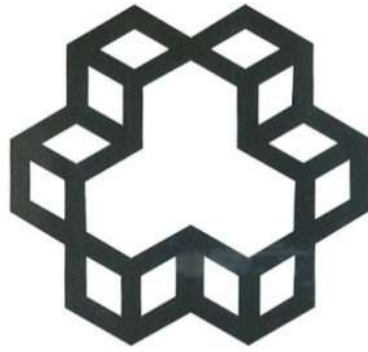




دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق

دینامیک سیستم‌های قدرت



دکتر سید محمد تقی بطحایی

(دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی)

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست شکل ها	۶
پیش گفتار	۹
فصل اول : مقدمه	۱۰
۱-۱- سیستم های خطی و پایداری آن	۱۰
۲-۱- معیارهای پایداری در سیستم های خطی	۱۲
۳-۱- نوشتن معادلات دیفرانسیل غیرخطی به فرم فضای حالت	۱۲
۴-۱- خطی سازی سیستم های غیرخطی	۱۵
۵-۱- خطی سازی تجهیزات سیستم قدرت	۱۵
۱-۵-۱- روش تحمیل شرایط به موتور dc تحریک مستقل جهت خطی سازی	۱۷
تکالیف فصل اول	۲۱
تمرین های فصل اول	۲۲
پروژه های پیشنهادی فصل اول	۲۳
فصل دوم : معرفی مسائل دینامیک شبکه های قدرت	۲۴
۱-۲- تعاریف پایداری	۲۴
۱-۱-۲- نوسانات فرکانس پایین	۲۴
۲-۱-۲- پایداری دینامیکی و گذرا	۲۴
۳-۱-۲- نوسانات پیچشی و تشدید زیر سنکرون SSR	۳۳
۴-۱-۲- ناپایداری ولتاژ Voltage Collapse	۳۳
۲-۲- طبقه بندی پدیده های گذرا و دینامیکی در سیستم قدرت	۳۶
تکالیف فصل دوم	۳۸
تمرین های فصل دوم	۳۹
پروژه های پیشنهادی فصل دوم	۴۰
فصل سوم : مدل سازی اجزای سیستم قدرت	۴۱
۱-۳- ماشین سنکرون	۴۱

- ۳-۱-۱- مدل ریاضی ماشین سنکرون و معادلات ولتاژ (غیرالکتریکی) ۴۲
- ۳-۱-۲- مدل پارک ماشین سنکرون و معادلات ولتاژ ۴۵
- ۳-۱-۳- مدل مکانیکی ماشین سنکرون ۴۶
- ۳-۲- سیستم تحریک ۴۷
- ۳-۲-۱- بررسی دینامیکی سیستم های تحریک بدون جاروبک ۴۸
- ۳-۲-۲- بررسی تاثیر سیستم تحریک در پایداری مولد ۴۹
- ۳-۲-۳- بررسی حلقه ی کنترل ولتاژ مولد dc تحریک مستقل با جبران سازها ۵۱
- ۳-۳- مدل سازی گاورنر ۵۱
- ۳-۴- مدل سازی توربین ۵۲
- ۳-۵- مدل توربوژنراتور متصل به شین بی نهایت ۵۳
- ۳-۶- میکروماشین جهت مطالعات دینامیکی ۵۶
- ۳-۶-۱- دینامیک ولتاژ سازی در مختصات دو محوری و سه محوری ۵۶
- ۳-۷- مدل خطی هفرون فیلیپس ماشین سنکرون ۵۹
- ۳-۷-۱- حالت بدون تحریک ۶۲
- ۳-۷-۲- حالت حضور تحریک درجه یک ۶۳
- ۳-۸- معادلات حالت سیستم تک ماشینه ۶۴
- ۳-۹- طراحی PSS برای یک سیستم تک ماشینه ۶۵
- ۳-۹-۱- مثال طراحی ۶۸
- ۳-۱۰- یادآوری تقویت کننده ی عملیاتی OP-AMP و تحقق PSS آنالوگ به کمک آن ۶۹
- ۳-۱۰-۱- ساخت انواع تقویت کننده ها با OP-AMP ۷۰
- ۳-۱۰-۲- ساخت انواع کنترل کننده ها با OP-AMP ۷۳
- ۳-۱۱- گشتاور الکتریکی در مدل هفرون فیلیپس ۷۵
- ۳-۱۲- قضیه ی لیاپانوف ۷۷
- ۳-۱۲-۱- روش کرازوفسکی ۷۸
- ۳-۱۲-۲- تابع انرژی ۷۹
- ۳-۱۳- طراحی PSS تنظیمی به روش مدل مرجع با قانون تطابق لیاپانوف ۸۳

۸۳	۳-۱۴- روش کنترل پذیر کردن یک سیستم غیر قابل کنترل
۸۶	۳-۱۵- طراحی PSS به روش (LOC) Linear Optimal Control
۸۹	۳-۱۶- فیلتر کالمن (Kalman Filter) و کاربرد آن در صنعت برق
۹۱	۳-۱۶-۱- تخمین گر حالت سیستم دینامیکی همراه با نویز
۹۲	۳-۱۶-۲- کنترل کننده ی (LQG) Linear Qudratic Gaussian
۹۴	تکالیف فصل سوم
۹۶	تمرین های فصل سوم
۹۷	پروژه های پیشنهادی فصل سوم
۹۸	فصل چهارم : دینامیک شبکه های قدرت چند ماشینه
۹۸	۴-۱- روش های خطی سازی سیستم چند ماشینه
۹۸	۴-۱-۱- خطی سازی حول نقطه ی کار
۱۰۰	۴-۱-۲- تعمیم مدل هفرون فلیپس در سیستم های چند ماشینه
۱۰۲	۴-۱-۳- مدل ماتریسی هفرون فلیپس
۱۰۳	۴-۲- جاییابی PSS در سیستم چند ماشینه
۱۰۴	تکالیف فصل چهارم
۱۰۵	تمرین های فصل چهارم
۱۰۶	پروژه های پیشنهادی فصل چهارم
۱۰۷	فصل پنجم : انعطاف پذیر کردن سیستم قدرت
۱۰۷	۵-۱- روش های پیشرفته جهت انعطاف پذیر کردن سیستم قدرت
۱۰۸	۵-۲- مدل خط بلند و بدون تلفات
۱۰۹	۵-۳- تأثیر جبران سازهای غیرفعال و فعال در مشخصه ی خطوط انتقال
۱۱۰	۵-۳-۱- جبران سازی غیرفعال
۱۱۱	۵-۳-۲- جبران سازی فعال
	۵-۴- مدل خطی و غیرخطی سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت با اضافه شدن عناصر
۱۱۵	جبران ساز کنترل پذیر
۱۱۷	۵-۵- کاربرد دینامیک سیستم قدرت در سایر حوزه ها

۱۱۷.....	۵-۵-۱- دینامیک و اجزای خودروی هیبرید برقی H.E.V
۱۲۰.....	تکالیف فصل پنجم.....
۱۲۱.....	پروژه های پیشنهادی فصل پنجم.....
۱۲۲.....	فصل ششم : مطالعات دینامیکی عناصر الکترونیک قدرت در سیستم قدرت.....
۱۲۲.....	۶-۱- انواع جریان های الکتریکی.....
۱۲۳.....	۶-۲- دیود خلا.....
۱۲۶.....	۶-۳- دیود P-N.....
۱۶۵.....	پروژه های پیشنهادی فصل ششم.....

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ : بلوک دیاگرام موتور dc تحریک مستقل با فرض جریان آرمیچر ثابت	۱۷
شکل ۱-۲ : بلوک دیاگرام موتور dc تحریک مستقل با فرض جریان تحریک ثابت	۱۸
شکل ۱-۳ : بلوک دیاگرام معادلات اصلی موتور dc تحریک مستقل	۱۹
شکل ۱-۲ : نمودار تک خطی شبکه ی چهار باسه	۲۵
شکل ۲-۲ : مدل ساده ی ماشین lam	۲۶
شکل ۳-۲ : دیاگرام سیستم قدرت در سه حالت (a) pre-fault (b) during-fault (c) post-fault	۲۷
شکل ۴-۲ : مدل شبکه ی تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت	۲۸
شکل ۵-۲ : وقوع اتصال کوتاه در وسط خط انتقال	۲۹
شکل ۶-۲ : مدل شبکه ی تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت	۳۰
شکل ۷-۲ : بلوک دیاگرام سیستم تحریک	۳۱
شکل ۸-۲ : بلوک دیاگرام سیستم گاورنر توربین	۳۱
شکل ۹-۲ : نمودار تغییرات ولتاژ بر حسب تغییرات توان اکتیو به ازای $\cos \phi$ های متفاوت	۳۴
شکل ۱۰-۲ : شبکه ی شامل ژنراتور متصل به بار $P_D + jQ_D$	۳۴
شکل ۱۱-۲ : محدوده ی زمانی پدیده های مختلف در مطالعه ی دینامیک سیستم قدرت	۳۷
شکل ۱-۳ : دیاگرام شماتیک ماشین سنکرون	۴۲
شکل ۲-۳ : سیم پیچی های کوپل شده ی ماشین سنکرون	۴۲
شکل ۳-۳ : حلقه ی اصلی کنترل ژنراتور سنکرون	۴۷
شکل ۴-۳ : مدار یک سوساز سه فاز	۴۸
شکل ۵-۳ : بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جبران سازه های سری و موازی	۴۸
شکل ۶-۳ : بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جاروبک با جبران سازه های سری و موازی	۴۹
شکل ۷-۳ : بلوک دیاگرام سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور سنکرون	۴۹
شکل ۸-۳ : مدار معادل از دو سر جبران ساز موازی	۵۱
شکل ۹-۳ : حلقه ی کنترل فرکانس در نیروگاه	۵۱
شکل ۱۰-۳ : بلوک دیاگرام گاورنر	۵۲
شکل ۱۱-۳ : سیستم توربین بخار با یک گرم کننده ی مجدد (a) Tandem compound (b) Cross compound	۵۲
شکل ۱۲-۳ : بلوک دیاگرام توربین بخار	۵۳

شکل ۳-۱۳ :	مدل ژنراتور متصل به بار	۵۳
شکل ۳-۱۴ :	دیاگرام یک توربوژنراتور متصل به شین بی نهایت	۵۴
شکل ۳-۱۵ :	مدل شماتیک میکروماشین	۵۶
شکل ۳-۱۶ :	ماشین سنکرون متصل به شین بی نهایت	۶۱
شکل ۳-۱۷ :	نمایش شماتیک ماشین سنکرون به عنوان یک سیستم درجه سه	۶۱
شکل ۳-۱۸ :	مدل هفرون فیلپس مولد سنکرون بدون تحریک	۶۲
شکل ۳-۱۹ :	مدل هفرون فیلپس مولد سنکرون با تحریک درجه یک	۶۴
شکل ۳-۲۰ :	حلقه ی مکانیکی مدل تک ماشینه با صرف نظر کردن از حلقه ی الکتریکی	۶۶
شکل ۳-۲۱ :	بلوک دیاگرام دو کنترل کننده ی پیش فاز	۶۷
شکل ۳-۲۲ :	بلوک دیاگرام PSS	۶۸
شکل ۳-۲۳ :	نمایش OP-AMP	۶۹
شکل ۳-۲۴ :	تقویت کننده ی معکوس	۷۰
شکل ۳-۲۵ :	تقویت کننده ی غیر معکوس	۷۱
شکل ۳-۲۶ :	مدار جمع کننده	۷۱
شکل ۳-۲۷ :	مدار انتگرال گیر	۷۲
شکل ۳-۲۸ :	مدار فیلتر فعال پایین گذر	۷۲
شکل ۳-۲۹ :	مدار سیگنال کاندیشن	۷۳
شکل ۳-۳۰ :	مدار کنترل کننده ی P	۷۳
شکل ۳-۳۱ :	مدار کنترل کننده ی I	۷۴
شکل ۳-۳۲ :	مدار کنترل کننده ی PI	۷۴
شکل ۳-۳۳ :	مدار کنترل کننده ی PD	۷۵
شکل ۳-۳۴ :	کنترل کننده ی PID	۷۵
شکل ۳-۳۵ :	دیاگرام فازوری گشتاور T_{e1} و T_{e2}	۷۶
شکل ۳-۳۶ :	سیستم SMIB	۷۹
شکل ۳-۳۷ :	کنترل پذیر کردن سیستم غیر خطی به روش مدل مرجع	۸۳
شکل ۳-۳۸ :	قابل تنظیم نمودن سیستم خطی شده	۸۴
شکل ۳-۳۹ :	روش کنترل پذیر نمودن سیستم غیرخطی با هدف صفرنمودن خطای بین مدل مرجع و سیستم قابل تنظیم	۸۴
شکل ۳-۴۰ :	دیاگرام کنترل غیرخطی سیستم غیرخطی به روش مدل مرجع با قانون تطابق لیپانوف	۸۶
شکل ۳-۴۱ :	بلوک دیاگرام کنترل کننده ی بهینه ی فیدبک حالت	۸۷
شکل ۳-۴۲ :	حلقه ی مکانیکی سیستم تک ماشینه با صرف نظر کردن از قسمت الکتریکی	۸۷
شکل ۳-۴۳ :	کنترل بهینه ی حلقه ی مکانیکی سیستم تک ماشینه	۸۹

- شکل ۳-۴۴ : بلوک دیاگرام فضای حالت یک سیستم به همراه شماتیک تخمین گر حالت ۹۰
- شکل ۳-۴۵ : پیاده سازی تخمین گر حالت در بلوک دیاگرام فضای حالت یک سیستم ۹۱
- شکل ۳-۴۶ : بلوک دیاگرام سیستم به همراه نویز ورودی و خروجی و تخمین گر حالت فیلتر کالمن ... ۹۲
- شکل ۳-۴۷ : طرح واره ی کنترل کننده ی LQG ۹۳
- شکل ۴-۱ : دیاگرام فازوری نیروهای محرکه در مختصات مرجع و واحد ۹۸
- شکل ۴-۲ : تعمیم مدل هفرون فلیپس در سیستم های چند ماشینه ۱۰۰
- شکل ۵-۱ : سیستم تک ماشینه ی متصل به بار ۱۰۸
- شکل ۵-۲ : دو دسته ی اصلی ادوات جبران ساز ۱۱۰
- شکل ۵-۳ : ساختمان SVC : TCR (a) با خازن ثابت TCR (b) با TSC ۱۱۱
- شکل ۵-۴ : شکل موج ولتاژ و جریان TCR ۱۱۲
- شکل ۵-۵ : پیکربندی TCR ۱۲-پالسه به همراه ترانسفورماتور با دو سیم پیچ ثانوی ۱۱۲
- شکل ۵-۶ : طرح پایه ای از TCSC ۱۱۳
- شکل ۵-۷ : شبکه ی تک خطی به همراه TCPST ۱۱۳
- شکل ۵-۸ : STATCOM سه سیمه ی سه فاز ۱۱۴
- شکل ۵-۹ : SSSC سه سیمه ی سه فاز ۱۱۴
- شکل ۵-۱۰ : UPFC سه سیمه ی سه فاز ۱۱۴
- شکل ۵-۱۱ : STATCOM تک فاز ۱۱۵
- شکل ۵-۱۲ : SSSC تک فاز ۱۱۶
- شکل ۵-۱۳ : UPFC تک فاز ۱۱۶
- شکل ۵-۱۴ : مدل اصلاح شده ی هفرون فلیپس با حضور ادوات FACTS ۱۱۶
- شکل ۶-۱ : مدار متصل شده به یک دیود خلاً با بار فضایی محدود ۱۲۳

پیش‌گفتار

درس دینامیک سیستم‌های قدرت به نمایش هنرمندانه‌ای از رفتار دینامیکی و پایداری سیستم‌های قدرت می‌پردازد که از پیچیده‌ترین سیستم‌های دینامیکی هستند. درک دینامیک سیستم قدرت بدون فهم فیزیکی و اصول اساسی آن آسان نیست. این درس، قدم به قدم به آموزش رفتار دینامیکی و پایداری زاویه‌ای و پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت برای دانشجویان و محققین جوانی که می‌خواهند به صنعت برق وارد شوند، می‌پردازد. این مجموعه حاصل جزوات درسی اینجانب از سال‌های ۱۳۶۰ که به دانشگاه پیوستم و به مسائل دینامیکی سیستم‌های قدرت علاقه‌مند شدم، می‌باشد و مطالب درس به سه دسته‌ی اصلی تقسیم شده است:

بخش اول، پیش‌نیازهای لازم برای مطالعه‌ی دینامیک سیستم قدرت را مرور می‌کند. بخش دوم به توضیح پدیده‌های اساسی دینامیک سیستم قدرت با استفاده از مدل کلاسیک سیستم تک-ماشینه‌ی متصل به شین بی‌نهایت پرداخته است. بخش سوم، مطالب پیشرفته‌تر مربوط به مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیکی سیستم‌های قدرت چند ماشینه‌ی بزرگ را مورد مطالعه قرار داده است. در پایان از سرکار خانم مهندس مرضیه خسروی که در جمع‌آوری و تدوین این مجموعه اهتمام وافر ورزیدند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

دکتر سید محمدتقی بطحایی

شهریور ۱۳۹۰



فصل اول : مقدمه

در ابتدا به یادآوری بحث‌های ریاضی و کنترلی مورد نیاز درس دینامیک می‌پردازیم.

۱-۱- سیستم‌های خطی و پایداری آن

پایداری سیستم‌های خطی به مفهوم خروجی محدود به ازای ورودی محدود است و معیارهای زیادی برای شناخت پایداری به روش مستقیم بدون حل معادله‌ی دیفرانسیل خطی به ازای ورودی‌های محدود وجود دارد.

سیستم خطی زیر را در نظر بگیرید :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (1-1)$$

در سیستم‌های خطی معادلات دیفرانسیل را به حوزه لاپلاس برده و ورودی و خروجی را به صورت تابع تبدیل می‌نویسیم:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2-1)$$

در ادامه به بیان روش تشکیل بلوک دیاگرام یک سیستم خطی از روی معادلات دیفرانسیل و به عکس با ارائه‌ی مثال‌های زیر می‌پردازیم.

