای حفاظت در مقابل حد گرمایی ناحیه انتهایی استاتور به کار رود، هماهنگی به صورت مشابهی صورت می‌پذیرد با این تفاوت که این بار به جای حد پایداری از حد گرمایی استفاده می‌شود.

اگر سیگنالهای ورودی به محدود کننده، ولتاژ و جریان استاتور باشند، مشخصه حدی آن در صفحه P-Q به شکل دایره خواهد بود (شکل ۸-۱۷). اگر سیگنالهای ورودی، توان حقیقی راکتیو باشند، در این صورت، مشخصه به صورت یک خط مستقیم است. باید دقت کرد که هنگام بروز یک اغتشاش گذرا، عملکرد محدود کننده بر عملکرد سیستم قدرت تأثیر نامطلوب نداشته باشد [۲۶ و ۲۷].

۸-۵-۶ محدود کننده فوق تحریک<sup>۱</sup>

هدف از محدود کننده فوق تحریک، حفاظت ژنراتور در مقابل گرم شدن بیش از حد در اثر جریان طولانی زیاد تحریک است. این محدود کننده به محدود کننده حداکثر تحریک<sup>۲</sup> نیز موسوم است.



شکل ۸-۱۷ هماهنگی بین UEL، رله LOE و حد پایداری

1. Overexcitation Limiter

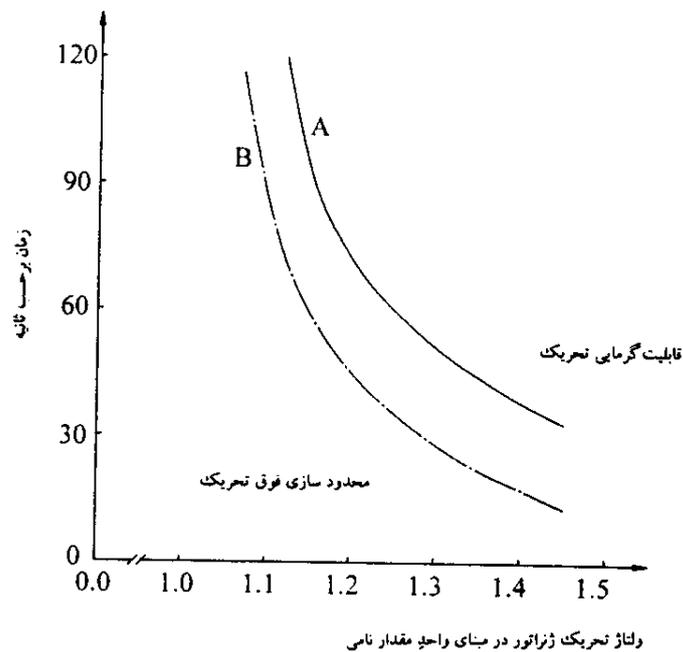
2. Maximum Excitation Limiter

سیم پیچ تحریک ژنراتور به گونه‌ای طراحی می‌شود که به طور پیوسته در مقدار جریانی که مربوط به شرایط بار نامی است، کار کند. بر طبق استاندارد ANSI C ۵۰/۱۳ (سال ۱۹۷۷ میلادی)، اضافه بار مجاز حرارتی سیم پیچ تحریک ژنراتورهای روتور استوانه‌ای، به کمک منحنی تیره شکل ۸-۱۸ تعیین می‌شود. منحنی از نقاط زیر عبور می‌کند:

زمان (ثانیه)	:	۱۰	۳۰	۶۰	۱۲۰
ولتاژ یا جریان تحریک	:	۲۰۸	۱۴۶	۱۲۵	۱۱۲

(برحسب درصد مقدار نامی)

به کارگیری عملی تابع محدودکننده فوق تحریک، به سازنده و زمان ساخت واحد بستگی دارد. محدودکننده‌های مربوط به دو سازنده در مراجع ۲۸ و ۲۹ شرح داده شده است.



شکل ۸-۱۸ هماهنگی محدود سازی فوق تحریک با قابلیت گرمایی تحریک

محدود کننده فوق تحریک معمولاً جریان زیاد تحریک را تشخیص می دهد و بعد از یک تأخیر زمانی با اعمال از طریق تنظیم کننده جریان متناوب، تحریک را به یک مقدار معلوم (به طور نوعی ۱۰۰ تا ۱۱۰ درصد جریان نامی تحریک) کاهش می دهد. اگر انجام این عمل، موفقیت آمیز نباشد، در این صورت تنظیم کننده جریان متناوب را از مدار خارج می کند و کنترل را به تنظیم کننده جریان مستقیم می سپارد و نقطه تنظیم را مجدداً در موقعیت مربوط به مقدار نامی قرار می دهد. اگر انجام این عمل باز هم مقدار تحریک را به حد معقولی نرساند، در این صورت، محدود کننده، تحریک تحریک کننده و واحد را از مدار خارج می کند.

در عمل از دو نوع تأخیر زمانی استفاده می شود: الف) زمان ثابت و ب) زمان معکوس. در نوع اول، محدود کننده بدون توجه به درجه فوق تحریک، زمانی که جریان تحریک از حد مشخصی برای زمان بخصوصی تجاوز کرد، عمل می نماید. در نوع دوم، محدود کننده با زمان تأخیری مطابق با قابلیت حرارتی تحریک (شکل ۸-۱۸) عمل می کند.

تحریک کننده هایی با ولتاژهای سقف بالا ممکن است به یک محدود کننده اضافی جریان تحریک مجهز شده باشند که از طریق تنظیم کننده جریان متناوب به طور لحظه ای عمل می کند و جریان تحریک را به حد کوتاه مدت آن (معمولاً ۱۶۰ درصد مقدار نامی) کاهش می دهد.

#### ۷-۵-۸ محدود کننده و حفاظت ولت بر هر تری

این توابع برای حفاظت ژنراتور و ترانسفورمر بالابرنده در مقابل شارهای مغناطیسی شدید حاصل از فرکانس پایین یا اضافه ولتاژ، به کار می روند. شارهای مغناطیسی شدید اگر تداوم یابند می توانند گرمای شدیدی ایجاد کنند و باعث تخریب ترانسفورمر واحد و هسته ژنراتور شوند. نسبت ولتاژ مبنای واحد به فرکانس مبنای واحد که به "ولت بر هر تری" موسوم است براحتی قابل اندازه گیری است و متناسب با شار مغناطیسی است. نمونه هایی از مقادیر مربوط برای ژنراتور و ترانسفورمر در جدول زیر نشان داده شده است.