مثال ۱ - معادله‌ی دیفرانسیل خطی مقابل را در نظر بگیرید.

$$\ddot{y} + 5\dot{y} + 6y = 3u$$

مطلوب است تابع تبدیل سیستم در حالت‌های زیر:

الف) شرایط اولیه صفر باشد ب) شرایط اولیه مقدار دلخواه باشد $y(0), \dot{y}(0)$

حل : الف) معادله‌ی دیفرانسیل صورت مسئله در حوزه‌ی لاپلاس به صورت زیر خواهد بود:

$$s^2 y(s) - sy(0) - \dot{y}(0) + 5sy(s) - 5y(0) + 6y(s) = 3u(s)$$

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{3}{s^2 + 5s + 6}$$

$$y(s) = \frac{3}{s^2 + 5s + 6} u(s) + \frac{s+5}{s^2 + 5s + 6} y(0) + \frac{1}{s^2 + 5s + 6} \dot{y}(0) \quad \text{ب)}$$

مثال ۲- در مثال قبل معادلات ورودی و خروجی را فقط با انتگرال‌گیر و ضریب (k) در دو حالت به دست آورید: (این معادلات برای رسم بلوک دیاگرام سیستم مفید خواهند بود)

الف) شرایط اولیه‌ی صفر ب) شرایط اولیه‌ی غیرصفر

حل : معادله‌ی دیفرانسیل را در حوزه‌ی لاپلاس برای بزرگترین درجه‌ی S با ضریب واحد می‌نویسیم:

$$s^2 y(s) = sy(0) - \dot{y}(0) - 5sy(s) + 5y(0) - 6y(s) + 3u(s) \quad \text{الف) رابطه‌ی (*)}$$

$$s^2 y(s) = -5sy(s) - 6y(s) + 3u(s) \rightarrow y(s) = -\frac{5}{s} y(s) - \frac{6}{s^2} y(s) + \frac{3}{s^2} u(s)$$

ب) به منظور عدم استفاده از مشتق گیر ضرایب طرفین رابطه‌ی (*) را به s تقسیم می‌کنیم.

$$sy(s) = -5y(s) - \frac{6}{s} y(s) + \frac{3}{s} u(s) + \left(1 + \frac{5}{s}\right) y(0) + \frac{1}{s} \dot{y}(0)$$

سوالی که مطرح می‌شود این است که چگونه می‌توان از روی بلوک دیاگرام سیستم دینامیکی که بر حسب انتگرال‌گیر و ضریب بهره است، معادلات حالت سیستم را نوشت؟

پاسخ این است که از طریق الگوریتم زیر این امر امکان‌پذیر است:

۱) خروجی هر انتگرال‌گیر را با یک متغیر حالت X_i مشخص می‌کنیم.

۲) ورودی هر انتگرال‌گیر را مشتق متغیر حالت $\dot{X}_i$ می‌گذاریم.

(۳) با توجه به بلوک دیاگرام سیستم، معادلات حالت را می توان نوشت.

مثال ۳- مطلوب است معادلات حالت سیستم خطی مقابل

$$\begin{cases} \frac{di_f}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} I_f + \frac{1}{L_f} v_f \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{fd}}{j} I_f i_{a0} - \frac{D}{j} \omega - \frac{T_m}{j} \end{cases}$$

حل :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \frac{1}{2H} (-DX_1 - X_2 + U_m) \\ \dot{X}_2 = K_1 X_1 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{2H} & -\frac{1}{2H} \\ K_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} U_m$$

۲-۱- معیارهای پایداری در سیستم های خطی

(۱) محل قطب ها به طوری که قطب ها (ریشه های مخرج) باید سمت چپ محدود $j\omega$ باشند.

(۲) معیار نایکوئیسیست

(۳) معیار بُد

(۴) مقادیر ویژه ی ماتریس A در فضای حالت

۳-۱- نوشتن معادلات دیفرانسیل غیر خطی به فرم فضای حالت

سیستم غیر خطی زیر را در نظر بگیرید :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = g(x, u) \end{cases} \quad (۳-۱)$$

نحوه ی نوشتن معادلات دیفرانسیل غیر خطی به فرم فضای حالت مطابق مثال زیر است.

مثال ۴- معادله ی دیفرانسیل غیر خطی زیر را به فرم فضای حالت در آورید.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 5y \frac{dy}{dt} + \cos(y) = u(t)$$

حل :

$$\begin{cases} x_1 = y \\ x_2 = \dot{y} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{y} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{y} \end{cases}$$

$$\rightarrow \ddot{y} + 5\dot{y}y + \cos(y) = u$$

$$\Rightarrow \ddot{y} = -5X_1X_2 - \cos(X_1) + u$$

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = -5X_2X_1 - \cos(X_1) + u \end{cases}$$

مثال ۵- دو معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی زیر را که معادلات دینامیک ماهواره است به فرم فضای حالت بنویسید. (k : ضریب جاذبه دو جرم m_1, m_2)

$$\begin{cases} \ddot{r}(t) - r(t)\dot{\theta}^2(t) = \frac{-k}{r^2(t)} + V_1(t) \\ r(t)\ddot{\theta}(t) + 2\dot{\theta}(t)\dot{r}(t) = V_2(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_1 = r \\ X_2 = \dot{r} \\ X_3 = \theta \\ X_4 = \dot{\theta} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{X}_1 = \dot{r} \\ \dot{X}_2 = \ddot{r} \\ \dot{X}_3 = \dot{\theta} \\ \dot{X}_4 = \ddot{\theta} \end{cases} \quad \text{حل :}$$

$$\ddot{r} = \dot{X}_2 = r(t)\dot{\theta}^2(t) - \frac{k}{r^2(t)} + V_1$$

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 = f_1(x) \\ \dot{X}_2 = X_1X_4^2 - \frac{k}{X_1^2} + V_1 = f_2(x) \\ \dot{X}_3 = X_4 = f_3(x) \\ \dot{X}_4 = \frac{-2X_4X_2}{X_1} + \frac{1}{X_1}V_2 = f_4(x) \end{cases}$$

$$\dot{X} = AX + BU, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 4 & k \end{bmatrix}$$

مثال ۶- ماتریس A یک سیستم خطی عبارت است از:

به ازای $k=3$ مطلوب است :

الف) مقادیر ویژه‌ی سیستم

ب) بردارهای ویژه‌ی راست مربوط به هریک از مقادیر ویژه

ج) بردارهای ویژه‌ی چپ مربوط به هر یک از مقادیر ویژه

د) مقادیر ویژه نسبت به پارامتر k

حل :

$$k=3 \rightarrow A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 3 \end{bmatrix} \rightarrow \det(A - \lambda I) = 0 \rightarrow \det \begin{pmatrix} 1-\lambda & 2 \\ 4 & 3-\lambda \end{pmatrix} = 0 \quad (\text{الف})$$

$$(1-\lambda)(3-\lambda) - 8 = 0 \rightarrow \lambda^2 - 4\lambda - 5 = 0 \rightarrow \begin{cases} \lambda_1 = 5 \\ \lambda_2 = -1 \end{cases}$$

$$Av_1 = \lambda_1 v_1 \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = 5 \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \rightarrow v_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ 2x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, u_{\lambda_1} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ب})$$

$$Av_2 = \lambda_2 v_2 \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{pmatrix} \rightarrow v_2 = \begin{pmatrix} +x'_1 \\ -x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1 \\ -1 \end{pmatrix}, u_{\lambda_2} = \begin{bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} \quad (\text{ج})$$

$$S_k^{\lambda_1} = \frac{d\lambda_1}{dk} = \frac{v_1^T \left[\frac{dA}{dk} \right]^T u_1}{v_1^T u_1} \quad (\text{د})$$

$$S_k^{\lambda_2} = \frac{d\lambda_2}{dk} = \frac{v_2^T \left[\frac{dA}{dk} \right]^T u_2}{v_2^T u_2}$$

$$\frac{dA}{dk} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \frac{d\lambda_1}{dk} = \frac{\begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}}$$

$$, \frac{d\lambda_2}{dk} = \frac{\begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix}}$$

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = \int_k^{\lambda_1} \Delta k \rightarrow \lambda'_1 = \lambda_1 + \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 = \int_k^{\lambda_2} \Delta k \rightarrow \lambda'_2 = \lambda_2 + \Delta\lambda_2 \end{cases}$$

برای حل معادلات حالت یک سیستم خطی رابطه‌ی (۱-۱) را داریم به طوریکه $X(0)$ شرایط اولیه و $u(0)$ ورودی اولیه است و برای $x(t)$ رابطه‌ی (۴-۱) برقرار خواهد بود :

$$x(t) = \sum_{i=1}^n v_i X(0) e^{\lambda_i t} w_i + \sum_{i=1}^n \int_0^t \{v_i^T [B] u(\tau)\} e^{-\lambda(t-\tau)} w_i d\tau \quad (\text{۴-۱})$$

وقتی که V_i بردار ویژه‌ی راست مربوط به مقدار ویژه λ_i و w_i بردار ویژه‌ی چپ مربوط به مقدار ویژه λ_i باشد.

۴-۱- خطی سازی سیستم های غیر خطی

جهت خطی سازی سیستم های جبری $y=f(x)$ حول نقطه‌ی کار آن از رابطه‌ی (۵-۱) استفاده می کنیم:

$$y - y_0 = (x - x_0) f'(x) \quad (5-1)$$

و برای خطی سازی سیستم های غیر خطی حول نقطه‌ی کار u_0 , x_0 رابطه‌ی (۶-۱) را به کار می بریم:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (6-1)$$

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u$$

وقتی که روابط زیر را برای ماتریس های A و B داشته باشیم:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{u_0, x_0}, B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix}_{u_0, x_0} \quad (7-1)$$

۵-۱- خطی سازی تجهیزات سیستم قدرت

روابط حاکم بر موتور DC تحریک مستقل با رابطه‌ی (۸-۱) توصیف می شود:

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \\ v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{fd} i_f \omega \\ T_e = M_{fd} i_f i_a \\ j \frac{d\omega}{dt} + D\omega = T_e - T_m \end{cases} \quad (8-1)$$

و متغیرهای حالت و ورودی آن مطابق رابطه‌ی (۹-۱) بیان می شود:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(x, u) \\ x = \begin{pmatrix} i_f \\ i_a \\ \omega \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} v_f \\ v_a \\ T_m \end{pmatrix} \end{cases} \quad (9-1)$$

معادلات حالت موتور با مرتب نمودن روابط (۸-۱) به دست می آید:

$$\begin{cases} \frac{di_f}{dt} = \frac{v_f}{L_f} - \frac{R_f}{L_f} i_f = f_1(x, u) \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{v_a}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{M_{fd}}{L_a} i_f \omega = f_2(x, u) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{fd}}{j} i_f i_a - \frac{T_m}{j} - \frac{D}{j} \omega = f_3(x, u) \end{cases} \quad (10-1)$$

برای خطی سازی حول نقطه‌ی کار از شرایط اولیه‌ی رابطه‌ی (۱۱-۱) استفاده می‌کنیم:

$$x_0 \begin{cases} i_{f_0} \\ i_{a_0} \\ \omega_0 \end{cases}, u_0 \begin{cases} v_a = v_{a_0} \\ v_f = v_{f_0} \\ T_m = T_{m_0} \end{cases} \quad (11-1)$$

سیستم مورد بررسی، یک سیستم غیر خطی درجه سوم است. از درجه‌ی سوم است چرا که سه متغیر حالت ω, i_f, i_a دارد و غیرخطی است، چون حاصل ضرب متغیرهای حالت را شاهد هستیم و معادلات حالت آن مطابق روابط زیر بیان می‌شود:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u; \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta i_f \\ \Delta i_a \\ \Delta \omega \end{bmatrix}, \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta v_f \\ \Delta v_a \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (12-1)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 \\ -\frac{M_{fd}}{L_a} \omega_0 & -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{M_{fd}}{L_a} i_{f_0} \\ \frac{M_{fd}}{j} i_{a_0} & \frac{M_{fd}}{j} i_{f_0} & -\frac{D}{j} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{j} \end{bmatrix} \quad (13-1)$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \Delta \dot{i}_f \\ \Delta \dot{i}_a \\ \Delta \dot{\omega} \end{pmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta i_f \\ \Delta i_a \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} \Delta V_f \\ \Delta V_a \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (14-1)$$

مقادیر ویژه‌ی ماتریس A رابه ازای نقاط کار مختلف محاسبه می‌کنیم تا نقاط پایداری و ناپایداری سیستم را شناسایی کنیم. اگر در نقطه‌ی کار خاص سیستم ناپایدار شود، می‌توان به کمک طراحی مناسب PSS، سیستم را پایدار نمود.

نکته‌ی قابل توجه این است که با ثابت نمودن برخی پارامترهای سیستم و کنترل سیستم توسط پارامترهای دیگر می‌توان پایداری سیستم را کنترل نمود، مثلاً i_f را ثابت نگاه داریم $\left(\frac{di_f}{dt} = 0\right)$ و موتور را آرمیچر کنترل طراحی نماییم، در این صورت i_a متغیر خواهد بود.

می‌توان این سوال را مطرح کرد که آیا می‌توان سیستم غیرخطی را به غیر از خطی سازی حول نقطه‌ی کار به روش های دیگر خطی کرد؟

پاسخ مثبت است. به دو روش این امر امکان پذیر است: (۱) از طریق تحمیل شرایطی بر سیستم (۲) از طریق فیدبک های غیرخطی^۱

۱-۵-۱- روش تحمیل شرایط به موتور dc تحریک مستقل جهت خطی سازی

$$(۱) \text{ روش فیلد کنترل } i_a = i_{a0} = cte.$$

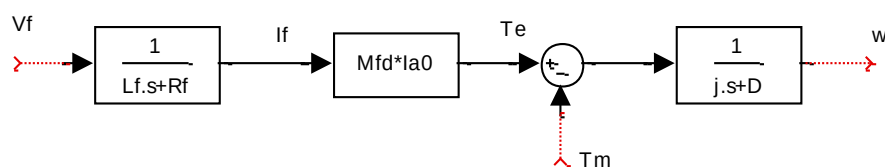
با این فرض معادلات حالت به شکل رابطه‌ی (۱-۱۵) درمی‌آید:

$$(۱۵-۱) \quad \begin{cases} \frac{di_f}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} I_f + \frac{1}{L_f} v_f \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{fd}}{j} I_f i_{a0} - \frac{D}{j} \omega - \frac{T_m}{j} \end{cases}$$

و چون سیستم خطی شد، می‌توان معادلات دیفرانسیل را مطابق رابطه‌ی (۱-۱۶) به حوزه‌ی لاپلاس برد.

$$(۱۶-۱) \quad \begin{cases} SI_f(s) = -\frac{R_f}{L_f} I_f(s) + \frac{1}{L_f} v_f(s) \\ S\omega(s) = \frac{M_{fd}}{j} I_f(s) i_{a0} - \frac{D}{j} \omega(s) - \frac{T_m(s)}{j} \end{cases}$$

بلوک دیاگرام موتور dc تحریک مستقل با فرض جریان آرمیچر ثابت به صورت شکل (۱-۱) خواهد بود:



شکل ۱-۱: بلوک دیاگرام موتور dc تحریک مستقل با فرض جریان آرمیچر ثابت

^۱ feed back linearization

(۲) روش آرمیچر کنترل $i_f = i_{f0} = cte$.

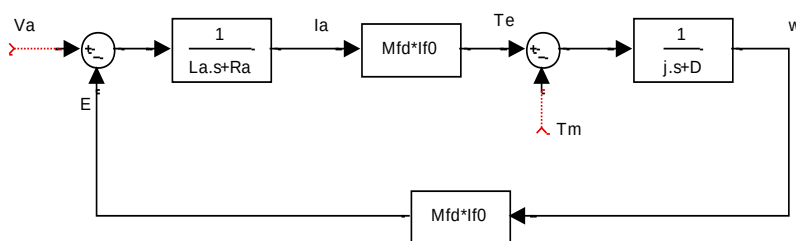
با این فرض معادلات حالت به شکل رابطه‌ی (۱۷-۱) درمی‌آید:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{M_{fd}}{L_a} i_{f0} \omega + \frac{1}{L_a} v_a \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{fd}}{j} i_{f0} I_a - \frac{D}{j} \omega - \frac{T_m}{j} \end{cases} \quad (17-1)$$

و چون سیستم خطی شد، می‌توان معادلات دیفرانسیل را مطابق رابطه‌ی (۱۸-۱) به حوزه‌ی لاپلاس برد.

$$\begin{cases} SI_a(s) = -\frac{R_a}{L_a} I_a(s) - \frac{M_{fd}}{L_a} i_{f0} \omega(s) + \frac{1}{L_a} v_a(s) \\ S\omega(s) = \frac{M_{fd}}{j} i_{f0} I_a(s) - \frac{D}{j} \omega(s) - \frac{T_m(s)}{j} \end{cases} \quad (18-1)$$

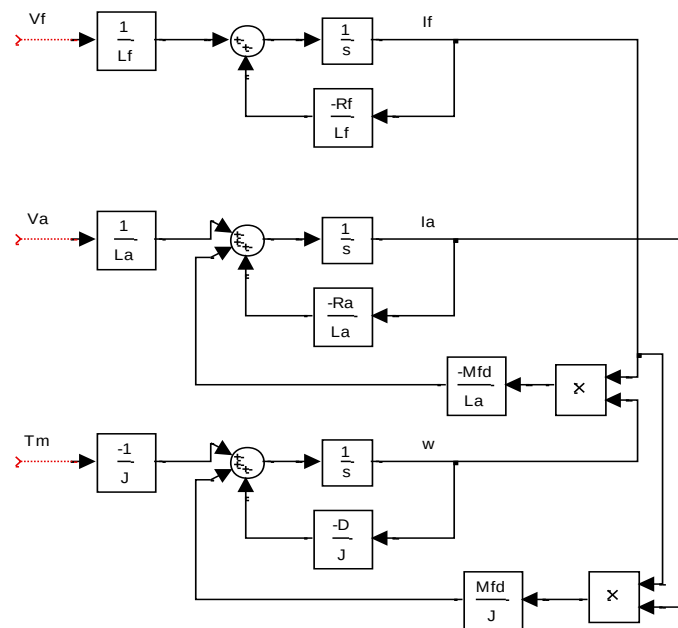
بلوک دیاگرام موتور dc تحریک مستقل با فرض جریان تحریک ثابت به صورت شکل (۲-۱) خواهد بود:



شکل ۲-۱: بلوک دیاگرام موتور dc تحریک مستقل با فرض جریان تحریک ثابت

و این در حالی است که بلوک دیاگرام معادلات اصلی موتور dc تحریک مستقل مطابق شکل (۳-۱)

است:



شکل ۱-۳: بلوک دیاگرام معادلات اصلی موتور dc تحریک مستقل

و باید از طریق فیدبک منفی (کنترلر) ضرب را از بین برد تا سیستم خطی شود.

مثال ۷- معادلات غیرخطی حاکم بر یک ماهواره در مثال ۵ داده شده و معادلات حالت آن را به دست آورده‌ایم، این معادلات را حول نقطه‌ی کار آن خطی کنید.