					V/Hz(pu)	
۱/۰۵	۱/۱۰	۱/۱۵	۱/۲	۱/۲۵	GEN	زمان تخریب
∞	۲۰/۰	۶/۰	۱/۰	۰/۲	XFMR	به دقیقه
	∞	۲۰/۰	۵/۰	۱/۰		

اغلب، مقدار نامی ولتاژ پایین ترانسفورمر بالا برنده واحد، ۵ درصد کمتر از ولتاژ نامی ژنراتور است. بنابراین، حدود حفاظت ولت بر هرتز به وسیله ترانسفورمر دیکته می‌شود. اما اگر ولتاژهای نامی ژنراتور و ترانسفورمر یکسان باشد، حد ژنراتور تعیین کننده است.

محدود کننده ولت بر هرتز (که گاهی تنظیم کننده ولت بر هرتز هم خوانده می‌شود) زمانی که مقدار ولت بر هرتز از حد مشخصی فراتر رود، ولتاژ تحریک را کنترل می‌کند و ولتاژ ژنراتور را بدین وسیله محدود می‌نماید. در صورتی که مقدار ولت بر هرتز برای زمان مشخصی از حد معلومی فراتر رود، حفاظت ولت بر هرتز، ژنراتور را از مدار خارج می‌کند. معمولاً از حفاظت دو سطحی استفاده می‌شود، یکی با درجه تنظیم بالاتر ولت بر هرتز و زمان تنظیم کوتاهتر و دیگری با درجه تنظیم کمتر ولت بر هرتز و زمان تنظیم طولانی‌تر. بدین صورت حفاظت ولت بر هرتز می‌تواند به عنوان پشتیبان محدود کننده ولت بر هرتز به کار رود.

در بسیاری از واحدها، حفاظت ولت بر هرتز، شامل حفاظت اضافه ولتاژ بالای ۶۰ هرتز می‌شود.

### ۸-۵-۸ مدارهای اتصال کوتاه کننده تحریک<sup>۱</sup>

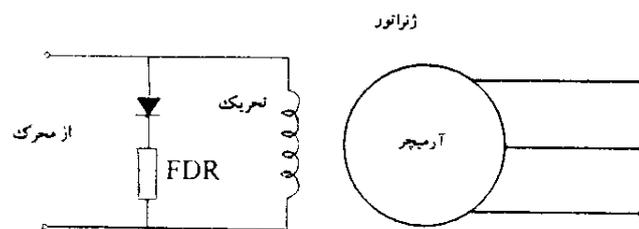
از آنجا که یکسو کننده‌ها نمی‌توانند در جهت مخالف، عمل نمایند جریان تحریک در تحریک کننده‌های جریان متناوب و استاتیکی نمی‌تواند منفی باشد. در حالت لغزش قطبها<sup>۲</sup> (قبل از خروج از حالت سنکرون شدن ژنراتور) و اتصال کوتاه در سیستم، ممکن است جریان القا شده در تحریک ژنراتور منفی شود. اگر مسیر مناسبی برای عبور این جریان منفی وجود نداشته باشد، ولتاژ بسیار بالایی در دو سر مدار تحریک ایجاد خواهد شد. از این رو، معمولاً مدار

1. Field Shorting Circuits

2. Pole - slipping

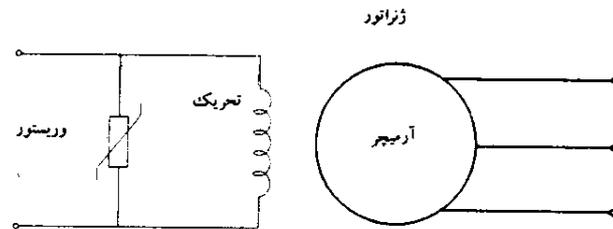
خاصی برای عبور این جریان منفی در نظر گرفته می‌شود تا از تحریک کننده عبور ننماید. معمولاً این مدار یا به صورت یک مدار اتصال کوتاه کننده تحریک موسوم به اهرم<sup>۱</sup> و با یک وریستور<sup>۲</sup> است [۸ و ۳۰].

اهرم از یک تریستور و یک مقاومت تخلیه تحریک (FDR)<sup>۳</sup> که به دو سر تحریک ژنراتور وصل می‌شود، تشکیل شده است (شکل ۸-۱۹). در حالتی که به علت فقدان مسیری برای گذر جریان القایی، اضافه ولتاژی ایجاد شود، تریستور عمل می‌نماید. در این صورت جریان تحریک القا شده از مقاومت عبور می‌کند.



شکل ۸-۱۹ مدار کنارگذر تحریک با استفاده از اهرم

وریستور یک مقاومت غیر خطی است. زمانی که آن را به دو سر تحریک ژنراتور وصل کنیم (شکل ۸-۲۰)، در حالتی که ولتاژهای القایی شدیدی ایجاد شود بخوبی تحریک را با ایجاد مسیر فرعی برای عبور جریان، حفظ می‌نماید. زمانی که ولتاژ تحریک کننده مقدار معمول را داشته باشد، مقاومت وریستور بسیار زیاد است و جریانی قابل چشمپوشی از آن عبور می‌کند. هنگامی که ولتاژ دو سر آن از حد مشخصی فراتر رود، مقاومت آن کاهش یافته، جریان عبوری از آن سریعاً افزایش می‌یابد. به این ترتیب وریستور، مسیر مناسبی را برای عبور جریان منفی القا شده ایجاد می‌نماید و ولتاژ دو سر تحریک و تحریک کننده را محدود می‌کند.



شکل ۸-۲۰ مدار کنارگذر تحریک با استفاده از ورستور

در بعضی حالات از مدار خاصی برای اتصال کوتاه کردن تحریک استفاده نمی‌شود. سیم پیچهای میراکننده مربوط به روتور، مسیر لازم را برای عبور جریانهای منفی القا شده ایجاد می‌نمایند که باعث می‌شود ولتاژ القا شده به سطحی محدود شود که تحریک و تحریک‌کننده ژنراتور قدرت تحمل آن را دارند. چون تحریک، اتصال کوتاه نشده است، لذا جریانی هم در جهت مخالف از آن عبور نمی‌کند.

### ۸-۶ مدلسازی سیستمهای تحریک

به دست آوردن مدلهای ریاضی سیستمهای تحریک برای ارزیابی وظایف مطلوب عملکرد، طراحی و هماهنگی مدارهای حفاظتی و کنترلی و مطالعات پایداری مربوط به برنامه ریزی و بهره‌برداری از سیستم قدرت، بسیار ضروری است. جزئیات مدل مورد نیاز بستگی به هدف هر مطالعه خاص دارد. با توجه به شکل ۸-۱۴، توابع کنترلی و حفاظتی که در مطالعات پایداری گذرا و سیگنال کوچک مهم است شامل: تنظیم‌کننده ولتاژ، پایدارساز سیستم قدرت و پایدارسازی سیستم کنترل تحریک می‌باشد. مدارهای حفاظتی و محدودکننده که در شکل، مشخص شده‌اند باید فقط در مطالعات پایداری میان مدت، دراز مدت و ولتاژ مدل شوند. بعضی از سیستمهای تحریک به محدودکننده عکس‌العمل سریع ولتاژ پایانه در ارتباط با پایدارسازهای سیستم قدرت مجهز هستند که در این صورت باید آنها را در مطالعات پایداری گذرا مدل نمود.

در این بخش، مدلسازی سیستمهای تحریک مطرح خواهد شد و در ابتدا سیستم مناسبی را در مبنای واحد و سپس مدل اجزای مختلف را بیان خواهیم کرد. در انتها، مدل کامل انواع انتخابی سیستمهای تحریک را نمایش خواهیم داد. مطالب مطرح در این بخش مطابق با گزارشهای کمیته‌های IEEE در خصوص مدلسازی سیستمهای تحریک است. مطالعات این کمیته‌ها از دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد و اولین گزارش آن در سال ۱۹۶۸ میلادی انتشار یافت [۱]. با توجه به پیشرفت در زمینه ساخت سیستمهای تحریک و تجربیات بهتر در زمینه مدلسازی، گزارش فوق در سال ۱۹۸۱ میلادی تعمیم داده شد و مدل‌های مناسبتری مطرح گردید [۴]. آخرین گزارش تکمیلی در سال ۱۹۹۲ میلادی انتشار یافته است [۸].

#### ۸-۶-۱ سیستم مبنای واحد

چندین گزینه در خصوص سیستم مبنای واحد برای جریان و ولتاژ خروجی تحریک کننده وجود دارد.

به نظر می‌رسد که اولین گزینه، سیستم مبنای واحدی باشد که برای مدار تحریک ماشین سنکرون به کار گرفته شد. از آنجا که این سیستم برای ساده سازی معادلات ماشین سنکرون مطرح گردید (فصل سوم، بخش ۳-۴)، بنابراین برای بیان کمیتهای خروجی تحریک کننده مناسب نیست زیرا در حالت معمول، ولتاژ خروجی تحریک کننده در مبنای واحد، بسیار کوچک و حدود ۰/۰۰۱ خواهد بود.

دومین گزینه با هدف ویژگیهای سیستم تحریک آن است که ولتاژ تحریک را در بارنامی مساوی ۱/۰ در مبنای واحد فرض نماییم. اما این گزینه برای مدلسازی ماشین سنکرون و سیستم تحریک در مطالعات سیستم، مناسب نیست.

سومین انتخاب این است که ولتاژ خروجی تحریک کننده را مساوی ۱/۰ در مبنای واحد و مساوی ولتاژ تحریکی بدانیم که لازم است ولتاژ پایانه نامی آرمیچر ماشین را بر روی خط فاصله هوایی ایجاد نماید. جریان خروجی ۱/۰ در مبنای واحد تحریک کننده، جریان تحریک مربوط به ماشین سنکرون است. این انتخاب، به علت تسهیل مطالعات در بررسی پایداری سیستمهای قدرت، به طور وسیعی استفاده می‌شود. در اینجا از این سیستم به عنوان سیستم

غیر متقابل مبنای واحد<sup>۱</sup> (در مقایسه با سیستم متقابل مبنای واحد در مطالعات و مدلسازی ماشینهای سنکرون) یاد می‌کنیم.

مدلهای سیستم تحریک با مدل ماشین سنکرون در پایانه‌های آرمیچر و تحریک، تلاقی خواهند داشت. سیگنالهای کنترلی ورودی به سیستم تحریک، کمیت‌های استاتور و سرعت روتور ماشین سنکرون خواهد بود. سیستمهای مبنای واحد استفاده شده برای بیان این متغیرهای ورودی با آنچه که در مورد مدلسازی ماشین سنکرون به کار می‌رود، یکسان است. بنابراین فقط برای متغیرهایی که مربوط به مدار تحریک است، تغییری در سیستم مبنای واحد لازم است.

اکنون رابطه بین مقادیر جریان و یا ولتاژ خروجی تحریک کننده را در مبنای واحد و بر پایه سیستم غیر متقابل با جریان و یا ولتاژ تحریک ماشین سنکرون، که در سیستم متقابل بر پایه  $L_{ad}$  (بخش ۳-۴) بیان شد، به دست می‌آوریم. در ماشین سنکرون و در حالت بی‌باری،  $i_d = i_q = 0$  است. با جایگزینی در معادلات ۳-۱۳۹، ۳-۱۴۰، ۳-۱۴۲ و ۳-۱۴۳ خواهیم داشت:

$$e_d = -\psi_q = -L_q i_q = 0 \quad (2-8)$$

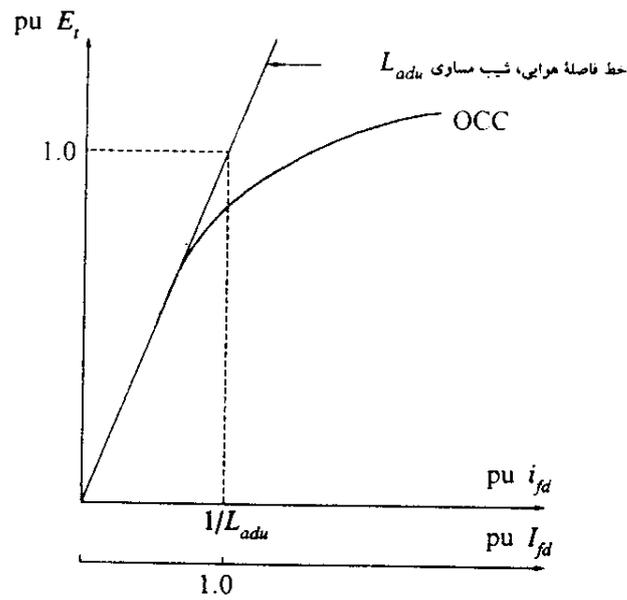
$$e_q = \psi_d = L_{ad} i_{fd} \quad (3-8)$$