حل : $\dot{X} = f(x, u) \Rightarrow \Delta \dot{X} = A \Delta x + B \Delta u$

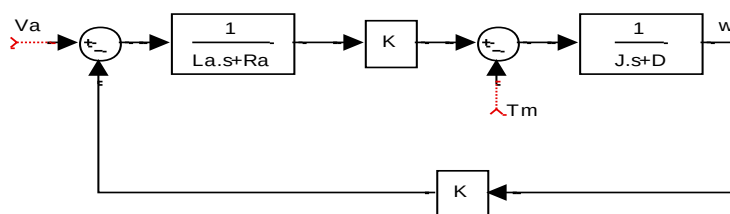
$$u = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ \omega_0 t \\ \omega_0 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ X_4^2 + \frac{2k}{X_1^3} & 0 & 0 & 2X_1X_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2X_4X_2}{X_1^2} & -\frac{2X_4}{X_1} & 0 & -\frac{2X_2}{X_1} \end{bmatrix}_{\substack{X=X_0 \\ V=V_0}}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{X_1} \end{bmatrix}_{\substack{X=X_0 \\ V=V_0}}$$

$$\Rightarrow A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2\omega_0^2 & 0 & 0 & 2r_0\omega_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2\omega_0}{r_0} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_0} \end{bmatrix}$$

تکالیف فصل اول

۱. معادلات دینامیکی غیرخطی یک ژنراتور dc تحریک مستقل را حول نقطه‌ی کار خطی کنید.
راهنمایی : مشابه موتور dc تحریک مستقل است با تفاوت در فرمول $j\dot{\omega} + D\omega = T_m - T_e$ و جای‌گزینی i_a به جای $\dot{i}_a$.
۲. چرا در موتور dc حالت فیلد کنترل، بلوک دیاگرام بدون فیدبک است ولی در حالت آرمیچر کنترل دارای فیدبک در معادلات سیستم است؟
ثابت کنید مدل ریاضی یک موتور dc آهنربای دائم مطابق بلوک دیاگرام زیر است. (K : ضریب آهنربایی)



تمرین های فصل اول

۱. مقاله ای بنویسید، به طوری که با تبدیلاتی که می آفرینید بتوان سیستم های دینامیکی غیر خطی را خطی نمود.

پروژه های پیشنهادی فصل اول

۱. یک موتور dc آهنربای دائم خریداری کنید، پارامترهای آن را شامل R_a, L_a, j, D, k از طریق کاتالوگ یا شناسایی به دست آورید و پایداری این موتور را به روش های مختلف زیر، شبیه سازی و بررسی کنید.

روث-هرویس، پاسخ فرکانسی، دیاگرام بد، نایکوئیست، تحلیل مقادیر ویژه، مکان هندسی قطبها.

۲. طراحی منبع تغذیه ی یک ماهواره ی Low Orbit

فصل دوم : معرفی مسائل دینامیک شبکه های قدرت

۲-۱- تعاریف پایداری

۲-۱-۱- نوسانات فرکانس پایین

این نوسانات بر دو قسم است:

(۱) محلی : سیستم تک ماشینه‌ی متصل به شین بی‌نهایت

(۲) بین ناحیه‌ای : سیستم چند ماشینه‌ی بین دو ناحیه

مثلاً اگر از خط با ظرفیت انتقالی 1000 MW که بین دو ناحیه نصب شده است، تا وقتی که توان 300 MW عبور می‌دهیم، هیچ‌گونه نوسانی وجود ندارد اما با افزایش توان انتقالی، نوسانات توان با $f = 1 \text{ Hz}$ را مشاهده خواهیم کرد که نشان‌دهنده‌ی یک نوسان فرکانس پایین بین ناحیه‌ای است.

۲-۱-۲- پایداری دینامیکی و گذرا

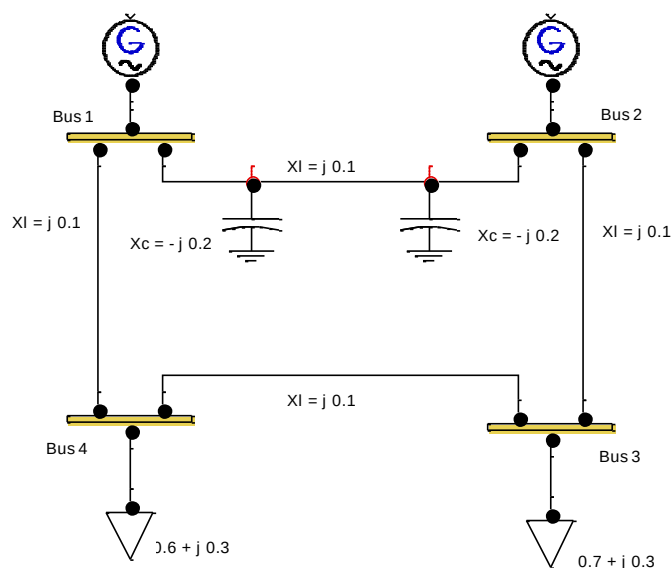
پایداری دینامیکی (گذرا) عبارت است از مطالعه‌ی پایداری دینامیکی (گذرا) در سیستم های قدرت عبارت است از توانایی شبکه‌ی به هم پیوسته بعد از یک اغتشاش کوچک (اغتشاش بزرگ) نظیر تغییر

بار، از دست رفتن نیروگاه، عملیات قطع و وصل خطوط و وقوع اتصال کوتاه و... جهت رفتن از یک نقطه-ی کار حالت دائم پس از یک دوره نوسانات الکترومکانیکی به نقطه‌ی کار دیگر بدون از دست رفتن سنکرونیسم (همه‌ی مولدهای موازی در حالت بهره برداری در یک سرعت باقی بمانند).

درواقع، اگر سیستم از نقطه‌ی کارش نوسان کرد و به نقطه‌ی کار دیگر رسید، پایدار باقی می ماند.

جهت یادآوری پایداری گذرا در سیستم قدرت به مثال زیر توجه کنید.

مثال ۱- شکل زیر را در نظر بگیرید. نتایج پخش بار روی شکل آمده است وقتی که $V_1 = 1 \angle 0^\circ$ می باشد.



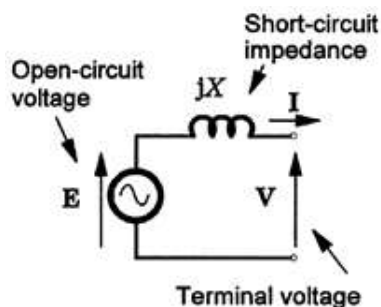
شکل ۱-۲ : نمودار تک خطی شبکه‌ی چهار باسه

خطوط مشابه هم هستند. سوالی که می توان مطرح کرد این است که چنانچه اتصال کوتاه سه فاز در وسط خط ۱-۲ رخ دهد و پس از ۵ سیکل خط قطع شود آیا سیستم پایدار می ماند؟

جهت یافتن پاسخ باید شکل ۱-۲ را در نرم افزار ETAP یا Dig Silent یا MATLAB شبیه سازی کنید و خطا را اعمال نمایید.

بحث ریاضی کلی را با سیستمی شامل n تا node ژنراتور ادامه می دهیم.

مدل ساده‌ی زیر را برای ماشین i ام داریم.



شکل ۲-۲: مدل ساده ی ماشین iam

معادلات حاکم بر این مدل مطابق رابطه ی (۱-۲) است :

$$\begin{cases} E_i = V_i + jX_{gi}i_i \\ j \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} = p_{mi} - p_{ei} \end{cases} \quad (1-2)$$

توان الکتریکی هر ژنراتور به E_i ، ولتاژ مدار باز همه ی ژنراتورها وابسته است.

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n |E_i||E_j||Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2-2)$$

وقتی که E_i ، نیروی محرکه و δ_i ، زاویه ی بین میدان روتور و استاتور باشد. در بی باری $\delta = \delta_{i0}$ و در بارگیری ها $0 < \delta_i < 90$ است. $y_{ij} = |y_{ij}| < \theta_{ij}$ ، آرایه ی ij ماتریس ادمیتانس سیستم قدرت و P_{mi} ، قدرت دیکته شده به نیروگاه از طریق مرکز دیسپاچینگ در Economic Dispatch است.

اغتشاش و تغییرات شبکه، در ماتریس ادمیتانس خود را نشان می دهد.

در صورت وقوع خطا، محاسبه ی مقادیر $\delta_i(0)$ در قبل از اتصالی به صورت زیر خواهد بود:

$$E_i = V_i + jX_{gi}i_i \quad (3-2)$$

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i i_i^* \rightarrow i_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (4-2)$$

به کمک رابطه ی (۴-۲) می توان رابطه ی (۳-۲) را به صورت زیر نوشت:

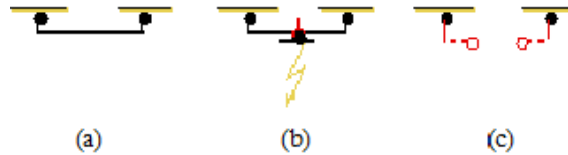
$$E_i^{<\delta_i} = V_i^{<\delta_i} + jX_{gi} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \right) \quad (5-2)$$

زاویه ی اولیه ی ژنراتور را می توان از طریق فرمول بالا و به کمک نتایج پخش بار اولیه به دست آورد.

الگوریتم برنامه نویسی پایداری گذرا به صورت زیر خواهد بود:

(۱) مطالعه‌ی پخش بار قبل از اغتشاش.

(۲) ساختن ماتریس ادمیتانس سیستم قدرت همراه با بار و راکتانس مولدها در هر یک از حالات قبل خطا، حین خطا و بعد خطا:



شکل ۲-۳: دیاگرام سیستم قدرت در سه حالت (a) pre-fault (b) during-fault (c) post-fault

(۳) کاهش مرتبه‌ی ماتریس ادمیتانس شبکه از طریق حذف گره‌هایی که به آنها جریان وارد نمی‌شود.

(۴) شبکه باید فقط دارای مولد با نیروی محرکه باشد. بنابراین بارها را به داخل ماتریس Y می‌بریم یعنی $Y_{bus} [(n+m)*(n+m)]$ به $Y_{bus} - \text{Reduced } (n*n)$ تبدیل می‌شود. برای دو حالت دیگر حین و بعد از اغتشاش هم Y_{bus} را کاهش می‌دهیم.

(۵) محاسبه‌ی δ_i, E_i از طریق رابطه‌ی (۲-۵) و اطلاعات پخش بار.

(۶) به دست آوردن شرایط اولیه برای حل معادله‌ی نوسان حین اتصال و حل آن

$$\frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \delta_i = \frac{\omega_0}{2H_i} (p_{mi} - p_{ei}) \quad (۶-۲)$$

وقتی که $\frac{d\delta_i(0)}{dt}$, $\delta_i(0)$ شرایط اولیه، θ_{ij} زاویه‌ی ادمیتانس در حین خطا و p_{ei} توان الکتریکی مطابق رابطه‌ی زیر است.

$$p_{ei} = \sum |E_i| |E_j| y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (۷-۲)$$

(۷) با توجه به زمان رفع عیب t_d به محاسبه‌ی شرایط اولیه از روی پاسخ معادله‌ی نوسان حین عیب یعنی $f_i(t_d)$ برای حل معادله‌ی نوسان پس از رفع عیب و حل آن می‌پردازیم.

در این صورت شرایط اولیه به صورت $\frac{d'\delta_i}{dt} = f'_i(t_d)$, $\delta'_i(0) = f_i(t_d)$ خواهد بود و معادله‌ی نوسان بعد از رفع خطا به صورت رابطه‌ی (۲-۸) توصیف خواهد شد:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = p_{mi} - p_{ei}^{pf} \leftarrow \text{post-fault} \\ p_{ei}^{pf} = \sum |E_i| |E_j| y_{ij}^{pf} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})^{pf} \end{cases} \quad (۸-۲)$$

(۸) اگر تابع $\delta(t)$ میرا شود، سیستم پایدار خواهد بود.

استخراج سیستم تک ماشینه از سیستم چند ماشینه

سیستم قدرت با n تا مولد و m تا بار در نظر بگیرید. مدل ریاضی مطالعات پایداری چند ماشینه به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \\ P_{ei} = \sum |E_i| |E_j| y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9-2)$$

در حالت یک ژنراتور متصل به شین بی نهایت رابطه ی (۹-۲) به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \\ P_e = \sum_{j=1}^2 |E_i| |E_j| y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (10-2)$$

وقتی که راکتانس از طریق رابطه ی (۱۱-۲) به دست می آید:

$$\sum X = X_T + X_g + X_L \quad (11-2)$$

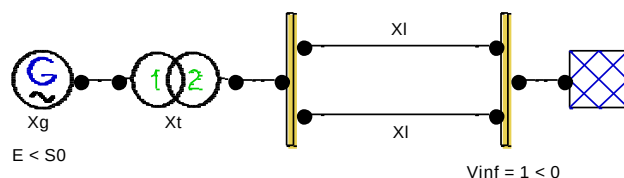
می توان درایه های ماتریس ادمیتانس و توان الکتریکی را از طریق روابط زیر به دست آورد.

$$Y_{11} = \frac{1}{j \sum X} = \frac{1}{\sum X} < -90, Y_{12} = Y_{21} = -\left(\frac{1}{\sum X} < -90\right) \quad (12-2)$$

$$P_e = |E_1| |E_2| Y_{11} \cos(\theta_{11}) + |E_1| |E_2| Y_{12} \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) = \frac{|E| |V_\infty|}{\sum X} \sin \delta \quad (13-2)$$

سناریوهای پایداری در سیستم تک ماشینه

مثال ۱- شکل زیر را در نظر بگیرید:



شکل ۲-۴: مدل شبکه ی تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت

در حالی که نیروگاه قدرت P_0 را به شبکه تزریق می کند، یکی از دو خط قطع می شوند. آیا سیستم پایدار

می ماند؟

قبل از خطا : $P_m = P_0$, $\sum X = X_g + X_T + \frac{X_L}{2}$

$$P_e = \frac{|E||V_\infty|}{\sum X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \Rightarrow P_{e0} = P_{\max} \sin \delta_0 \rightarrow \delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_{e0}}{P_{\max}}$$

شرایط اولیه به صورت مقابل خواهد بود :

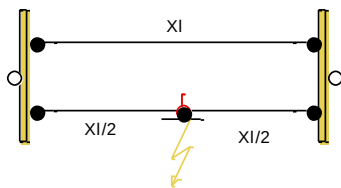
$$\begin{cases} \delta = \delta_0 \\ \frac{d\delta}{dt} = 0 \end{cases} \rightarrow \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 + P'_{\max} \sin \delta)$$

بعد از قطع یک خط داریم :

$$P'_{\max} = \frac{|E||V_\infty|}{\sum X'}, \quad \sum X' = X_g + X_T + X_L$$

باید معادله دیفرانسیل درجه دوم نوسان را با شرایط اولیه ای که داریم، حل کنیم و چک کنیم که آیا $\delta(t)$ محدود می شود یا خیر.

مثال ۲- اگر اتصال کوتاه در وسط یکی از خطوط شکل ۲-۴ اتفاق بیفتد و پس از t_d خط از دو طرف باز شود، پایداری را بررسی کنید.



شکل ۲-۵ : وقوع اتصال کوتاه در وسط خط انتقال

معادله نوسان حین خطا :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P''_{\max} \sin \delta)$$

$$P''_{\max} = \frac{|E||V_\infty|}{\sum X''} \Rightarrow \sum X'' = X_g + X_T + X_{Th}$$

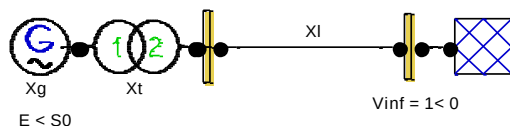
معادله نوسان پس از رفع خطا را با شرایط اولیه مقابل حل می کنیم:

$$\begin{aligned} \delta_0 &= f(t_d) \\ \frac{d\delta}{dt} &= f'(t_d) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \ddot{\delta} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P'_{\max} \sin \delta) \\ \Rightarrow \delta = g(t) \end{cases}$$

اگر $g(t)$ به مقدار ثابتی همگرا شود، سیستم پایدار می ماند.

مثال ۳- شبکه‌ی تک‌ماشینه‌ی متصل به شین بی‌نهایت را در نظر بگیرید :



شکل ۲-۶ : مدل شبکه‌ی تک‌ماشینه‌ی متصل به شین بی‌نهایت

در حالی که نیروگاه قدرت P_0 را به شبکه تزریق می‌کند، به علت خطای مجازی خط برای t_d ثانیه قطع و مجدداً بسته می‌شود. آیا نیروگاه پایدار می‌ماند؟

شرایط اولیه قبل از وقوع خطا :

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_0}{P_{\max}}, P_{\max} = \frac{|E||V_{\infty}|}{\sum X = X_L + X_g + X_T}$$

$$\begin{cases} \delta = \delta_0 \\ \frac{d\delta}{dt} = 0 \end{cases} \rightarrow \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P_e)$$

اگر خط قطع شود، توان الکتریکی عبوری صفر است و با حل معادله‌ی نوسان داریم :

$$\delta(t) = \frac{\omega_0}{4H} P_0 t^2 + \delta_0 = f(t)$$

در صورتی‌که در $t_d = T$ خط دوباره وصل شود، داریم :

$$\ddot{\delta}(t) = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P_{\max} \sin \delta(t)) \quad \text{With : } \begin{cases} \delta_0 = f(T) = \frac{\omega_0}{4H} P_0 T^2 + \delta_0 \\ \frac{d\delta}{dt}(T) = \frac{\omega_0}{2H} P_0 T \end{cases}$$

برای آنکه نیروگاه پایدار بماند باید δ ژنراتور به δ_0 محدود برگردد.

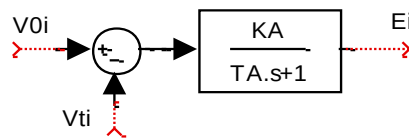
جهت ارزیابی پایداری گذرا در سیستم قدرت بدون نیاز به حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی توجه تمام محققین جهان به راه‌حلی مناسب معطوف شد.

با توجه به مشکلات حل معادله‌ی نوسان غیرخطی، قدم اول جهت تست پایداری، روش سطوح متساوی بود، سپس روش لیاپانوف.

زیبایی روش لیاپانوف این است که می‌گویند سیستم تا چه میزان قدرت قبل از اتصالی و یا زمان قطع می‌تواند داشته باشد تا پایدار بماند.