با مراجعه به شکل ۸-۲۱ درمی‌یابیم که جریان تحریک مورد نیاز برای تبدیل ولتاژ پایانه استاتور به مقدار یک در مبنای واحد بر روی خط فاصله هوایی (شیب مساوی  $L_{adu}$ ) از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$E_t = e_q = L_{adu} i_{fd} = 1/0 \text{ pu} \quad (4-8)$$

بنابراین در سیستم متقابل مبنای واحد، جریان تحریک مورد نیاز  $i_{fd}$  برای ایجاد ولتاژ نامی استاتور بر روی خط فاصله هوایی برابر است با:

$$i_{fd} = \frac{1}{L_{adu}} \text{ pu}$$



شکل ۸-۲۱ مشخصه‌های مدار باز ماشین سنکرون

و ولتاژ تحریک مربوطه برابر است با :

$$e_{fd} = R_{fd} i_{fd} = \frac{R_{fd}}{L_{adu}} \text{ pu}$$

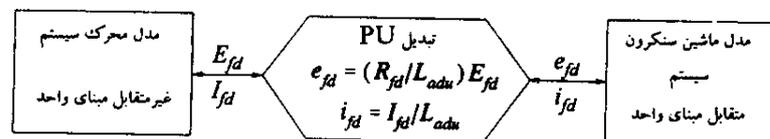
طبق تعریف، مقدار مربوط به جریان خروجی تحریک کننده ( $I_{fd}$ ) مساوی یک در مبنای واحد است. بنابراین :

$$I_{fd} = L_{adu} i_{fd} \quad (5-8)$$

و ولتاژ مربوط به تحریک کننده برابر است با :

$$E_{fd} = \frac{L_{adu}}{R_{fd}} e_{fd} \quad (6-1)$$

از نظر فیزیکی، ولتاژ و یا جریان خروجی تحریک کننده به ترتیب با ولتاژ و یا جریان تحریک ژنراتور، یکسان هستند. از این رو به منظور انتخاب سیستمهای مستقل مبنای واحد برای مدلسازی سیستمهای تحریک و ماشینهای سنکرون، تفاوتی بین مقادیر در مبنای واحد آنها قائل می‌شویم. این موضوع در شکل ۸-۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۸-۲۲ تبدیل مبنای واحد در حد فاصل سیستم تحریک و مدار تحریک ماشین سنکرون

در حالت ماندگار، مقادیر مبنای واحد  $E_{fd}$  و  $I_{fd}$  مساوی هستند. اما در حالت گذرا این دو با هم متفاوتند. به وسیله سیستم تحریک تعیین می‌شود و  $I_{fd}$  به وسیله دینامیک مدارهای تحریک مشخص می‌شود. نکات جالب چندی در خصوص تبدیل مبنای واحد فوق قابل ذکر است:

۱ - عامل  $L_{adu}/R_{fd}$  در معادله ۸-۶، مقدار حالت ماندگار  $G(s)$  (معادلات ۴-۱۴ و ۴-۱۷ از فصل چهارم) در حالت بدون اشباع است.

۲ - معادله ۴-۲۴ را می‌توان برحسب  $\Delta E_{fd}$  به صورت زیر نوشت:

$$\Delta \Psi_d(s) = \frac{1 + sT_{kd}}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \Delta E_{fd} \quad (۷-۸ \text{ الف})$$

$$= \bar{G}(s) \Delta E_{fd}$$

مقدار حالت ماندگار  $\bar{G}(s)$  مساوی ۱/۰ است و رابطه یک به یکی بین  $\Psi_d$  و  $E_{fd}$  وجود

دارد.

با چشمپوشی از سیم پیچهای میراکننده، معادله ۷-۸ "الف" به صورت زیر خواهد شد:

$$\Delta \Psi_d(s) = \frac{1}{1 + sT'_{d0}} \Delta E_{fd} \quad (7-8 \text{ ب})$$

۳- با استفاده از معادلات حالت ماندگاری که در بخش ۳-۶-۳ به دست آمد، در حالت ژنراتور مدار باز داریم:

$$\Delta \Psi_d = \Delta e_q = \Delta E_t$$

که با جایگزینی در معادله ۷-۸ "ب"، تابع تبدیل زیر برای ژنراتور مدار باز به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta E_t(s)}{\Delta E_{fd}(s)} = \frac{1}{1 + sT'_{d0}} \quad (7-8 \text{ ج})$$

#### مثال ۱-۸

ژنراتور ۰/۹۰۵۵۵ MVA ، ضریب توان، ۲۴ KV مثالهای ۱-۳ ، ۲-۳ و ۳-۳ از فصل سوم، دارای پارامترهای زیر در مبنای واحد است:

$$\begin{aligned} L_{adu} &= 1/66 & L_{aqu} &= 1/61 & L_1 &= 0/15 \\ L_{fd} &= 0/165 & R_{fd} &= 0/0006 & R_a &= 0/003 \end{aligned}$$

الف) جریان مورد نیاز تحریک برای ایجاد ولتاژ نامی استاتور ( $E_t$ ) بر روی خط فاصله هوایی مساوی A ۱۳۰۰ و ولتاژ مربوطه تحریک برابر ۹۲/۹۵ V است. در سیستم غیر متقابل مبنای واحد، مقادیر پایه  $E_{fd}$  و  $I_{fd}$  و در سیستم متقابل مبنای واحد، مقادیر پایه  $e_{fd}$  و  $i_{fd}$  را تعیین کنید.

ب) زمانی که ژنراتور، مگاوات آمپر نامی خود را در ضریب توان و ولتاژ پایانه نامی تحویل می‌دهد، مقادیر مبنای واحد  $E_{fd}$  و  $I_{fd}$  را تعیین نمایید. فرض کنید که در این حالت مقادیر ضرایب اشباع  $K_{sd}$  و  $K_{sq}$  ، مساوی ۰/۸۳۵ است.

## حل

الف) طبق تعریف، مقادیر پایه  $E_{fd}$  و  $I_{fd}$  به ترتیب مساوی ولتاژ و جریان تحریک مورد نیاز برای ایجاد ولتاژ نامی بر روی خط فاصله هوایی است. بنابراین:

$$E_{fd \text{ base}} = 92/95 \text{ V}$$

$$I_{fd \text{ base}} = 1300 \text{ A}$$

از معادلات ۵-۸ و ۶-۸، مقادیر پایه  $e_{fd}$  و  $i_{fd}$  برابر است با:

$$\begin{aligned} i_{fd \text{ base}} &= L_{adu} I_{fd \text{ base}} \\ &= 1/66 \times 1300 = 2158 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{fd \text{ base}} &= (L_{adu}/R_{fd}) E_{fd \text{ base}} \\ &= \left( \frac{1/66}{0.0006} \right) 92/95 = 257/2 \text{ kV} \end{aligned}$$

طبق انتظار، مقادیر پایه فوق با مقادیری که در مثال ۳-۱ محاسبه شد، مطابقت دارند. ب) در شرایط نامی خروجی، از نتایج مثال ۳-۲ داریم:

$$e_{fd} = 0.000939 \text{ pu}$$

$$i_{fd} = 1/565 \text{ pu}$$

پس مقادیر مبنای واحد  $E_{fd}$  و  $I_{fd}$  برابرند با:

$$\begin{aligned} E_{fd} &= (L_{adu}/R_{fd}) e_{fd} \\ &= \left( \frac{1/66}{0.0006} \right) 0.000939 = 2/598 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{fd} &= L_{adu} i_{fd} \\ &= 1/66 \times 1/565 = 1/598 \text{ pu} \end{aligned}$$

## تعیین دما

ولتاژ پایه خروجی تحریک کننده به مقاومت تحریک ماشین سنکرون بستگی دارد که این مقاومت، خود به دمای تحریک وابسته است. در واحدهای حرارتی (با افزایش دمای کار بیش از  $60^{\circ}\text{C}$ )، دمای استاندارد برای محاسبه ولتاژ پایه خروجی تحریک کننده  $100^{\circ}\text{C}$  و برای واحدهای آبی (با افزایش دمای کاری  $60^{\circ}\text{C}$  یا کمتر)، این رقم،  $75^{\circ}\text{C}$  است. اما باید در استفاده از این مقادیر در مدلسازی سیستمهای تحریک، دقت کافی را مبذول داشت. برای مثال باید مقدار مقاومت تحریک مورد استفاده تا حد ممکن به مقدار آن در حالت شبیه سازی، نزدیک باشد. مقدار  $T_{H'}$  نیز باید با این مقدار مقاومت تحریک مطابقت داشته باشد.

تصحیح مقدار مقاومت تحریک با توجه به دمای مشخص شده کار، طبق رابطه زیر به دست

می آید [۳۱]:

$$R_s = R_t \left( \frac{t_s + k}{t_t + k} \right) \quad (8-8)$$

که

$t_s$ : دمای مشخص شده کار برحسب  $^{\circ}\text{C}$ ؛

$t_t$ : دمایی (برحسب  $^{\circ}\text{C}$ ) که در آن، مقدار مقاومت، معلوم، یا اندازه گیری شده؛

$R_s$ : مقاومت سیم پیچ در دمای  $t_s$ ؛

$R_t$ : مقاومت سیم پیچ در دمای  $t_t$ ،

است. ثابت  $k$  نیز بستگی به جنس سیم پیچ دارد که برای مس خالص، مقدار آن مساوی  $234/5$  و برای ترکیبی از مس و آلومینیوم که ۶۲ درصد آن مس خالص باشد، این رقم مساوی  $225$  است.

## مثال ۸-۲

مقدار مبنای واحد  $R_{FH}$  یک توربوژنراتور بخار در  $75^{\circ}\text{C}$  مساوی با  $0/00063$  و مقدار  $T_{H'}$  مساوی با  $7/6125$  است. در دمای استاندارد  $100^{\circ}\text{C}$ ، ولتاژ پایه خروجی تحریک کننده مساوی  $105/575$  است. اگر ژنراتور در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  کار کند، مقادیر  $R_{FH}$ ،  $T_{H'}$  و پایه  $E_{FH}$  را در این دما محاسبه کنید. فرض کنید که  $k$  مربوط به جنس سیم پیچ مساوی  $234/5$  باشد.

حل

در دمای  $60^{\circ}\text{C}$ ، مقاومت تحریک برابر است با:

$$\begin{aligned} R_{fd60} &= 0.00063 \frac{234/5 + 60}{234/5 + 75} \\ &= 0.0006 \text{ pu} \end{aligned}$$

ثابت زمانی  $T'_{d0}$  به طور معکوس با  $R_{fd}$  متناسب است. بنابراین در دمای  $60^{\circ}\text{C}$ ،  $T'_{d0}$  برابر است با:

$$\begin{aligned} T'_{d0} &= T'_{d0} \frac{R_{fd75}}{R_{fd60}} \\ &= 7/6125 \times \frac{0.00063}{0.0006} = 8/0 \text{ s} \end{aligned}$$

مقدار پایه  $E_{fd}$  مستقیماً با  $R_{fd}$  متناسب است. بنابراین در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  داریم:

$$\begin{aligned} \text{پایه } E_{fd60} &= \text{پایه } E_{fd100} \left[ \frac{234/5 + 60}{234/5 + 100} \right] \\ &= 105/575 \times 0/8804 = 92/957 \end{aligned}$$