پایداری گذرای چند ماشینه با در نظر گرفتن سیستم های کنترلی

در پایداری کلاسیک فرض بر این بود که نیروی محرکه ی E_i, E_j و P_{mi} قدرت مکانیکی ورودی به مولد i ام ثابت است ولی با وجود سیستم های کنترلی، این مقادیر خروجی متغیر معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم های تحریک و گاورنر نیروگاه های مختلف می باشد. اگر فرض کنید سیستم تحریک دارای بلوک دیاگرام زیر باشد :



شکل ۷-۲: بلوک دیاگرام سیستم تحریک

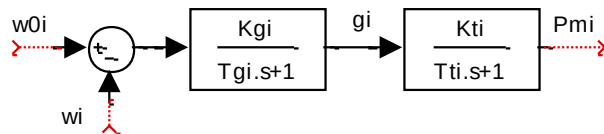
در نتیجه بایستی معادله ی دیفرانسیل زیر را به معادلات پایداری اضافه کرد :

$$E_i + T_{Ai} \frac{dE_i}{dt} = K_{Ai} (V_{0i} - V_{ti}) \quad (۱۴-۲)$$

در این صورت معادلات شبکه به صورت زیر در می آید:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \\ P_{ei} = \sum |E_i| |E_j| Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ E_i + T_{Ai} \frac{dE_i}{dt} = K_{Ai} (\Delta V_t) \end{cases} \quad (۱۵-۲)$$

همچنین اگر فرض شود بلوک دیاگرام حاکم بر سیستم گاورنر توربین به صورت زیر باشد:



شکل ۸-۲: بلوک دیاگرام سیستم گاورنر توربین

باید دو معادله ی زیر را به معادلات پایداری شبکه اضافه کنیم:

$$\begin{cases} g_i + T_{gi} \frac{dg_i}{dt} = k_{gi} (\omega_{0i} - \omega_i) \\ P_{mi} + T_{ti} \frac{dP_{mi}}{dt} = k_{ti} g_i \end{cases} \quad (۱۶-۲)$$

وقتی که g_i میزان باز شدن شیر آب یا بخار باشد.

هر نیروگاه یک مدل تحریک و یک مدل گاورنر و توربین خاص دارد و بایستی معادلات دیفرانسیل همان مدل را برای نیروگاه منظور کرد.

روش های بهبود پایداری گذرا برای جلوگیری از Black-out

(۱) افزایش پایداری استاتیکی: با توجه به رابطه‌ی (۱۷-۲) با بهبود پایداری استاتیکی می‌توان پایداری گذرا را افزایش داد وقتی که حد پایداری استاتیکی، P_{max} می‌باشد.

$$P_{max} = \frac{|E||V_{\infty}|}{\sum X} \quad (17-2)$$

جهت افزایش پایداری استاتیکی می‌توان اقدامات زیر را انجام داد:

- افزایش سطح ولتاژ شبکه
- افزودن خط جدید
- کاهش راکتانس سری خط (استفاده از خط باندل شده)
- به کارگیری خازن سری در خط جهت جبران‌سازی
- رفع سریع خطا در شبکه با به کارگیری سیستم حفاظت و دژنکتورهای سریع
- به کارگیری کلیدهای وصل مجدد^۱ برای رفع خطاهای مجازی کوتاه مدت
- به کارگیری دژنکتورهای تک قطبی^۲ تا تنها فاز دچار خطا قطع شود.
- استفاده از ماشین های الکتریکی با اینرسی H بزرگ و راکتانس X کم
- سیستم‌های تحریک با پاسخ سریع و ضریب بهره‌ی بالا (گین)
- شیرزنی سریع^۳ تا بتوان P_m را در صورت کم شدن P_e کم کرد.
- ترمز مقاومتی^۴ به عنوان بار مجازی
- به کارگیری ادوات FACTS: نسل قدیم با ترستور نظیر SVC, TCR, CSC, HVDC و نسل جدید مثل STATCOM, UPFC, SSSC.
- بهره بردن از نقش نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای^۵ در بهبود پایداری زاویه ای

^۱ High speed recloser

^۲ single pole

^۳ fast valving

^۴ breaking resistor

^۵ DFIF

۲-۱-۳- نوسانات پیچشی و تشدید زیر سنکرون SSR

چون خازن سری به همراه اندوکتانس خط در مقابل اغتشاشات، دارای فرکانس نوسانی f_e می باشد، نوسانات قدرت به صورت flow روی گشتاور مکانیکی اثر می گذارند و به روتور گشتاور مقاوم T_e با فرکانس f_e را مطابق رابطه ی (۲-۱۸) اعمال می کنند و این در حالی است که قبلاً فرکانس گشتاور، فرکانس طبیعی شبکه بود. توضیحات بیشتر در این مورد در بخش ۳-۵ بیان شده است.

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-18)$$

۲-۱-۴- ناپایداری ولتاژ Voltage Collapse

با افزایش الگوی مصرف بار (قدرت اکتیو- قدرت راکتیو) ولتاژ شین ها کاهش پیدا می کنند. نقطه ای که منجر به فروپاشی ولتاژ می گردد، حد بارگذاری برای پایداری ولتاژ است.

ژنراتور متصل به شین بی نهایت را در نظر بگیرید. ساده ترین فرم پایداری زاویه ای و ولتاژ برای ژنراتور متصل به شین بی نهایت به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \\ P_e = P_{max} \sin \delta \end{cases} \quad (2-19)$$

حد پایداری زاویه ای در $\delta = \delta_c$ به صورت رابطه ی (۲-۲۰) خواهد بود:

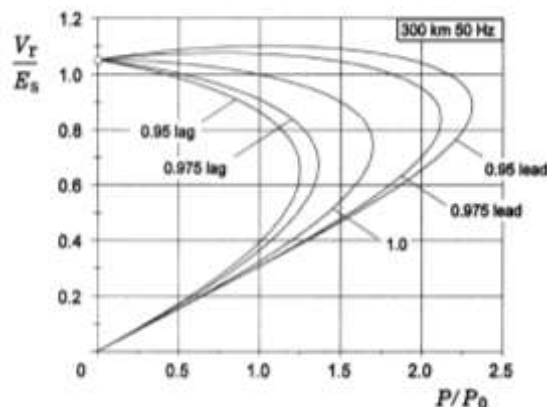
$$\begin{cases} P_{max} = \frac{|E||V_{\infty}|}{\sum X} \\ \delta_c = 90 \end{cases} \quad (2-20)$$

و حد انتقال قدرت اکتیو و حد انتقال قدرت راکتیو با $\cos \varphi$ ثابت به ترتیب با رابطه ی (۲-۲۱) و (۲-۲۲) بیان می شود:

$$\begin{cases} P_{max} = P_c = \frac{V_0^2(1 - \sin \varphi)}{2 \sum X \cdot \cos^2 \varphi} \\ V_c = \frac{V_0}{\cos \varphi} \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{2}} \end{cases} \quad (2-21)$$

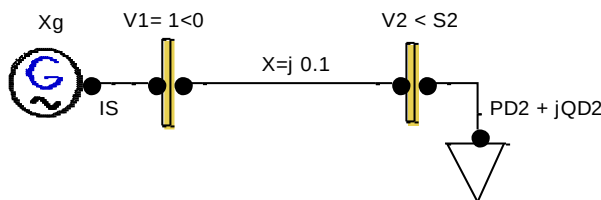
$$\begin{cases} Q_C = \frac{V_0^2(1 - \sin \varphi)}{2 \sum X \cos^2 \varphi} \\ V_C = \frac{V_0}{\cos \varphi} \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{2}} \end{cases} \quad (22-2)$$

و به این ترتیب تغییرات ولتاژ شین بار با ضریب قدرت های مختلف، مطابق شکل ۹-۲ به دست می آید.



شکل ۹-۲: نمودار تغییرات ولتاژ بر حسب تغییرات توان اکتیو به ازای $\cos \varphi$ های متفاوت

حال شبکه ی دو شینه ی زیر شامل بار و ژنراتور را در نظر بگیرید، با توجه به معادلات پخش بار روابط (۲۳-۲) و (۲۴-۲) برقرار است:



شکل ۱۰-۲: شبکه ی شامل ژنراتور متصل به بار $P_D + jQ_D$

$$\begin{cases} P_{G_1} - P_{D_1} = \sum |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ Q_{G_1} - Q_{D_1} = \sum |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (23-2)$$

$$\begin{cases} P_{G_2} - P_{D_2} = \sum |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ Q_{G_2} - Q_{D_2} = \sum |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (24-2)$$

چهار معادله، چهار مجهول شامل $P_{G_1}, Q_{G_1}, V_2, \angle \delta$ به دست می آید.

مثال ۱- با در نظر گرفتن $|V_1| = 1^{pu}$ ، $P_{D_1} = Q_{D_1} = P_{G_2} = Q_{G_2} = 0$ و تغییر $P_{D_2} + jQ_{D_2}$ منحنی های ارائه شده را برای اطلاعات شبکه ی زیر به دست می آوریم.



$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j10 & j10 \\ j10 & -j10 \end{bmatrix}$$

$$P_{G1} = -10|V_1||V_2|\sin\delta_2$$

$$Q_{G1} = 10|V_1|^2 - 10|V_1||V_2|\cos\delta_2$$

$$-P_{D2} = -10|V_1||V_2|\sin\delta_2 \rightarrow \delta_2 = \sin^{-1} \frac{P_{D2}}{10|V_2|}$$

$$-Q_{D2} = -10|V_1||V_2|\cos\delta_2 + 10|V_2|^2 \rightarrow -10|V_2|\cos(\sin^{-1} \frac{P_{D2}}{10|V_2|}) + 10|V_2|^2 + Q_{D2} = 0$$

با حذف δ_2 بین روابط Q_{D2}, P_{D2} رابطه‌ی $|V_2|$ به دست می‌آید که با نرم‌افزار MATLAB قابل رسم است.

انواع ناپایداری ولتاژ

ناپایداری ولتاژ در دو بخش طبقه‌بندی می‌شود:

(۱) استاتیکی: با افزایش آرام بار به وجود می‌آید.

(۲) دینامیکی: با افزایش ناگهانی درمقدار بار به وجود می‌آید.

حد پایداری استاتیکی ولتاژ مطابق رابطه‌ی (۲۰-۲) و حد پایداری دینامیکی آن از نامساوی

$P_L < P_{max}$ پیروی می‌کند و معادله‌ی نوسان در حالتی که ژنراتور در شین بی‌نهایت، بار را تغذیه می‌کند، به صورت رابطه‌ی (۱۹-۲) خواهد بود:

الگوریتم پایداری ولتاژ در یک شبکه‌ی چند شینه (نرم افزار PSAT)

در یک شبکه‌ی چند شینه جهت محاسبه‌ی ولتاژ شینه‌ها بر حسب الگو و رویه‌ی افزایش بار در شینه‌ها، می‌توان از طریق آنالیز حساسیت به ناپایداری پی برد. روابط کلی حاکم بر توان اکتیو و راکتیو از رابطه‌ی (۲۵-۲) به دست می‌آید:

$$\begin{cases} P_k = P_G - P_D = \sum |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ Q_k = Q_G - Q_D = \sum |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (25-2)$$

با توجه به تئوری حساسیت روابط زیر را داریم:

$$\begin{cases} \Delta P_k = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum \frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} \Delta |V_i| \\ \Delta Q_k = \sum \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum \frac{\partial Q_k}{\partial V_1} \Delta V_i \end{cases} \quad (26-2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (27-2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (28-2)$$

$$\begin{cases} \delta(n+1) = \delta(n) + \mu \Delta \delta(n) \\ V(n+1) = V(n) + \mu \Delta V(n) \end{cases} \quad (29-2)$$

مقادیر استثنایی^۱: مقادیر ویژه ی ژاکوبین $J^H \times J$ مقادیری حقیقی هستند. جذر مقادیر ویژه ی ماتریس $J^H \times J$ مقادیر استثنایی هستند وقتی J^H از رابطه ی (۲-۳۰) به دست آید:

$$J^H = (J^*)^T \quad (30-2)$$

قضیه : کوچک شدن مقادیر استثنایی σ_K نشان دهنده ی نزدیک شدن ماتریس ژاکوبین به حالت استثنایی و نزدیک شدن دترمینان آن به صفر است که این امر به واگرایی در محاسبات ولتاژ شین منجر می شود^۲.

۲-۲- طبقه بندی پدیده های گذرا و دینامیکی در سیستم قدرت

پدیده های گذرا و دینامیکی سیستم قدرت به صورت زیر طبقه بندی می شوند:

(۱) پدیده های زودگذر فوق العاده سریع^۳ مثل حالت گذرای اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه و کلیدزنی. راه حل مقابله با این اضافه ولتاژ میکروثانیه ای، نصب برق گیر در باس ترانسفورماتور است.

(۲) پدیده های زودگذر نیمه سریع^۴ مثل حالت گذرای اتصال کوتاه

^۱ Singular Value

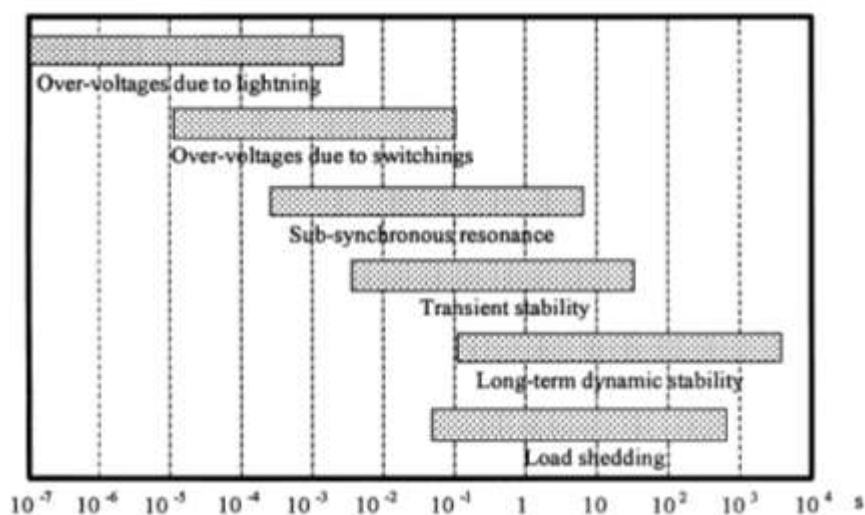
^۲ مراجعه شود به مقاله ی ناپایداری ولتاژ در جزیره قشم - هفتمین کنفرانس برق

^۳ Ultra Fast Transient

^۴ Medium Fast Transient

۳) پدیده زودگذر آهسته^۱ مرتبط با پایداری گذرا و دینامیکی ماشین های سنکرون سیستم قدرت، پایداری دینامیکی فرکانس پایین^۲

شکل ۲-۱۱ محدوده ی زمانی پدیده های مختلف در مطالعه ی دینامیک سیستم قدرت را نشان می- دهد.



شکل ۲-۱۱ : محدوده ی زمانی پدیده های مختلف در مطالعه ی دینامیک سیستم قدرت

بسته به نوع مطالعات پدیده های مختلف، عناصری را که بر سرنوشت مطالعه موثر هستند، مدلسازی می- کنیم. همچنین درجه ی مدل عناصر در مطالعات مختلف، متفاوت است.



^۱ Subtransient

^۲ SSR

تکالیف فصل دوم

۱. تمام بحث‌های پایداری زاویه‌ای (گذرا)، شامل مطالعات زمانی، تساوی سطوح و لیپانوف که روی ماشین سنکرون بررسی شد، روی ماشین آسنکرون نیز تعمیم دهید.
۲. گزارشات ملی و بین‌المللی را در رابطه با خاموشی‌های سراسری و باز وصل آن بررسی و ارائه نمایید.

تمرین های فصل دوم

۱. پدیده‌های مختلف در مطالعات دینامیک سیستم قدرت را شرح داده و عناصری از سیستم قدرت را که در سرنوشت این مطالعات دخالت می‌کنند، نام ببرید و درجه مدل‌سازی این عناصر را برای آن مطالعه تعیین کنید.

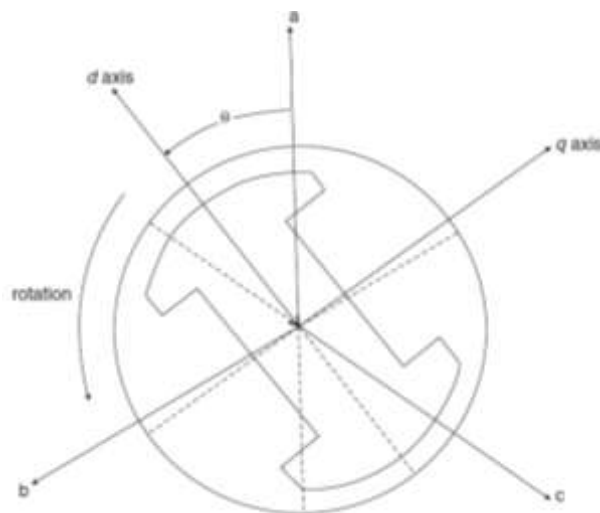
پروژه های پیشنهادی فصل دوم

۱. مقایسه‌ی روش‌های مختلف بررسی پایداری چند ماشین در سیستم‌های قدرت شامل روش‌های زمانی، سطوح مساوی و لیاپانوف.
۲. علاوه بر مطالعات Short Circuit , Voltage Build up بر روی یک ماشین سنکرون، مطالعات دینامیکی Load Rejection را در آزمایشگاه انجام دهید.
۳. مقابله با Load Rejection و طراحی بار مجازی با ترستور برای جلوگیری از Trip نیروگاه ناشی از قطع بار.
۴. پیش‌بینی Black Out [خاموشی سراسری] به روش لیاپانوف
۵. بررسی پایداری دینامیکی ولتاژ

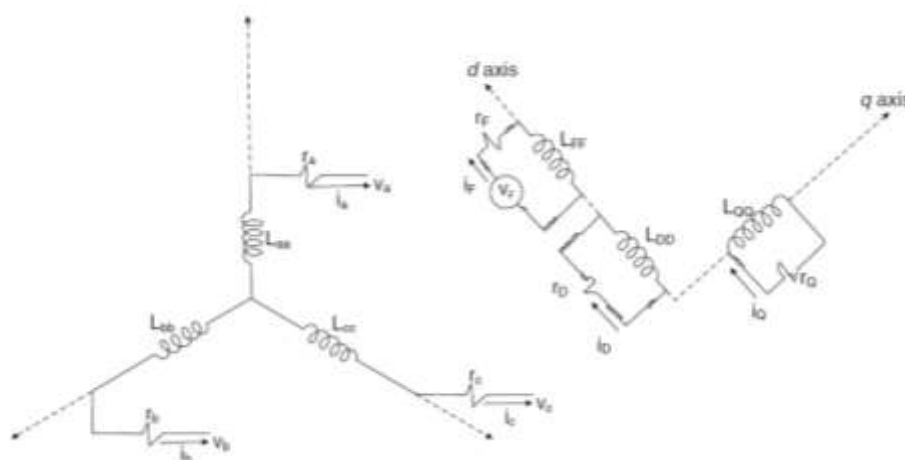
فصل سوم : مدل سازی اجزای سیستم قدرت

۳-۱- ماشین سنکرون

ژنراتور سنکرون یکی از عناصر مهم سیستم قدرت است. علاوه بر مشخصات قدرت (MW) ، ولتاژ (KV) ، سرعت (rpm) و فرکانس (Hz)، پارامترهای الکتریکی و مکانیکی دیگر نیز که در رفتار مولد به هنگام بهره‌برداری تأثیر می‌گذراند، جز مشخصات آنها توسط کارخانجات سازنده عرضه می‌شود.