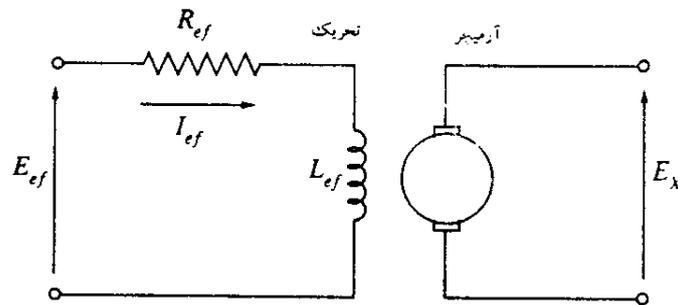
### ۸-۶-۲ مدلسازی اجزای سیستم تحریک

اجزای اصلی انواع گوناگون سیستمهای تحریک شامل تحریک کنندههای جریان مستقیم (تحریک خودی یا تحریک مستقل)، تحریک کنندههای جریان متناوب، یکسوسازها (با یا بدون کنترل)، تقویت کنندههای مغناطیسی چرخان یا الکترونیکی، مدارهای فیدبک پایدارساز سیستم تحریک، مدارهای اندازه گیری و پردازش سیگنالهاست. در اینجا مدل مربوط به هر جزء را شرح می دهیم. در بخش بعد، مدلسازی سیستم کامل تحریک را بیان خواهیم کرد:

#### الف) تحریک کننده جریان مستقیم با تحریک مستقل

مدل مدار تحریک کننده در شکل ۸-۲۳ نشان داده شده است. برای مدار تحریک این جزء

می توان نوشت :



شکل ۸-۲۳ تحریک کننده جریان مستقیم با تحریک مستقل

$$E_{ef} = R_{ef} I_{ef} + \frac{d\Psi}{dt} \quad (9-8)$$

که :

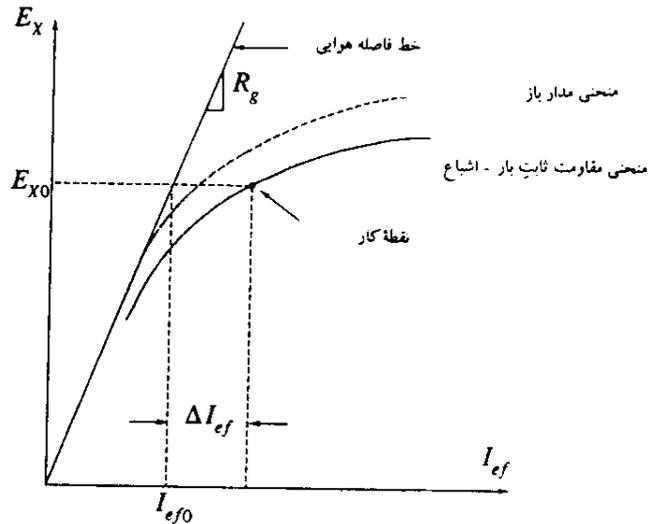
$$\Psi = L_{ef} I_{ef}$$

با چشمپوشی از شار ناشی تحریک، ولتاژ خروجی تحریک کننده،  $E_x$ ، برابر است با :

$$E_x = K_x \Psi \quad (10-8)$$

که  $K_x$ ، بستگی به سرعت و ترکیب سیم پیچ آرمیچر تحریک کننده دارد. به علت اشباع، ولتاژ خروجی  $E_x$  تابعی غیر خطی از جریان تحریک کننده،  $I_{ef}$ ، است. روش مرسوم در مدلسازی تحریک کننده جریان مستقیم [۱ و ۴] آن است که تأثیر اشباع و تنظیم بار را با یکدیگر ترکیب کرده، به طور تقریبی آن را با منحنی اشباع بار مقاومت ثابت<sup>۱</sup> مطابق با شکل ۸-۲۴ نشان دهند. خط فاصله هوایی بر بخش پایینی خطی منحنی مدار باز اشباع، مماس است. اگر  $R_g$ ،

1. Constant — resistance Load — saturation Curve



شکل ۸-۲۴ منحنی بار - اشباع تحریک کننده

شیب خط فاصله هوایی و  $\Delta I_{ef}$ ، نشاندهنده انحراف منحنی اشباع بار از خط فاصله هوایی باشد، می توان با توجه به شکل ۸-۲۴ نوشت:

$$I_{ef} = \frac{E_X}{R_g} + \Delta I_{ef} \quad (11-8)$$

که  $\Delta I_{ef}$ ، تابعی غیر خطی از  $E_X$  است و می توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta I_{ef} = E_X S_e(E_X) \quad (12-8)$$

که  $S_e(E_X)$ ، تابع اشباع وابسته به  $E_X$  است.

از معادلات ۸-۹ تا ۸-۱۲ داریم:

$$E_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} E_X + R_{ef} S_e(E_X) E_X + \frac{1}{K_X} \frac{dE_X}{dt} \quad (13-8)$$

معادله فوق، رابطه بین خروجی  $E_X$  و ولتاژ ورودی  $E_{ef}$  را بیان می‌کند. یک سیستم مناسب مبنای واحد برای این معادله آن است که مقادیر پایه  $E_X$  و  $I_{ef}$  را مساوی مقادیری بگیریم که برای ایجاد ولتاژ نامی ماشین سنکرون روی خط فاصله هوایی لازم است. بنابراین:

$$\begin{aligned} E_{X \text{ base}} &= E_{fd \text{ base}} \\ I_{ef \text{ base}} &= E_{fd \text{ base}} / R_g \quad (14-8) \\ R_{g \text{ base}} &= R_g \end{aligned}$$

با تقسیم طرفین معادله ۸-۱۳ بر  $E_{X \text{ base}}$ ، داریم:

$$\frac{E_{ef}}{E_{X \text{ base}}} = \frac{R_{ef}}{R_S} \frac{E_X}{E_{X \text{ base}}} + R_{ef} S_e(E_X) \frac{E_X}{E_{X \text{ base}}} + \frac{1}{K_X} \frac{d}{dt} \left[ \frac{E_X}{E_{X \text{ base}}} \right]$$

که در شکل مبنای واحد، به صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{E}_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} \bar{E}_X [1 + \bar{S}_e(\bar{E}_X)] + \frac{1}{K_X} \frac{d\bar{E}_X}{dt} \quad (15-8)$$

در معادله فوق  $\bar{S}_e(\bar{E}_X)$  تابع اشباع مبنای واحد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{S}_e(\bar{E}_X) = \frac{\Delta \bar{I}_{ef}}{\bar{E}_X} = R_g S_e(E_X) \quad (16-8)$$

از شکل ۸-۲۵، زمانی که  $E_X$  و  $I_{ef}$  در مبنای واحد بیان شده باشند، تابع اشباع مبنای واحد به صورت زیر خواهد بود [۴]:

$$\bar{S}_e(\bar{E}_X) = \frac{A-B}{B} \quad (17-8)$$

می‌توان پارامتر  $K_X$  را از معادله ۸-۱۰ به صورت زیر نوشت:

$$K_X = \frac{E_X}{\Psi} = \frac{E_X}{L_{ef} I_{ef}} = \frac{R_g \bar{E}_X}{L_{ef} \bar{I}_{ef}}$$

در هر نقطه کار ( $E_X$  و  $I_{ef}$ )، فرض کنید که:

$$L_{fu} = L_{ef} \frac{\bar{I}_{ef}}{\bar{E}_X} \quad (18-8)$$

بنابراین  $K_X = R_g / L_{fu}$  است با جایگزینی در معادله ۱۵-۸ داریم:

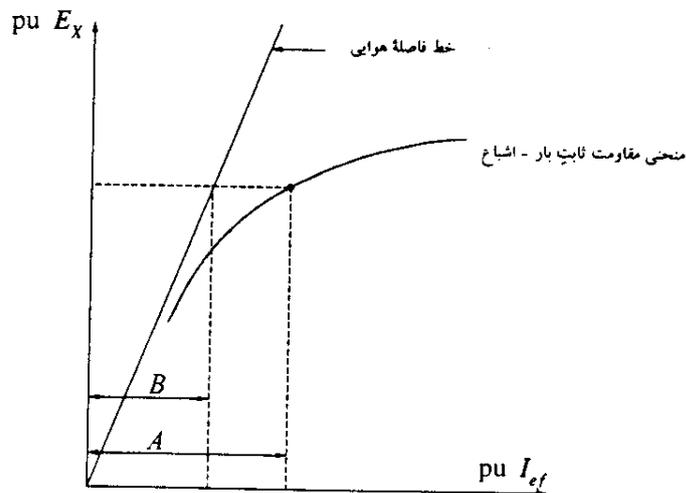
$$\bar{E}_{ef} = K_E \bar{E}_X + S_E(\bar{E}_X) \bar{E}_X + T_E \frac{d\bar{E}_X}{dt} \quad (19-8)$$

که:

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g}$$

$$T_E = \frac{L_{fu}}{R_g} \quad (20-8)$$

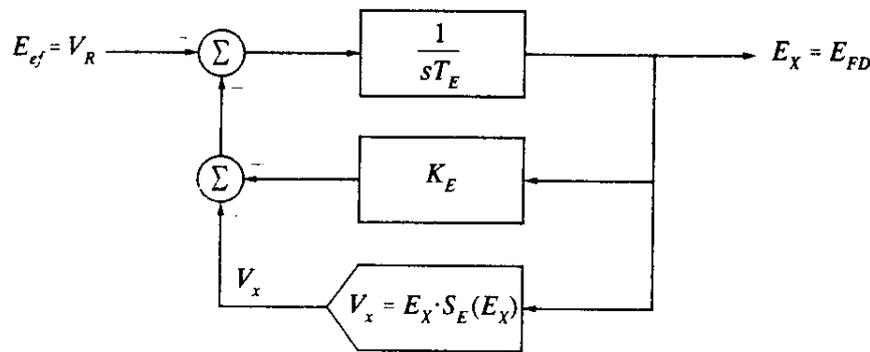
$$S_E(\bar{E}_X) = \bar{S}_e(\bar{E}_X) \frac{R_{ef}}{R_g}$$



شکل ۸-۲۵ مشخصه اشباع تحریک کننده

معادله ۱۹-۸ بیانگر رابطه ورودی-خروجی تحریک کننده است. تحریک کننده‌های با تحریک

مستقل، ولتاژ ورودی  $E_{ef}$ ، خروجی تنظیم کننده  $(V_R)$  است. ولتاژ خروجی یک تحریک کننده جریان مستقیم  $(E_X)$ ، مستقیماً به تحریک ماشین سنکرون اعمال می شود. بنابراین می توان نمودار بلوکی تحریک کننده را مطابق شکل ۸-۲۶ رسم کرد. در این شکل، تمام مقادیر در مبنای واحد بیان شده اند اما برای سادگی، بالانویس - حذف شده است.



$$\text{نمایش مرسوم: } V_X = A_{EX} e^{B_{EX} E_X}$$

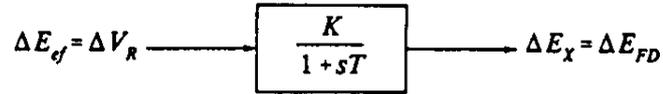
شکل ۸-۲۶ نمودار بلوکی تحریک کننده جریان مستقیم

تنظیم مقاومت مدار تحریک  $R_{ef}$  بر  $K_E$  و تابع اشباع  $S_E(E_X)$  تأثیر می گذارد اما بر زمان انتگرالگیر  $T_E$  تأثیری ندارد.

چندین رابطه ریاضی مناسب وجود دارد که میتوانند به طور تقریبی تأثیر اشباع تحریک کننده را نشان دهند. یکی از این روابط، تابع نمایی زیر است:

$$V_X = E_X S_E(E_X) = A_{EX} e^{B_{EX} E_X} \quad (۸-۲۱)$$

نمودار بلوکی شکل ۸-۲۶ وسیله مناسبی برای نمایش تحریک کننده های جریان مستقیم در مطالعات پایداری است. اما ظاهراً نمی توان از آن بهره و ثابت زمانی مؤثر را مشاهده کرد. زمانی که نمودار را ساده کنیم، در حالت سیگنال کوچک به صورت زیر در می آید:



در هر نقطه کار با  $E_x = E_{FD} = E_{FD.}$ ، و در حالت سیگنال کوچک، مقادیر مؤثر بهره (K) و ثابت زمانی (T) تحریک کننده به صورت زیر است:

$$K = \frac{1}{B_{EX} S_E(E_{FD.}) + K_E} \quad (۲۲-۸)$$

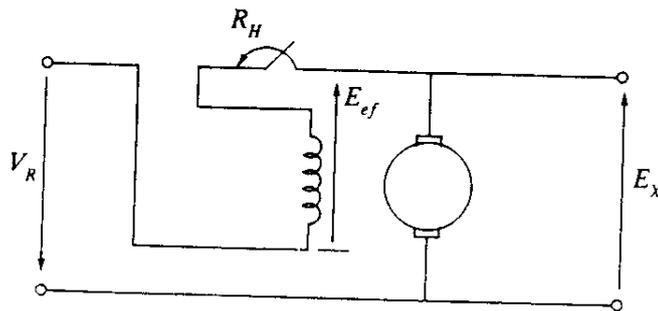
$$T = \frac{T_E}{B_{EX} S_E(E_{FD.}) + K_E} \quad (۲۳-۸)$$

که  $S_E(E_{X.}) = A_{EX} e^{B_{EX} E_{FD.}}$  است.