شکل ۳-۱ : دیاگرام شماتیک ماشین سنکرون



شکل ۳-۲ : سیم پیچی های کوپل شده ی ماشین سنکرون

۳-۱-۱- مدل ریاضی ماشین سنکرون و معادلات ولتاژ (غیرالکتریکی)

مولد شامل سه سیم پیچ abc در استاتور که به صورت ستاره مستقیماً به زمین متصل هستند (یا از طریق امپدانس) و سیم پیچی های مستهلک کننده (damper) به صورت دو سیم پیچ اتصال کوتاه شده-ی Q, D روی دو محور d, q است. همین طور میدان دوار ژنراتور از طریق یک ولتاژ dc قابل کنترل دو سر سیم پیچی FF' تامین می شود. در مدل ژنراتور از اثر جریان گردشی فوکو در هسته ی یکپارچه صرف-نظر می کنیم. البته می توان اثر یکپارچگی را که موجب ایجاد جریان فوکو می شود، با یک سیم GG' روی محور q مدل کرد.

فرض های تسهیلی که در مدل ماشین سنکرون در نظر می گیریم، شامل موارد زیر است:

- (۱) ماشین را دوقطبی در نظر می گیریم.
- (۲) از اثر اشباع صرف نظر می کنیم.
- (۳) مولفه ی اصلی میدان در فاصله هوایی را در نظر گرفته و از هارمونیک ها صرف نظر می کنیم.
- (۴) از اثر پوستی در سیم ها صرف نظر می کنیم، چون ژنراتورها اکثراً در فرکانس 50^{Hz} هستند.
- (۵) از اثر هیستریزیس صرف نظر می کنیم.

مبحث اندوکتانس های ماشین سنکرون اهمیت ویژه ای دارد که در ادامه به آن می پردازیم.

وقتی موتور با سرعت ω می چرخد، اندوکتانس های خودی و متقابل سیم پیچ ها، بعضی ثابت و برخی تابع θ ، زاویه بین محور d و محور فرضی aa' می باشند و می توان این اندوکتانس ها را به صورت زیر دسته بندی نمود:

۱) اندوکتانس خودی فازهای استاتور که با روابط (۱-۳) تا (۳-۳) محاسبه می شوند.

$$L_{aa} = L_S + L_m \cos 2\theta \quad (1-3)$$

$$L_{bb} = L_S + L_m \cos(2\theta + 120) \quad (2-3)$$

$$L_{cc} = L_S + L_m \cos(2\theta - 120) \quad (3-3)$$

۲) اندوکتانس های متقابل فازهای استاتور که با روابط (۴-۳) تا (۶-۳) محاسبه می شوند.

$$L_{ab} = L_{ba} = -M_S + L_m \cos(2\theta - 120) \quad (4-3)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -M_S + L_m \cos 2\theta \quad (5-3)$$

$$L_{ac} = L_{ca} = -M_S + L_m \cos(2\theta + 120) \quad (6-3)$$

۳) اندوکتانس های خودی سیم پیچ های روتور که طبق رابطه ی (۷-۳) محاسبه می شود.

$$L_{ff} = L_f, L_{DD} = L_D, L_{QQ} = L_Q \quad (7-3)$$

چون این سیم پیچ ها همراه روتور می چرخند، مقدارشان با زمان تغییر نمی کند.

۴) اندوکتانس های متقابل سیم پیچ های روتور که طبق رابطه ی (۸-۳) محاسبه می شوند.

$$L_{FD} = L_{DF} = M_{FD} \quad (8-3)$$

چون دو سیم پیچ بر هم عمودند $L_{FQ} = L_{QF} = 0$ می باشد.

۵) اندوکتانس های متقابل بین سیم پیچ میدان و فازهای استاتور که با روابط (۹-۳) تا (۱۱-۳) محاسبه می شوند.

$$L_{Fa} = L_{aF} = M_F \cos \theta \quad (9-3)$$

$$L_{Fb} = L_{bF} = M_F \cos(\theta - 120) \quad (10-3)$$

$$L_{Fc} = L_{cF} = M_F \cos(\theta - 240) \quad (11-3)$$

۶) اندوکتانس های متقابل بین سیم پیچ میرایی محور طولی (d) و فازهای استاتور که با روابط (۱۲-۳) تا (۱۴-۳) محاسبه می شوند.

$$L_{Da} = L_{aD} = M_D \cos \theta \quad (12-3)$$

$$L_{Db} = L_{bD} = M_D \cos(\theta - 120) \quad (13-3)$$

$$L_{Dc} = L_{cD} : M_D \cos(\theta - 240) \quad (۱۴-۳)$$

۷) اندوکتانس‌های متقابل بین سیم‌پیچ میرایی محور عرضی (q) و فازهای استاتور که با روابط (۱۵-۳) تا (۱۷-۳) محاسبه می‌شوند.

$$L_{qa} = L_{aq} = M_Q \sin \theta \quad (۱۵-۳)$$

$$L_{qb} = L_{bq} = M_Q \sin(\theta - 120) \quad (۱۶-۳)$$

$$L_{Qc} = L_{cQ} = M_Q \sin(\theta - 240) \quad (۱۷-۳)$$

در واقع ژنراتور، کوپلاژ الکترومغناطیسی بین شش تا سیم‌پیچی است.

معادلات ولتاژ استاتور و روتور مولد سنکرون قبل از اعمال تبدیل پارک به ترتیب مطابق روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳) می‌باشد:

$$\begin{cases} V_a = -R_a i_a - \frac{d\lambda_a}{dt} \\ V_b = -R_b i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} \\ V_c = -R_c i_c - \frac{d\lambda_c}{dt} \end{cases} \quad (۱۸-۳)$$

$$\begin{cases} V_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} \end{cases} \quad (۱۹-۳)$$

فلوی در برگیرنده‌ی سیم‌پیچ‌ها بر حسب اندوکتانس‌ها و جریان سیم‌پیچ‌ها با رابطه‌ی (۲۰-۳) محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (۲۰-۳)$$

۳-۱-۲- مدل پارک ماشین سنکرون و معادلات ولتاژ

با استفاده از تبدیل پارک سه اندوکتانس X_d, X_q, X_0 خواهیم داشت. توجه کنید در عمل، اندازه-گیری راکتانس به طریق آزمایشگاهی بسیار مشکل است. برای رهایی از این مشکل از طریق تبدیل پارک، به جای سه سیم پیچ abc در استاتور دو سیم پیچ d, q روی محور طولی d و محور عرضی q و یک سیم پیچ صفر (هَموپلر) عمود به صفحه d, q داریم که این سیم پیچ در مطالعات سیستم های متقارن متعادل اثر ندارد و با سرعت ω می چرخد و این سیم پیچ ها آثار ناشی از سه فاز را دارند.

مقدار ولتاژ، جریان در سیم پیچ های d و q و 0 از روابط زیر به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (۳-۲۱)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (۳-۲۲)$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (۳-۲۳)$$

اندوکتانس های سنکرون محورهای d, q و 0 با توجه به تبدیل پارک به ترتیب طبق روابط (۳-۲۴) تا (۳-۲۶) محاسبه می شوند:

$$L_d = L_s - M_s + \frac{3}{2} L_m \rightarrow X_d = L_d \omega \quad (۳-۲۴)$$

$$L_q = L_s - M_s - \frac{3}{2} L_m \rightarrow X_q = L_q \omega \quad (۳-۲۵)$$

$$L_0 = L_s + 2M_s \rightarrow X_0 = L_0 \omega \quad (۳-۲۶)$$

معادلات ولتاژ استاتور و روتور مولد سنکرون پس از اعمال تبدیل پارک به ترتیب طبق روابط (۳-۲۷) و (۳-۲۸) خواهد بود:

$$\begin{cases} V_d = -Ri_d - \frac{d\lambda_d}{dt} - \lambda_q\omega \\ V_q = -Ri_q - \frac{d\lambda_q}{dt} + \lambda_d\omega \\ V_0 = -Ri_0 - \frac{d\lambda_0}{dt} \end{cases} \quad (27-3)$$

$$\begin{cases} V_F = +R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} \end{cases} \quad (28-3)$$

وقتی که $R_a = R_b = R_c = R$ و روابط شار پیوندی محورهای d , q و 0 به ترتیب طبق روابط (29-3) تا (31-3) باشد.

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_f \\ \lambda_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D \\ kM_F & L_F & M_{FD} \\ kM_D & M_{FD} & L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \end{bmatrix} \quad (29-3)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_q \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & kM_Q \\ kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (30-3)$$

$$\lambda_0 = L_0 i_0 \quad (31-3)$$

۳-۱-۳- مدل مکانیکی ماشین سنکرون

معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر بخش مکانیکی ماشین سنکرون طبق رابطه‌ی (32-3) بیان می‌شود:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} + D\omega = T_m - T_e \\ T_e = i_d \lambda_q - i_q \lambda_d \end{cases} \quad (32-3)$$

در این بخش به اثبات رابطه‌ی گشتاور الکتریکی در ماشین سنکرون می‌پردازیم. رابطه‌ی (33-3) برای محاسبه‌ی توان الکتریکی را می‌دانیم:

$$P = i^T V = i^T \left[Ri + \frac{d}{dt} L(\theta) i + L(\theta) \frac{di}{dt} \right] = i^T Ri + i^T \frac{d}{dt} L(\theta) i + i^T L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (33-3)$$

اگر عبارت $\frac{1}{2} i^T L(\theta) i$ انرژی ذخیره شده در سیم پیچ ها و $i^T R i$ تلفات سیم پیچ ها باشد، توان ذخیره شده در میدان از رابطه ی (۳-۳۴) به دست می آید:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i^T L(\theta) i \right) = \frac{1}{2} \frac{di^T}{dt} L(\theta) i + \frac{1}{2} i^T \frac{dL(\theta)}{dt} i \quad (۳-۳۴)$$

توان تحویلی الکتریکی مولد طبق رابطه ی (۳-۳۵) عبارت است از:

$$P_e = \frac{1}{2} i^T \frac{dL(\theta)}{dt} i = \frac{1}{2} i^T \frac{dL}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dt} i = P_e = \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{1}{2} i^T \frac{dL}{d\theta} i \right) \quad (۳-۳۵)$$

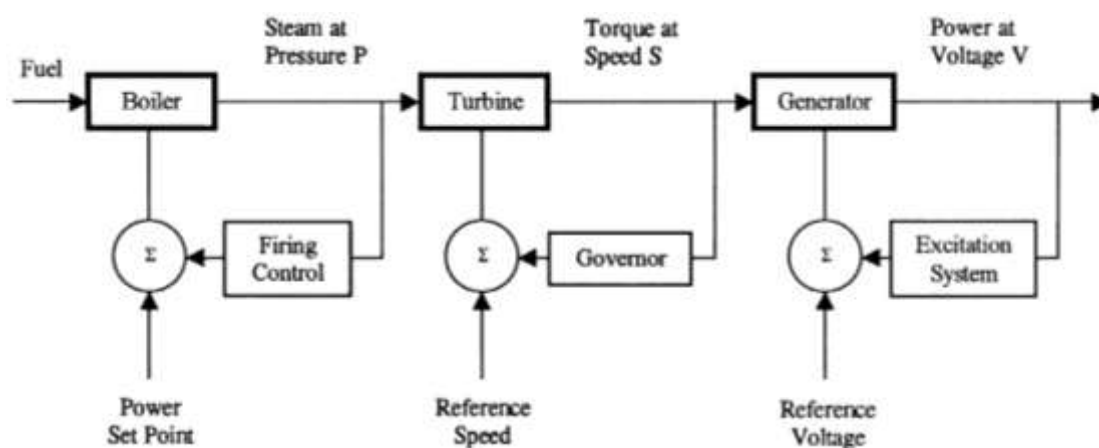
حال با استفاده از رابطه ی (۳-۳۶) می توان رابطه ی گشتاور الکتریکی را به دست آورد.

$$P_C = \omega T_e \quad (۳-۳۶)$$

$$T_e = \frac{1}{2} i^T \frac{dL}{d\theta} i = \frac{1}{2} (B^T i_B)^T \frac{d}{d\theta} (B^{-1} L_B B) B^{-1} i_B = i_B^T B \frac{dB^{-1}}{d\theta} \lambda_B = i_d \lambda_q - i_q \lambda_d \quad (۳-۳۷)$$

۳-۲- سیستم تحریک

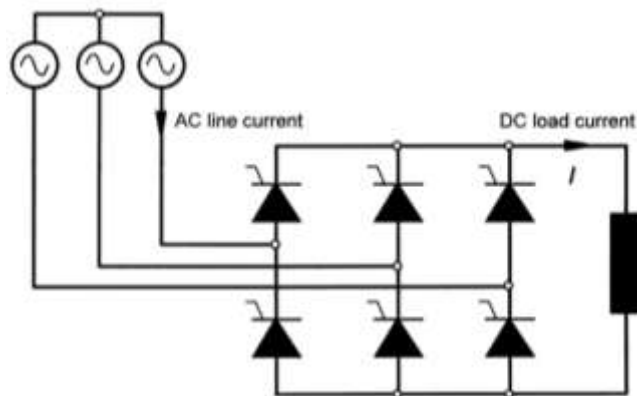
حلقه ی اصلی کنترل ژنراتور سنکرون را در نظر بگیرید:



شکل ۳-۳: حلقه ی اصلی کنترل ژنراتور سنکرون

سیستم تحریک نشان داده شده در شکل، منبع تأمین جریان dc برای سیم پیچ میدان یعنی روتور مولد است. قدرت آن حدود یک تا دو درصد قدرت مولد است.

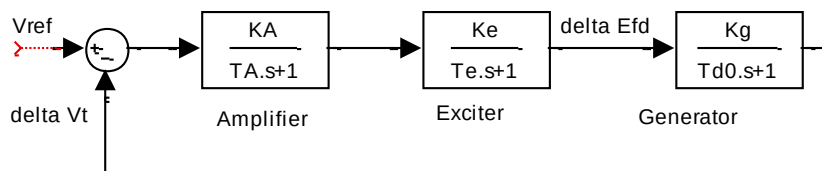
در مولدهای قدیمی، از یک موتور dc هم‌محور با مولد اصلی استفاده می‌شد و یا جریان dc از طریق حلقه‌های اصطکاک و جاروبک^۱ به روتور اصلی انتقال می‌یافت ولی در مولدهای امروزی از تحریک‌های Ac یا دیود گردان بدون جاروبک^۲ و یا از تحریک استاتیکی ترستوری استفاده می‌شود.



شکل ۳-۴ : مدار یک سوساز سه فاز

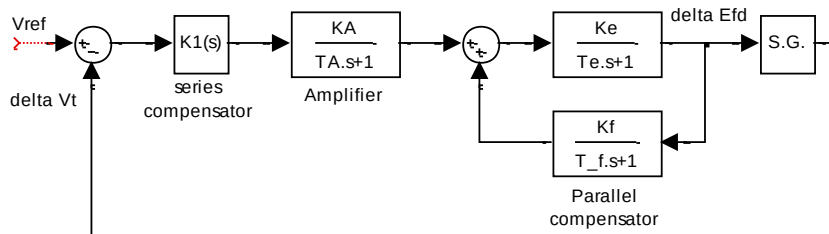
۳-۲-۱- بررسی دینامیکی سیستم های تحریک بدون جاروبک

بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جبران‌سازهای سری و موازی مطابق شکل ۳-۵ است:



شکل ۳-۵ : بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جبران‌سازهای سری و موازی

و بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جاروبک با در نظر گرفتن جبران‌سازهای سری و موازی مطابق شکل ۳-۶ خواهد بود:



^۱ Brush & Slipping

^۲ Brush less

شکل ۳-۶: بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جاروبک با جبران سازه‌های سری و موازی

به عنوان یک حالت خاص، اگر به جای مدل درجه‌ی سه هفرون فیلیپس، مدل درجه یک ماشین سنکرون را بدون جبران‌کننده‌ها در نظر بگیریم، تابع تبدیل دیاگرام حلقه‌ی کنترل ولتاژ به صورت رابطه-ی (۳۸-۳) خواهد بود:

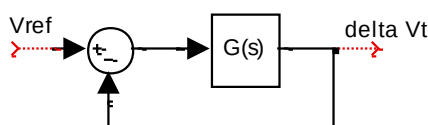
$$\frac{\Delta V_t}{\Delta E_{fd}} = \frac{k_g}{1 + ST'_{d0}} \quad (38-3)$$

وقتی که T'_{d0}, k_g از رابطه‌ی (۳۹-۳) محاسبه می‌شود:

$$k_g = \frac{wL_{fd}}{\sqrt{2}R_f}, T'_{d0} = \frac{L_f}{R_f} \quad (39-3)$$

۳-۲-۲- بررسی تأثیر سیستم تحریک در پایداری مولد

بر طبق شکل ۳-۵ بلوک دیاگرام سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور سنکرون را می‌توان به صورت شکل ۳-۷ نمایش داد، وقتی که تابع تبدیل $G(S)$ از رابطه‌ی (۴۰-۳) محاسبه می‌گردد:



شکل ۳-۷: بلوک دیاگرام سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور سنکرون

$$\rightarrow G(S) = \frac{k_A k_e k_g}{(1 + ST_A)(1 + ST_e)(1 + ST'_{d0})} \quad (40-3)$$

در این صورت تابع تبدیل سیستم مطابق رابطه‌ی (۴۱-۳) خواهد بود:

$$\frac{\Delta V_t}{V_{ref}} = \frac{G(S)}{1 + G(S)} \quad (41-3)$$

ریشه‌های مخرج تابع تبدیل سیستم برای بررسی پایداری آن تعیین‌کننده است، در نتیجه باید به محاسبه‌ی آنها پرداخت وقتی که $K = k_A k_e k_g$ است.

$$1 + G(S) = 0 \rightarrow 1 + \frac{K}{(1 + ST_A)(1 + ST_e)(1 + ST'_{d0})} = 0 \quad (42-3)$$

$$\rightarrow (1 + ST_A)(1 + ST_e)(1 + ST'_{d0}) + K = 0$$

در نتیجه قطب‌های سیستم حلقه بسته از رابطه‌ی (۴۲-۳) به دست می‌آید و اگر ریشه‌های این معادله، یعنی S_i ها، دارای قسمت حقیقی منفی باشند، سیستم پایدار است.

جهت پایداری سیستم معمولاً شرایط زیر را داریم :

$$0.02^s < T_A < 0.1^s, \quad 0.5^s < T_e < 1^s, \quad 5^s < T'_{d0} < 10^s \quad (۴۳-۳)$$

اگر $K=0$ باشد، قطب‌های سیستم حلقه بسته از رابطه‌ی (۴۴-۳) به دست می‌آید:

$$S_1 = \frac{1}{T_A}, S_2 = -\frac{1}{T_e}, S_3 = -\frac{1}{T'_{d0}} \quad (۴۴-۳)$$

می‌توان مکان هندسی ریشه‌ها را وقتی K تغییر می‌کند، رسم نمود. با توجه به شکل مکان هندسی ریشه‌ها می‌توان ملاحظه نمود که به ازای بعضی از مقادیر K ریشه‌ها به سمت راست محور $j\omega$ رفته و سیستم ناپایدار می‌شود.

راه حل برای پایداری نمودن سیستم، استفاده از جبران‌کننده‌های پایداری ساز سیستم تحریک است. می‌دانیم با افزایش ضریب K خطای ماندگار کاهش پیدا می‌کند ولی باعث تضعیف پایداری می‌شود، اما با اضافه کردن جبران‌کننده‌های سری و موازی این تعارض برطرف می‌شود، لذا با افزودن یک جبران‌کننده-ی سری با تابع تبدیل $K_1(S) = 1 + T_C S$ ، تابع تبدیل حلقه باز به صورت رابطه‌ی (۴۵-۳) در می‌آید:

$$G(S) = \frac{K(1 + ST_C)}{(1 + ST_A)(1 + ST_e)(1 + ST'_{d0})} \quad (۴۵-۳)$$

با تنظیم ثابت زمانی جبران‌کننده‌ی سری به صورت $T_C \simeq T_e$ ، تابع تبدیل حلقه باز به صورت زیر در می‌آید:

$$G(S) = \frac{K}{(1 + ST_A)(1 + ST'_{d0})} \quad (۴۶-۳)$$

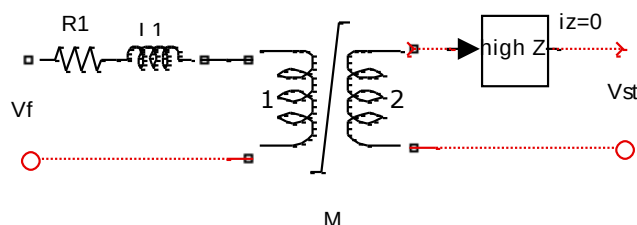
و مکان ریشه‌ها در حالت استفاده از جبران‌ساز سری به ازای $K=0$ طبق رابطه‌ی (۴۷-۳) به دست می‌آید:

$$S_1 = -\frac{1}{T_A}, S_2 = -\frac{1}{T'_{d0}} \quad (۴۷-۳)$$

در نتیجه، با افزایش بهره‌ی K ضمن اینکه سیستم پایدار است، خطای ماندگار نیز کاهش می‌یابد.

۳-۲-۳- بررسی حلقه ی کنترل ولتاژ مولد dc تحریک مستقل با جبران سازها

اگر مدار معادل از دو سر ترانس پایدارساز به عنوان جبران ساز موازی به صورت شکل ۸-۳ نمایش داده شود، رابطه ی (۵۰-۳) تابع تبدیل جبران ساز موازی را بیان می کند.



شکل ۸-۳ : مدار معادل از دو سر جبران ساز موازی

$$V_f = R_1 i_{ST} + L_1 \frac{di_{ST}}{dt} \quad (48-3)$$

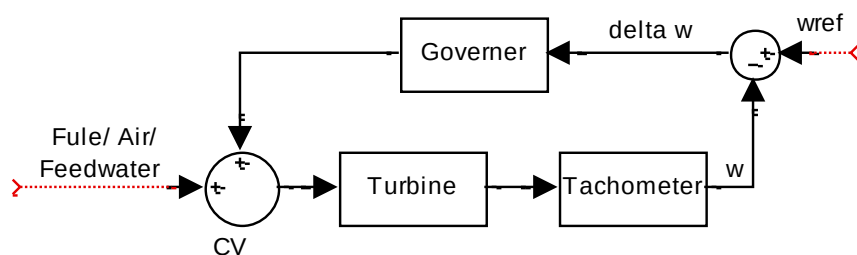
$$V_{ST} = M \frac{di_{ST}}{dt} \quad (49-3)$$

$$\frac{V_{ST}(S)}{V_f(S)} = \frac{MS}{R_1 + L_1 S} = \frac{k_f S}{1 + T_f S} \quad (50-3)$$

وقتی که V_{ST} ولتاژ ترانس سری، V_f ولتاژ فیلد ژنراتور و $T_f = \frac{L_1}{R_1}$ ، $k_f = \frac{M}{R_1}$ می باشد.

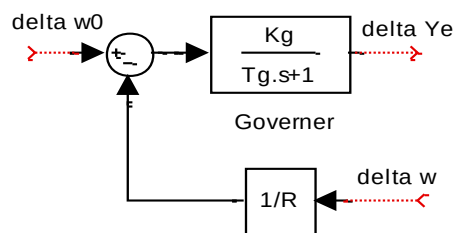
۳-۳- مدل سازی گاورنر

حلقه ی کنترل فرکانس را در نیروگاه مطابق شکل ۹-۳ در نظر بگیرید :



شکل ۹-۳ : حلقه ی کنترل فرکانس در نیروگاه

جیمز وات، اولین گاورنر مکانیکی (تنظیم کننده ی سرعت) را ساخت که مدل ریاضی آن توسط ماکسول، استخراج شده بود. تابع تبدیل، ورودی و خروجی گاورنر در شکل ۱۰-۳ نشان داده شده است.

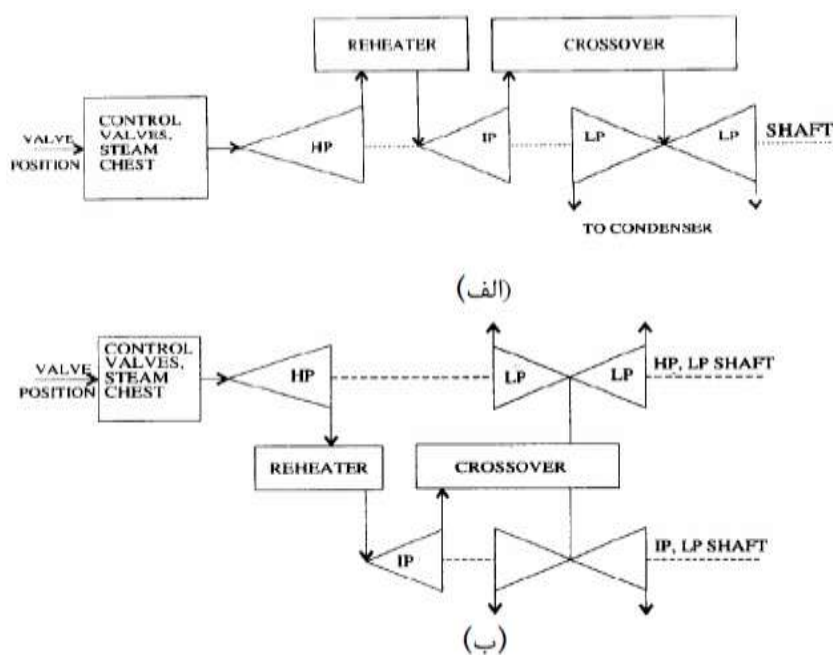


شکل ۳-۱۰ : بلوک دیاگرام گاورنر

وقتی که R ، ضریب تنظیم گاورنر است.

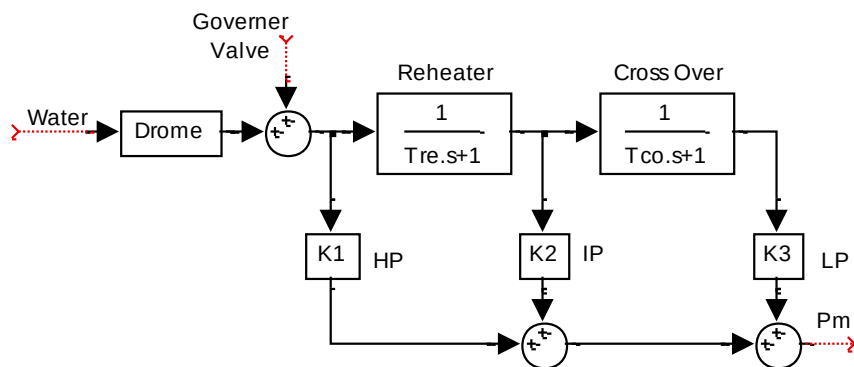
۳-۴- مدل سازی توربین

توربین بخار می تواند شامل سه طبقه توربین فشار قوی، فشار متوسط و فشار ضعیف باشد. شکل ۳-۱۱ توربین بخار را در دو حالت حضور یک Reheater نمایش می دهد.



شکل ۳-۱۱ : سیستم توربین بخار با یک گرم کننده ی مجدد (a) Tandem compound (b) Cross compound

و بلوک دیاگرام توربین بخار شکل فوق، مطابق شکل ۳-۱۲ خواهد بود:



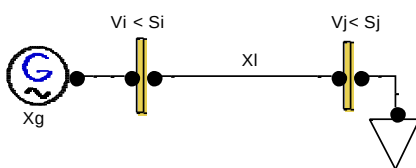
شکل ۳-۱۲ : بلوک دیاگرام توربین بخار

$$K_{1,HP} + K_{2,IP} + K_{3,LP} = 1 \quad (۵۱-۳)$$

وقتی که رابطه‌ی (۵۱-۳) بین گین‌های سه طبقه‌ی توربین برقرار باشد.

۳-۵- مدل توربوژنراتور متصل به شین بی نهایت

شکل ۳-۱۳ را در نظر بگیرید :



شکل ۳-۱۳ : مدل ژنراتور متصل به بار

قدرت انتقالی در خط از رابطه‌ی (۵۲-۳) به دست می‌آید:

$$P_{ij} = \frac{|V_i||V_j|}{X_{ij}} \sin \delta_{ij} \quad (۵۲-۳)$$

وقتی که $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ است.

ماکزیمم قدرت انتقالی در $\delta_{ij} = 90$ درجه اتفاق می‌افتد و مطابق رابطه‌ی (۵۳-۳) محاسبه می‌شود:

$$P_{max} = \frac{|V_i||V_j|}{X_{ij}} \quad (۵۳-۳)$$

با کاهش X_{ij} ، قدرت انتقالی در خط تا حد حرارتی خط افزایش می‌یابد و به دو روش می‌توان X_{ij} را

کم کرد:

(۱) احداث خط کمکی : در صورت مشابه بودن خط کمکی با خط اصلی راکتانس معادل خط از رابطه‌ی (۵۴-۳) به دست می‌آید:

$$x_{eq} = \frac{1}{2} x_{ij} \quad (۵۴-۳)$$

(۲) استفاده از خازن سری : اگر راکتانس خازنی را با x_C نمایش دهیم، راکتانس معادل خط از رابطه‌ی (۵۵-۳) به دست می‌آید:

$$x_{eq} = x_{ij} - x_C \quad (۵۵-۳)$$

دقت شود، حضور خازن سری اگرچه موجب کاهش راکتانس خط می‌شود، اما امکان وقوع نوسانات زیرسنکرون^۱ SSR را بر روی محور توربوژنراتور افزایش می‌دهد.

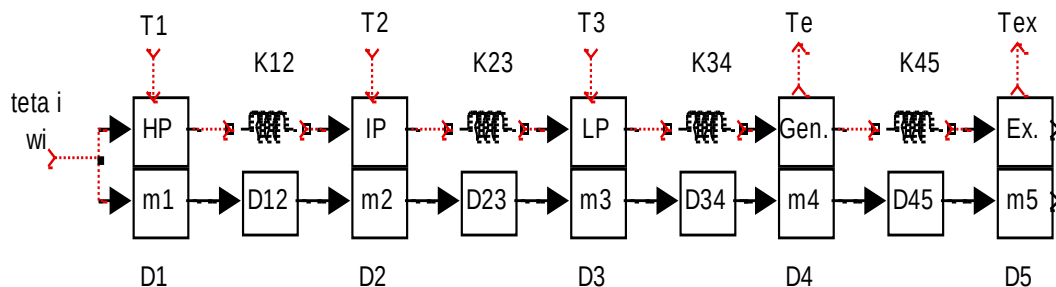
سلف L و خازن C خط دارای یک فرکانس طبیعی الکتریکی f_e مطابق رابطه‌ی (۵۶-۳) است. اگر مجموع f_e با یکی از فرکانس‌های f_m چند جرم و فنر روتور که همان مقادیر ویژه‌ی ماتریس A مدل چند جرم و فنر است، برابر فرکانس شبکه شد، انرژی زیادی بین شبکه و روتور مبادله می‌شود که موجب شکستن محور توربوژنراتور خواهد شد.

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (۵۶-۳)$$

در نتیجه شرط وقوع SSR برقراری رابطه‌ی (۵۷-۳) است:

$$f = f_e + f_m \quad (۵۷-۳)$$

شکل ۱۴-۳ بلوک دیاگرام یک توربوژنراتور متصل به شین بی‌نهایت را نشان می‌دهد. وقتی که k ضریب فنر، D نمایش گر damper و توربین بخار تشکیل شده از چند طبقه‌ی $LP-IP-HP$ است.



شکل ۱۴-۳ : دیاگرام یک توربوژنراتور متصل به شین بی‌نهایت

معادله ی گشتاور جرم λ_m ، با توجه به اینکه گشتاور محور و گشتاور توربین T_i مخالف یکدیگرند، در حالت کلی به صورت رابطه ی (۵۸-۳) است:

$$\begin{cases} M_i \Delta \dot{\omega}_i = \Delta T_i - D \Delta \omega_i + k_{i-1,i} (\Delta \theta_{i-1} - \Delta \theta_i) - k_{i,i+1} (\Delta \theta_i - \Delta \theta_{i+1}) \\ \Delta \dot{\theta}_i = \omega_0 \Delta \omega_i \end{cases} \quad (58-3)$$

در ادامه برای توربوژنراتور نشان داده شده در شکل ۳-۱۴ معادلات گشتاور را می نویسیم وقتی که $i=1,2,\dots,5$ است. سه طبقه ی $LP-IP-HP$ توربین بخار نقش گشتاور محرک و ژنراتور نقش گشتاور مخالف را دارد. روابط (۵۹-۳) تا (۶۳-۳) به ترتیب برای سه طبقه توربین بخار $LP-IP-HP$ ، ژنراتور و تحریک نوشته شده اند.

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_H = \frac{1}{M_H} [\Delta T_H - D_H \Delta \omega_H - k_{HI} (\Delta \theta_H - \Delta \theta_I)] \\ \Delta \dot{\theta}_H = \omega_0 \Delta \omega_H \end{cases} \quad (59-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_I = \frac{1}{M_I} [\Delta T_I - D_I \Delta \omega_I - k_{HI} (\Delta \theta_H - \Delta \theta_I) - k_{IL} (\Delta \theta_I - \Delta \theta_L)] \\ \Delta \dot{\theta}_I = \omega_0 \Delta \omega_I \end{cases} \quad (60-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_L = \frac{1}{M_L} [\Delta T_L - D_L \Delta \omega_L + k_{IL} (\Delta \theta_I - \Delta \theta_L) - k_{LG} (\Delta \theta_L - \Delta \theta_G)] \\ \Delta \dot{\theta}_L = \omega_0 \Delta \omega_L \end{cases} \quad (61-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M_G} [-\Delta T_e - D_G \Delta \omega + k_{LG} (\Delta \theta_L - \Delta \delta) - k_{G,ex} (\Delta \delta - \Delta \theta_{ex})] \\ \Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \end{cases} \quad (62-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_{ex} = \frac{1}{M_{ex}} [\Delta T_{ex} - D_{ex} \Delta \omega_{ex} + k_{G,ex} (\Delta \delta - \Delta \theta_{ex})] \\ \Delta \dot{\theta}_{ex} = \omega_0 \Delta \omega_{ex} \end{cases} \quad (63-3)$$

این معادلات دقیق است و برای بررسی پدیده ی SSR به جای رابطه ی (۳۲-۳) باید معادلات چند جرم و فنر فوق به کار رود.

معادلات دینامیکی چند جرم و فنر را می توان به صورت معادله حالت (۶۴-۳) بیان نمود وقتی که متغیرهای حالت و ورودی ها به ترتیب مطابق روابط (۶۵-۳) و (۶۶-۳) هستند:

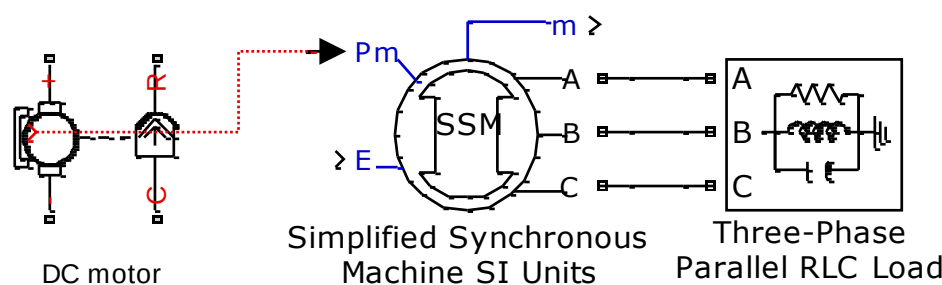
$$\dot{X}_m = [A]X_m + [B]u_m \quad (64-3)$$

$$X_m = [\Delta\omega_H, \Delta\theta_H, \Delta\omega_I, \Delta\theta_I, \Delta\omega_L, \Delta\theta_L, \Delta\omega, \Delta\delta, \Delta\omega_{ex}, \Delta\theta_{ex}]^T \quad (65-3)$$

$$u_m = [\Delta T_H, \Delta T_I, \Delta T_L, \Delta T_e, \Delta T_{ex}]^T \quad (66-3)$$

۳-۶- میکرو ماشین جهت مطالعات دینامیکی

شکل ۳-۱۵ را در نظر بگیرید که در آن از یک موتور dc جهت تامین توان مکانیکی ژنراتور سنکرون استفاده می شود تا مولد سنکرون بتواند توان الکتریکی مورد نیاز بار مورد نظر را تامین نماید. این مجموعه به عنوان یک میکرو ماشین، جهت انجام مطالعات دینامیکی مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۳-۱۵ : مدل شماتیک میکرو ماشین

۳-۶-۱- دینامیک ولتاژ سازی در مختصات دو محوری و سه محوری

معادلات الکتریکی ماشین سنکرون در حوزه ی abc به صورت ماتریسی از رابطه ی (۳-۶۷) پیروی می کند:

$$v = -Ri - \frac{d\lambda}{dt} \quad (67-3)$$

وقتی که ماتریس ها به صورت روابط (۳-۶۸) تا (۳-۷۱) در نظر گرفته می شوند:

$$v = [v_a, v_b, v_c, -v_F, -v_D, -v_Q]^T \quad (68-3)$$

$$i = [i_a, i_b, i_c, i_F, i_D, i_Q]^T \quad (69-3)$$

$$\lambda = [\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_Q]^T \quad (70-3)$$

$$R = [r, r, r, r_F, r_D, r_Q]^T \quad (71-3)$$

با توجه به صرف نظر کردن از اثر اشباع و خطی بودن اندوکتانس های سیم پیچ ها، ۳۶ اندوکتانس خودی و متقابل داریم که با ماتریس رابطه ی (۳-۷۲) نمایش داده می شود:

$$L(\theta) = \begin{bmatrix} L_{11}(\theta) & L_{12}(\theta) \\ L_{21}(\theta) & L_{22}(\theta) \end{bmatrix} \quad (72-3)$$