ب) تحریک کننده جریان مستقیم با تحریک خودی

شکل ۲۷-۸ مدل مداری یک تحریک کننده جریان مستقیم با تحریک خودی را نشان می دهد. در این مدار، ولتاژ خروجی تنظیم کننده ( $V_R$ ) به طور سری با تحریک موازی تحریک کننده قرار دارد. بنابراین ولتاژ مبنای واحد دو سر تحریک آن (بالانویس - حذف شده است) برابر است با:

$$E_{ef} = V_R + E_x \quad (۲۴-۸)$$



شکل ۲۷-۸ تحریک کننده جریان مستقیم با تحریک خودی

رابطه بین مقادیر مبنای واحد  $E_{ef}$  و  $E_X$  که در مورد تحریک کننده با تحریک مستقل به دست آمد، در این حالت نیز صدق می‌کند. با جایگزینی  $E_{ef}$  از معادله ۸-۲۴ در معادله ۸-۱۵، خواهیم داشت:

$$V_R + E_X = \frac{R_{ef}}{R_g} E_X [1 + S_c(E_X)] + \frac{1}{K_X} \frac{dE_X}{dt}$$

که می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$V_R = K_E E_X + S_E(E_X) E_X + T_E \frac{dE_X}{dt} \quad (25-8)$$

که:

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} - 1$$

$$T_E = \frac{L_{fu}}{R_g} \quad (26-8)$$

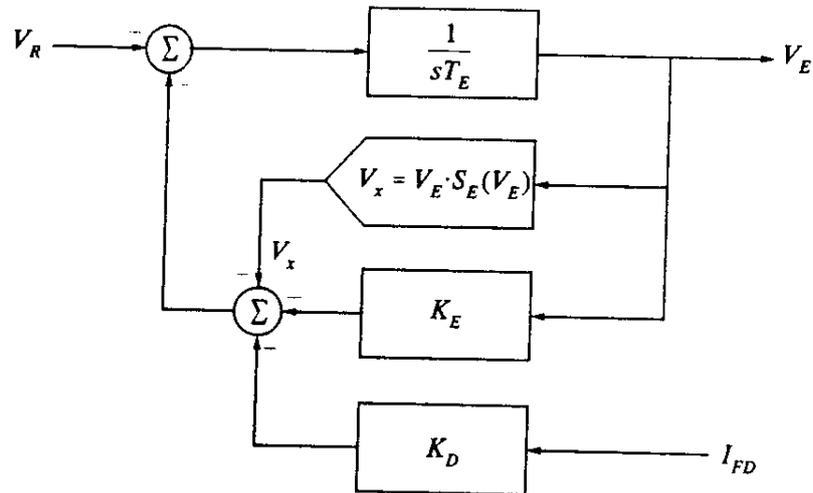
$$S_E = S_c(E_X) \frac{R_{ef}}{R_g}$$

نمودار بلوکی شکل ۸-۲۶ در مورد تحریک کننده جریان مستقیم با تحریک خودی نیز صادق است. اما مقدار  $K_E$  در این حالت مساوی با  $1 - R_{ef}/R_g$  (در مقایسه با  $R_{ef}/R_g$  در تحریک کننده مستقل) است.

معمولاً اپراتورهای نیروگاه به طور متناوب نقطه تنظیم رتوستای تنظیم کننده ولتاژ را تنظیم می‌کنند تا خروجی تنظیم کننده ولتاژ، صفر شود که در حقیقت بدین معناست که مقدار  $K_E$  به گونه‌ای انتخاب شود که مقدار اولیه  $V_R$  مساوی صفر شود. بنابراین پارامتر  $K_E$  ثابت نیست و به نقطه کار، بستگی دارد.

### ج) تحریک کننده‌های جریان متناوب و یکسوسازها

مرجع ۸، نمودار شکل ۸-۲۸ را برای نمایش تحریک کننده‌های جریان متناوب (به جز بخش یکسوسازی) در مطالعات پایداری سیستمهای بزرگ قدرت پیشنهاد نموده است.



شکل ۸-۲۸ نمودار بلوکی تحریک کننده جریان متناوب

ساختار کلی مدل، شبیه مدل تحریک کننده جریان مستقیم است اما در این حالت، تنظیم بار به علت اثر عکس العمل آرمیچر به طور مشخص در نظر گرفته شده است و جهت تعریف تابع اشباع  $S_E$ ، از هیچ منحنی بی‌باری اشباع استفاده نشده است. ولتاژ داخلی تحریک کننده  $V_E$ ، ولتاژ بی‌باری مربوط به تابع اشباع است. جریان تحریک ژنراتور اصلی،  $I_{FD}$ ، نمایشگر جریان بار تحریک کننده و سیگنال فیدبک  $K_D I_{FD}$ ، نماینده تأثیر عکس العمل آرمیچر است. پارامتر  $K_D$ ، به راکتانسهای سنکرون و گذرای تحریک کننده جریان متناوب بستگی دارد [۳۲]. شکل ۸-۲۹ نحوه محاسبه تابع اشباع  $S_E$  را برای یک مقدار مشخص  $V_E$  نشان می‌دهد. تابع اشباع در مبنای واحد به صورت زیر است:

$$S_E(V_E) = \frac{A-B}{B} \quad (27-8)$$

هر رابطه ریاضی مناسب را می‌توان برای نمایش تابع اشباع به کار برد. مشابه با تحریک کننده‌های جریان مستقیم، معمولاً از تابع نمایی معادله ۸-۲۱ برای نمایش رابطه  $V_x = V_E S_E(V_E)$  استفاده می‌شود.