وقتی که درایه‌های ماتریس اندوکتانس از روابط (73-3) تا (75-3) به دست می‌آیند:

$$L_{11}(\theta) = \begin{bmatrix} L_s + L_m \cos 2\theta & -M_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & -M_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \\ -M_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & -M_s + L_m \cos 2\theta \\ -M_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & -M_s + L_m \cos 2\theta & L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (73-3)$$

$$L_{12}(\theta) = L_{21}(\theta) = \begin{bmatrix} M_F \cos \theta & M_D \cos \theta & M_Q \sin \theta \\ M_F \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & M_D \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & M_Q \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \\ M_F \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & M_D \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & M_Q \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (74-3)$$

$$L_{22}(Q) = \begin{bmatrix} L_F & M_{FD} & 0 \\ M_{FD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad (75-3)$$

و با استفاده از رابطه‌ی (76-3) می‌توان رابطه‌ی (77-3) را به صورت رابطه‌ی (77-3) نوشت:

$$\lambda = [L(\theta)]i \quad (76-3)$$

$$v = -Ri - \frac{dL}{dt}i - L \frac{di}{dt} \quad (77-3)$$

در نتیجه شش تا معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی متغیر با زمان خواهیم داشت. برای تبدیل رابطه‌ی ولتاژ به معادلات غیرخطی ثابت با زمان از تبدیل پارک استفاده می‌کنیم. وقتی که ماتریس تبدیل P از رابطه‌ی (78-3) پیروی کند و با ضرب ماتریس B در هر یک از کمیت‌ها معادل آنها را طبق رابطه‌ی (80-3) در فضای جدید داشته باشیم.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (78-3)$$

$$B = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (۷۹-۳)$$

$$v_B = Bv, \lambda_B = B\lambda, i_B = Bi \quad (۸۰-۳)$$

در نتیجه می توان رابطه ی شار پیوندی را به صورت رابطه ی (۸۱-۳) نوشت:

$$B^{-1}\lambda_B = L(\theta)B^{-1}i_B \quad (۸۱-۳)$$

با ضرب نمودن ماتریس B در رابطه ی فوق خواهیم داشت:

$$\lambda_B = BL(\theta)B^{-1}i_B = L_B i_B \quad (۸۲-۳)$$

که L_B مطابق رابطه ی (۸۳-۳) تعریف شده و محاسبه می شود:

$$L_B = BL(\theta)B^{-1} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_{FD} & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_{FD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad (۸۳-۳)$$

وقتی که $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$ است و پارامترهای ماتریس L_B از روابط زیر به دست می آیند:

$$L_0 = L_S - 2M_S \quad (۸۴-۳)$$

$$L_d = L_S - M_S + \frac{3}{2}L_m \quad (۸۵-۳)$$

$$L_q = L_S - M_S - \frac{3}{2}L_m \quad (۸۶-۳)$$

در نتیجه ملاحظه می شود در رابطه ی (۸۲-۳) درایه های L_B ثابت و مستقل از زمان هستند.

اگر رابطه ی اصلی ولتاژ یعنی رابطه ی (۶۷-۳) را به حوزه ی $dq0$ ببریم و ماتریس B را در آن ضرب نماییم، به رابطه ی (۸۸-۳) می رسیم.

$$B^{-1}v_B = -RB^{-1}i_B - \frac{d}{dt}(B^{-1}\lambda_B) \quad (۸۷-۳)$$

$$v_B = -BRB^{-1}i_B - B\frac{d}{dt}(B^{-1}\lambda_B) = -\Re i_B - B\frac{dB^{-1}}{dt}\lambda_B - \frac{d}{dt}\lambda_B \quad (۸۸-۳)$$

وقتی که $\Re = -BRB^{-1}$ باشد، $B \frac{dB^{-1}}{dt} \lambda_B$ ولتاژ چرخشی و $\frac{d\lambda_B}{dt}$ ولتاژ ترانسفورماتوری است.

اگر معادله ی v_B را برای محورهای $dq0$ بازنویسی نماییم، به روابط (۸۹-۳) تا (۹۱-۳) دست می یابیم.

$$\begin{cases} v_d = -r'_d i_d - \omega \lambda_d - \frac{d\lambda_d}{dt} \\ v_F = -r_F i_F - \frac{d\lambda_F}{dt} \\ v_D = -r_D i_D - \frac{d\lambda_D}{dt} = 0 \end{cases} \quad (۸۹-۳)$$

$$\begin{cases} v_q = -r_i i_q + \omega \lambda_q - \frac{d\lambda_q}{dt} \\ v_Q = -r_Q i_Q - \frac{d\lambda_Q}{dt} = 0 \end{cases} \quad (۹۰-۳)$$

$$v_0 = r_0 i_0 - \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (۹۱-۳)$$

معادلات شار در محورهای $dq0$ نیز از روابط (۹۲-۳) تا (۹۴-۳) به دست می آیند:

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_F \\ \lambda_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D \\ kM_F & L_F & M_{FD} \\ kM_D & M_{FD} & L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \end{bmatrix} \quad (۹۲-۳)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_q \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & kM_Q \\ kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (۹۳-۳)$$

$$\lambda_0 = i_0 L_0 \quad (۹۴-۳)$$

در نتیجه، اگر از محور صفر صرف نظر شود، بر بخش الکتریکی ماشین سنکرون، پنج معادله ی دیفرانسیل غیر خطی ثابت با زمان حاکم است.

۳-۷- مدل خطی هفرون فیلیپس ماشین سنکرون

در فصل پنج کتاب فواد و اندرسون، ماشین سنکرون با توجه به مدل غیرخطی دو محوری اش به روش زیر، حول نقطه ی کار خطی شده است.

اگر متغیر x_i از مقدار نامی x_{i0} به اندازه Δx_i تغییر کند یعنی مقدار جدید $x_{i0} + \Delta x_i$ را بگیرد، جملات غیرخطی زیر را به صورت زیر خطی می کنیم.

الف) برای عنصر غیرخطی $x_i x_j$ را پس از نمو رابطه‌ی (۹۵-۳) را داریم:

$$(x_{i0} + \Delta x_i)(x_{j0} + \Delta x_j) = x_{i0}x_{j0} + x_{i0}\Delta x_j + x_{j0}\Delta x_i + \Delta x_i\Delta x_j \quad (95-3)$$

چون $\Delta x_i, \Delta x_j$ کوچک هستند، از حاصلضرب آنها صرف نظر می کنیم و به رابطه‌ی (۹۶-۳) دست می یابیم.

$$(x_{i0} + \Delta x_i)(x_{j0} + \Delta x_j) - x_{i0}x_{j0} = x_{i0}\Delta x_j + \Delta x_i x_{j0} \quad (96-3)$$

ب) روابط مثلثاتی را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \cos(\delta_0 + \Delta\delta) = \cos\delta_0 \cos\Delta\delta - \sin\delta_0 \sin\Delta\delta \\ \sin(\delta_0 + \Delta\delta) = \sin\delta_0 \cos\Delta\delta + \cos\delta_0 \sin\Delta\delta \end{cases} \quad (97-3)$$

اگر $\Delta\delta$ کوچک باشد، به رابطه‌ی (۹۸-۳) می رسیم:

$$\begin{cases} \cos(\delta_0 + \Delta\delta) - \cos\delta_0 = \Delta\delta \sin\delta_0 \\ \sin(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin\delta_0 = \Delta\delta \cos\delta_0 \end{cases} \quad (98-3)$$

دو نکته‌ی مهم را باید در مورد مولد سنکرون در نظر بگیریم:

(۱) E'_q معادل ولتاژ ایجاد شده در استاتور ناشی از λ_f است وقتی که $L_{aa} = L_a + L_{md}$ است.

$$E'_q = \lambda_f \frac{L_{md}}{\sqrt{3}L_f} \quad (99-3)$$

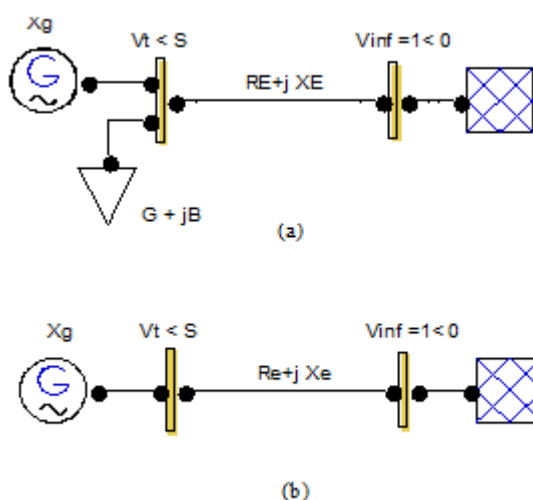
(۲) E_{fd} معادل ولتاژ v_f برده شده به طرف استاتور است.

$$E_{fd} = v_f \frac{L_{md}}{\sqrt{3}r_f} \quad (100-3)$$

در نتیجه با مفروضات فوق معادلات یک ماشین سنکرون متصل به شین بی نهایت در دو حالت شکل

(۱۶-۳) و با مراجعه به مقاله‌ی داده شده با اقتباس از فصل پنج کتاب فواد، به صورت یک سیستم خطی

درجه‌ی سه می باشد.

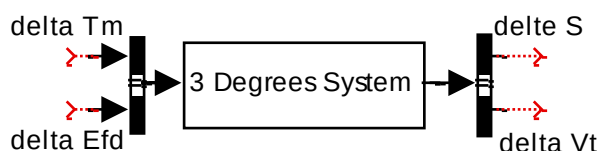


شکل ۱۶-۳ : ماشین سنکرون متصل به شین بی نهایت

شکل (b) ۱۶-۳ با مدار شکل (a) ۱۶-۳ به شرط محاسبه‌ی امپدانس خط از رابطه‌ی (۱۰۱-۳)، معادل خواهد بود:

$$R_e + jx_e = \frac{R_E + jx_E}{1 + (R_E + jx_E)(G + jB)} \quad (101-3)$$

ورودی و خروجی این سیستم درجه سه را می‌توان به صورت شکل ۱۷-۳ نمایش داد.



شکل ۱۷-۳ : نمایش شماتیک ماشین سنکرون به عنوان یک سیستم درجه سه

و در نهایت روابط خطی شده‌ی ماشین سنکرون درجه سه مطابق روابط زیر خواهد بود:

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{1 + K_3 T'_{d0}} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{1 + K_3 T'_{d0}} \Delta \delta \quad (102-3)$$

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (103-3)$$

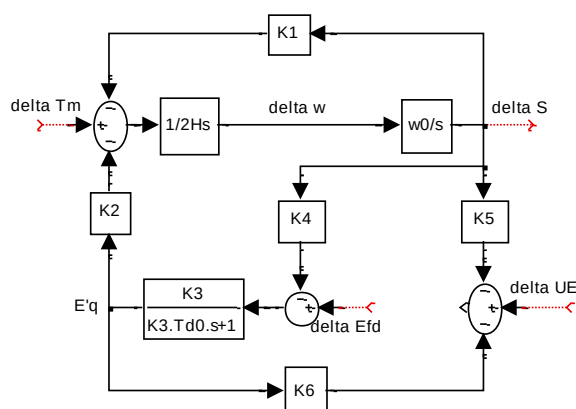
$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (104-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H} (\Delta T_m - \Delta T_e) \\ \Delta \dot{\delta} = \Delta \omega \end{cases} \quad (105-3)$$

به طوری که ضرایب K بر حسب پارامترهای مولد، خط، بار و نقطه‌ی کار بهره‌برداری به دست می‌آید. در ادامه به بررسی بلوک دیاگرام مولد سنکرون با سه درجه آزادی (درجه ۳) در دو حالت می‌پردازیم.

۳-۷-۱- حالت بدون تحریک

در این حالت دیاگرام مدل هفرون فیلیپس مولد سنکرون مطابق شکل ۳-۱۸ خواهد بود.



شکل ۳-۱۸: مدل هفرون فیلیپس مولد سنکرون بدون تحریک

جهت محاسبه‌ی پارامترهای K_1 تا K_6 از روابط زیر استفاده می‌کنیم:

$$K_1 = \frac{X_q - X'_d}{X_e + X'_d} I_{q0} V_0 \sin \delta_0 + \frac{E_{q0} V_0}{X_e + X_q} \cos \delta_0 \quad (۱۰۶-۳)$$

$$K_2 = \frac{V_0 \sin \delta_0}{X_e + X'_d} \quad (۱۰۷-۳)$$

$$K_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e} \quad (۱۰۸-۳)$$

$$K_4 = \frac{X_d - X'_d}{X_e + X'_d} V_0 \sin \delta_0 \quad (۱۰۹-۳)$$

$$K_5 = \frac{X_q}{X_e + X_q} \cdot \frac{V_{d0}}{V_{t0}} V_0 \cos \delta_0 - \frac{X'_d}{X_e + X'_d} \cdot \frac{V_{q0}}{V_{t0}} V_0 \sin \delta_0 \quad (۱۱۰-۳)$$

$$K_6 = \frac{X_e}{X_e + X'_d} \cdot \frac{V_{q0}}{V_{t0}} \quad (۱۱۱-۳)$$

وقتی که V_{q0} ولتاژ محور q در نقطه ی کار، V_{d0} ولتاژ محور d در نقطه ی کار، V_{t0} ولتاژ ترمینال مولد، I_{q0} جریان محور q در نقطه ی کار و I_{d0} جریان محور d در نقطه ی کار است و مقادیر این پارامترها از پخش بار به دست می آیند.

ضمناً مقادیر ولتاژ، جریان و زاویه ی پیچش در نقطه ی کار در مختصات dq0 مطابق روابط (۱۱۲-۳) تا (۱۱۴-۳) بیان می شود:

$$\begin{cases} V_{d0} = \frac{P_0 V_{t0}}{\sqrt{P_0^2 + \left(Q_0 + \frac{V_{t0}^2}{X_q}\right)^2}} \\ V_{q0} = \sqrt{V_{t0}^2 - V_{d0}^2} \end{cases} \quad (112-3)$$

$$\begin{cases} I_{d0} = \frac{P_0 - I_{q0} V_{q0}}{V_{d0}} = \frac{Q_0 + I_{d0} V_{d0}}{V_{q0}} \\ I_{q0} = \frac{V_{d0}}{X_q} = \frac{E'_{q0} - X'_d I_{d0}}{X_q} \end{cases} \quad (113-3)$$

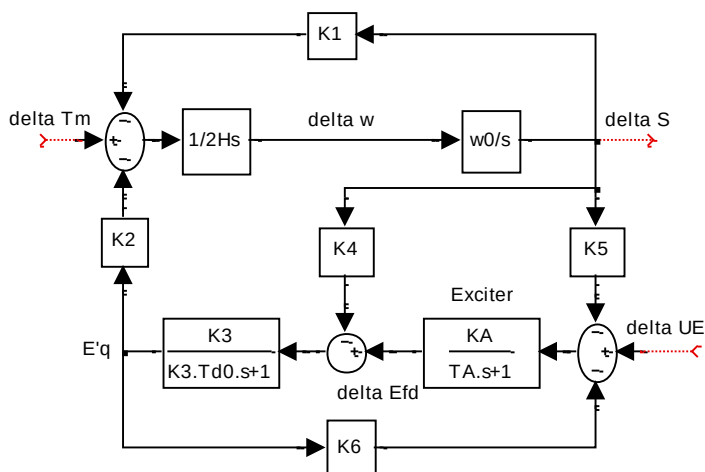
$$\delta_0 = \tan^{-1} \frac{V_{d0}}{V_{q0}} \quad (114-3)$$

توجه کنید بر اساس مقاله ی آقای Flamming به جز K_3 ، سایر ضرایب وابسته به نقطه ی کار ماشین هستند و همه ضرایب مثبت اند به جز k_5 که مثبت و منفی می تواند باشد.

با تغییر P و Q، قطب ها جابه جا شده و نقاط پایداری و ناپایداری سیستم مورد نظر مشخص می شود.

۳-۷-۲- حالت حضور تحریک درجه یک

در این حالت دیاگرام مدل هفرون فیلیپس مولد سنکرون مطابق شکل ۳-۱۹ خواهد بود.



شکل ۳-۱۹: مدل هفرون فیلیپس مولد سنکرون با تحریک درجه یک

وقتی که تابع تبدیل تحریک درجه یک با ضریب بهره‌ی \$K_A\$ و ثابت زمانی \$T_A\$ مطابق رابطه‌ی (۳-۱۱۵) باشد.

$$\frac{E_{fd}}{\Delta U_E} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (۳-۱۱۵)$$

۳-۸- معادلات حالت سیستم تک ماشینه

با توجه به شکل ۳-۱۹ معادله‌ی حالت سیستم تک‌ماشینه با رابطه‌ی (۳-۱۱۶) بیان می‌شود.

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta u \quad (۳-۱۱۶)$$

وقتی که ماتریس‌های \$A\$ و \$B\$، متغیرهای حالت و ورودی‌ها مطابق روابط (۳-۱۱۷) و (۳-۱۱۸) تعریف شوند:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-k_1}{2H} & \frac{-k_2}{2H} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-k_4}{T'_{d0}} & \frac{-1}{T'_{d0}k_3} & \frac{-1}{T'_{d0}} \\ 0 & \frac{-k_A k_5}{T_A} & \frac{-k_A k_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} \end{bmatrix}, B = [0] \quad (۳-۱۱۷)$$

$$X = \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}, \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta U_E \end{bmatrix} \quad (۳-۱۱۸)$$

با تغییر K_A می توان قطبها را به سمت چپ میل داد، ولی این کار راه حل اساسی جهت پایداری نیست. راه حل طراحی یک PSS است. به طوری که PSS سرعت را اندازه گیری کرده و ورودی های فضای حالت را تغییر می دهد.

توجه کنید در نقاط کار مختلف K_1 تا K_6 تغییر می کند و در مورد یک سیستم تک ماشینه در نقاط کار مختلف، به دو روش زیر می توان وضعیت پایداری نیروگاه را بررسی کرد.

(۱) از طریق مقادیر ویژه ی ماتریس A و معادلات حالت سیستم

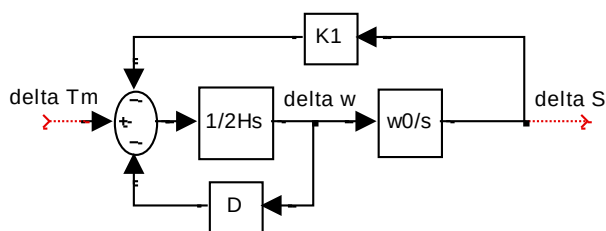
(۲) از طریق مقادیر قطبهای تابع تبدیل بین ورودی ΔU_E و خروجی $\Delta \omega$ وقتی که $\Delta T_m = 0$ باشد. رابطه ی (۱۱۹-۳) مخرج تابع تبدیل را نشان می دهد که از درجه ی چهار است و ریشه های مخرج به عنوان قطبهای سیستم برای ما مهم است.

$$D(s) = s^4 + \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T'_{d0} k_3} \right) s^3 + \left(\frac{1}{T'_{d0} T_A k_3} + \frac{k_A k_6}{T'_{d0} T_A} + \frac{k_1 \omega_0}{2H} \right) s^2 + \left(\frac{k_1 \omega_0}{2HT'_{d0} k_3} + \frac{k_1 \omega_0}{2HT_A} - \frac{K_4 k_2 \omega_0}{2HT'_{d0}} \right) s + \left(\frac{k_A k_6 k_1 \omega_0}{2HT'_{d0} T_A} + \frac{k_1 \omega_0}{2HT'_{d0} k_3} - \frac{k_2 k_4 \omega_0}{2HT'_{d0} T_A} - \frac{k_4 k_5 k_2 \omega_0}{2HT'_{d0} T_A} \right) \quad (119-3)$$

۳-۹- طراحی PSS برای یک سیستم تک ماشینه

الگوریتم طراحی پایدارساز سیستم قدرت معمولی^۱ به صورت زیر است:

- (۱) محاسبه ی نوسانات مُد مکانیکی از طریق حلقه مکانیکی و حذف قسمت الکتریکی: چون ثابت زمانی در حلقه ی مکانیکی بزرگ است، تفکیک مدهای مکانیکی و الکتریکی به راحتی صورت می گیرد. مدهای مکانیکی دارای فرکانس پایین اند و فرکانس مدهای مکانیکی یک سیستم تک-ماشینه مطابق شکل ۳-۲۰ با صرف نظر کردن از حلقه ی الکتریکی در مدل تک ماشینه به سادگی از حلقه ی مکانیکی به دست می آید.



شکل ۳-۲۰: حلقه ی مکانیکی مدل تک ماشینه با صرف نظر کردن از حلقه ی الکتریکی

در این صورت تابع تبدیل حلقه ی مکانیکی با رابطه ی زیر بیان می شود:

$$G(S) = \frac{\Delta \delta(S)}{\Delta T_m(S)} = \frac{2H}{\omega_0} S^2 + \frac{D}{\omega_0} S + K_1 \quad (۱۲۰-۳)$$

اگر مخرج تابع تبدیل فوق را مساوی صفر قرار دهیم، به فرکانس نوسانات ریشه ی مخرج دست می یابیم.

$$\delta = \sigma \pm j\omega_d \Rightarrow \omega_d = \sqrt{\frac{k_1 \omega_0}{2H} - \left(\frac{D}{2H}\right)^2} \quad (۱۲۱-۳)$$

اگر از میرایی صرف نظر کنیم و $D=0$ باشد، ω_n ، فرکانس نوسانات فرکانس پایین مد مکانیکی است.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_1 \omega_0}{2H}} \quad (۱۲۲-۳)$$

f_n حدود 1^{Hz} می باشد و به دلیل کوچک بودن اندازه ی فرکانس، این نوسانات را فرکانس پایین می گویند.

توجه کنید با مقایسه ی رابطه (۱۲۰-۳) با رابطه ی استاندارد سیستم درجه دو طبق رابطه ی (۱۲۳-۳) مقدار میرایی این مدها مطابق رابطه ی (۱۲۴-۳) به دست می آید.

$$S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2 = 0 \quad (۱۲۳-۳)$$

$$2\xi\omega_n = \frac{D}{2H} \rightarrow \xi = \frac{D}{4H\omega_n} = \frac{D}{\sqrt{8Hk_1\omega_0}} \quad (۱۲۴-۳)$$

۲) محاسبه ی تأخیر فاز ناشی از دینامیک سیستم تحریک و میدان، که همان فاز تابع تبدیل بین $E'_q, \Delta U_E$ است، بدین ترتیب که ابتدا تابع تبدیل بین $E'_q, \Delta U_E$ را با حذف قسمت مکانیکی به دست آورده، سپس تأخیر فاز را به ازای $S = j\omega_n$ محاسبه می کنیم.

توجه کنید اگر تحریک از درجه ی یک باشد، طبق مدل هفرون فیلیپس تابع تبدیل و تأخیر فاز به صورت رابطه ی (۱۲۵-۳) و (۱۲۶-۳) است:

$$G_E(S) = \frac{K_A K_3}{(1 + ST_A)(1 + ST'_{d0} k_3) + K_A K_3 K_6} \quad (۱۲۵-۳)$$

$$G_E(S)|_{S=j\omega_n} = |G_E(j\omega_n)| \angle G_E(j\omega_n) \quad (۱۲۶-۳)$$

۳) طراحی یک جبران ساز پیش فاز $G_C(S)$ برای جبران این تاخیر، به طوری که رابطه‌ی (۱۲۷-۳) به ازای $S = j\omega_n$ برقرار باشد:

$$\angle G_C(S) + \angle G_E(S) = 0 \quad (۱۲۷-۳)$$

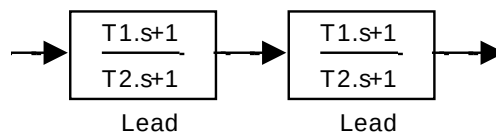
معمولاً تابع جبران ساز پیش فاز به صورت رابطه‌ی زیر است:

$$G_C(S) = \left(\frac{1+ST_1}{1+ST_2} \right)^n; T_1 > T_2, n=1,2 \quad (۱۲۸-۳)$$

به عنوان مثال اگر $T_1 = 2^s, T_2 = 0.2^s$ باشد، کنترل کننده‌ی پیش فاز مطابق رابطه‌ی (۱۲۹-۳) در فرکانس $f_n = 1^{Hz}$ به اندازه‌ی ۳۴° زاویه‌ی پیش فاز ایجاد می‌کند.

$$G_C(S) \Big|_{S=j\omega_n=j2\pi f_n} = \frac{1+2S}{1+0.2S} = |G_C(j\omega_n)| \angle 34^\circ \quad (۱۲۹-۳)$$

چنانچه $\angle G_C(S) = 64^\circ$ شود، باید $n=2$ باشد، یعنی مطابق شکل ۳-۲۱ از دو کنترل کننده‌ی پیش فاز استفاده می‌کنیم.



شکل ۳-۲۱: بلوک دیاگرام دو کنترل کننده‌ی پیش فاز

۴) طراحی ضریب بهره K_C : با انتخاب ضریب میرایی ξ_n در محدوده‌ی $[0.1, 0.3]$ و با استفاده از رابطه‌ی (۱۳۰-۳)، K_C به دست می‌آید.

$$K_C = \frac{2H\omega_n\xi_n}{K_2|G_C(j\omega_n)||G_E(j\omega_n)|} \quad (۱۳۰-۳)$$

۵) بلوک Rest: وقتی که PSS نوسانات فرکانس پایین را تشخیص می‌دهد، بایستی توسط این بلوک وارد عمل شود و این در حالی است که در حالت عادی، بلوک Rest باید PSS را از مدار خارج نگه دارد. تابع تبدیل این بلوک مطابق رابطه‌ی (۱۳۱-۳) و زاویه و ضریب بهره‌ی آن در فرکانس ω_n مطابق رابطه‌ی (۱۳۲-۳) است:

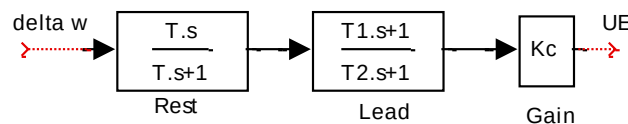
$$G_{rest} = \frac{ST}{1+ST} \quad (۱۳۱-۳)$$

$$|G_{Rest}(j\omega_n)| \angle G_{Rest}(j\omega_n) \approx 1 \angle 0^\circ \quad (۱۳۲-۳)$$

به طوری که در فرکانس ω_n قدر مطلق تابع Rest برابر یک و زاویه آن صفر است، لذا در این فرکانس PSS را وارد مدار کرده و در دیگر فرکانس ها قدر مطلق آن صفر (خیلی کوچک) و زاویه آن بزرگ است و در نتیجه در این فرکانس ها PSS را از مدار خارج می کند.

در واقع، بلوک Rest در فرکانس پایین مثلا 1^{Hz} دارای T بزرگ و برابر 1^s و در فرکانس های دیگر T آن یک عدد بسیار کوچک نزدیک به صفر است.

در نتیجه با صرف نظر کردن از بلوک فیلتر و محدودساز، دیاگرام PSS به صورت شکل ۲۲-۳ است.



شکل ۲۲-۳: بلوک دیاگرام PSS

در ادامه به مطالعه ی دینامیکی فرکانس پایین سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت می پردازیم. مدل خطی یک سیستم تک ماشینه همراه با یک سیستم تحریک درجه یک (مدل هفرون فلیپس)، یک سیستم درجه چهار می باشد.

می دانیم در نقاط کار مختلف یک نیروگاه مقادیر K_1 تا K_6 متفاوتند، چنانچه معادلات حالت سیستم مورد نظر را بنویسیم، از روی مقادیر ویژه می توان به پایداری دینامیک فرکانس پایین محلی پی برد. به این ترتیب که مثبت نبودن بخش حقیقی مقادیر ویژه، پایداری نیروگاه را در نقاط مختلف کار مشخص می کند. از چهار مقدار ویژه یا مُد، دو مُد مربوط به حلقه ی مکانیکی و دو مُد مربوط به حلقه ی الکتریکی است.

۳-۹-۱- مثال طراحی

معادلات حالت یک نیروگاه متصل به شین بی نهایت را برای مطالعات دینامیکی با در نظر گرفتن مدل تحریک درجه یک در دو حالت زیر به دست آورید.

الف) بدون PSS ب) با حضور PSS

$$G:H = 4.26, \quad D = 0, \quad T'_{d0} = 7.76, \quad X_d = 0.97, \quad X'_d = 0.19, \quad X_q = 0.55, \quad f = 60Hz$$

$$\text{Exciter} : K_A = 50, T_A = 0.5^s$$

$$\text{Work Point: } P_{e0} = 1^{P.U.}, Q_{e0} = 0.15^{P.U.}, V_t = 1.05^{P.U.}$$

حل : الف) با توجه به روابط مولفه های dq و فرمول های K_1 تا K_6 داریم:

$$k_1 = 0.54, k_2 = 1.2, k_3 = 0.658, k_4 = 0.698, k_5 = -0.095, k_6 = 0.81$$

و می توان ماتریس A و مقادیر ویژه ی مدل تک ماشینه ی هفرون فیلیپس بدون PSS را به دست آورد.

$$\rightarrow \det(A - \lambda I) = 0 \rightarrow \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$$

ب) طراحی PSS طبق الگوریتم توضیح داده شده و با انتخاب $T = 3^s, T_2 = 0.1, \xi_n = 0.3$ به صورت زیر خواهد بود:

$$\omega_n = 4.707 \text{ rad} \rightarrow |G_e(s)| \angle G_e(s) \big|_{s=j\omega_n} = 1.001 < -47.57^\circ$$

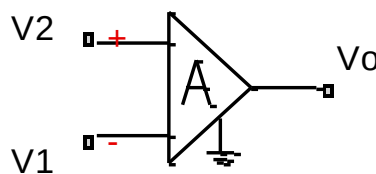
$$\rightarrow \angle G_c(j4.707) = \frac{1 + T_1(j4.707)}{1 + T_2(j4.707)} = 47.57^\circ \rightarrow T_1 = 0.685$$

$$k_c = \frac{2H\omega_n\xi_n}{k_2|G_c(j\omega_n)||G_e(j\omega_n)|} = 7.09$$

$$\text{Rest Block} = \frac{3S}{1 + 3S}$$

۳-۱۰- یادآوری تقویت کننده ی عملیاتی OP-AMP و تحقق PSS آنالوگ به کمک آن

OP-AMP عبارت است از تقویت کننده ی دیفرانسیلی با بهره ی بالا با Z_{in} بسیار زیاد و Z_{out} بسیار کوچک. شکل ۳-۲۳ نمایش یک OP-AMP می باشد.



شکل ۳-۲۳ : نمایش OP-AMP

توجه کنید OP-AMP، اختلاف ولتاژ بین دو سیگنال ورودی را اخذ کرده و آن را در خروجی با گین حلقه باز A_d تقویت می کند. رابطه ی (۳-۱۳۳) ولتاژ ورودی و خروجی آپامپ را بیان می کند.

$$\begin{cases} V_d = V_1 - V_2 \\ V_O = A_d V_d \end{cases} \quad (3-133)$$

نکته: لفظ عملیاتی به این دلیل به تقویت کننده اطلاق می شود که توسط آپامپ و عناصر خارجی می-توان انواع مدارات مانند جمع کننده، مقایسه کننده، انواع کنترل کننده های مختلف و غیره را استخراج نمود. ترمینال ۱ با علامت منفی نشان داده شده و به آن ورودی معکوس کننده گویند، زیرا سیگنال V_1 را ضمن تقویت دامنه اش، با فاز منفی در خروجی نشان می دهد.

ترمینال ۲ با علامت مثبت نشان داده شده و به آن ورودی غیر معکوس کننده گویند، زیرا سیگنال V_2 را فقط تقویت می کند.

حد ولتاژ خروجی V_n مطابق رابطه ی (۳-۱۳۴) معمولاً 2^V از ولتاژ منبع تغذیه کوچک تر است و به آن ولتاژ اشباع گویند.

$$-V_{CC} + 2 < V_O < V_{CC} - 2 \quad (3-134)$$

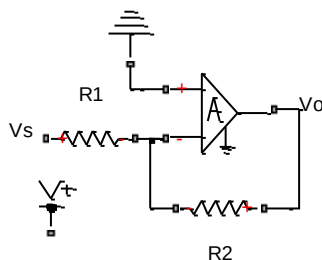
امروزه IC741 به صورت DIP (8 pin) مرسوم است که فقط از هفت تا pin آن برای اتصال جهت مدارات مختلف آنالوگ استفاده می شود.

۳-۱۰-۱- ساخت انواع تقویت کننده ها با OP-AMP

تقویت کننده ی معکوس

با توجه به شکل ۳-۲۴، رابطه ی بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۳۵) بیان می شود:

$$V_O = -\frac{R_2}{R_1} V_s \quad (3-135)$$

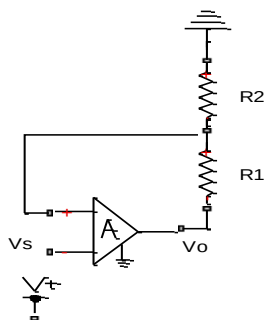


شکل ۳-۲۴ : تقویت کننده ی معکوس

تقویت کننده ی غیر معکوس

با توجه به شکل ۳-۲۵، رابطه ی بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۳۶) بیان می شود:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_s \quad (۱۳۶-۳)$$

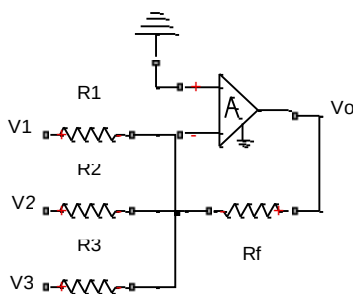


شکل ۳-۲۵: تقویت کننده ی غیر معکوس

جمع کننده

با توجه به شکل ۳-۲۶، رابطه ی بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۳۷) بیان می شود:

$$V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) \quad (۳-۱۳۷)$$

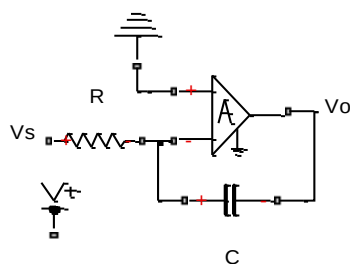


شکل ۳-۲۶: مدار جمع کننده

انتگرال گیر

با توجه به شکل ۳-۲۷، رابطه ی بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۳۸) بیان می شود:

$$V_o = -\frac{1}{CR} \int V_s dt \quad (۳-۱۳۸)$$

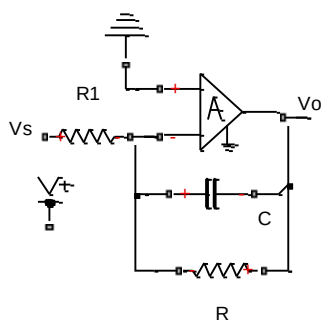


شکل ۳-۲۷ : مدار انتگرال گیر

فیلتر فعال پایین گذر

با توجه به شکل ۳-۲۸، رابطه‌ی بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه‌ی (۳-۱۳۹) بیان می‌شود:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{R/R_1}{RCS + 1} \quad (۳-۱۳۹)$$



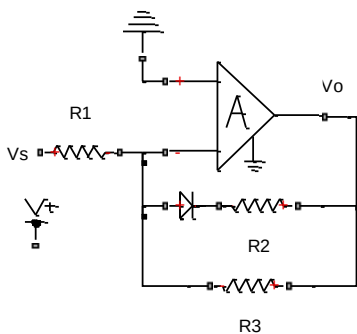
شکل ۳-۲۸ : مدار فیلتر فعال پایین گذر

طراحی Signal Condition

در این طراحی، بر حسب اینکه سیگنال ورودی مثبت یا منفی باشد، گین تقویت‌کننده مطابق رابطه‌ی

(۳-۱۴۰) متفاوت می‌شود.

$$\begin{cases} \text{if } V_s > 0 : \frac{V_0}{V_s} = \frac{-R_2 R_3}{(R_2 + R_3) R_1} \\ \text{if } V_s < 0 : \frac{V_0}{V_s} = -\frac{R_3}{R_1} \end{cases} \quad (۳-۱۴۰)$$



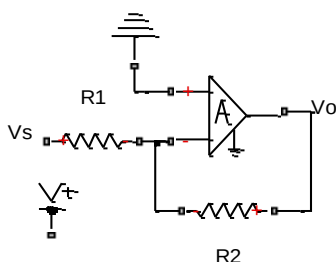
شکل ۳-۲۹: مدار سیگنال کاندیشن

۳-۱۰-۲- ساخت انواع کنترل کننده ها با OP-AMP

کنترل کننده ی P

با توجه به شکل ۳-۳۰، تابع تبدیل بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۴۱) بیان می شود که مشابه با کنترل کننده ی P است:

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} V_s \rightarrow \frac{V_0}{V_s} = G(S) = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3-141)$$

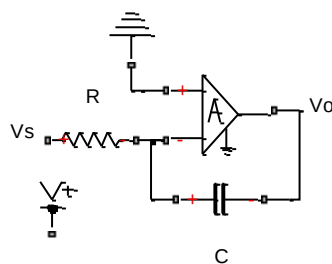


شکل ۳-۳۰: مدار کنترل کننده ی P

کنترل کننده ی انتگرال گیر (I)

با توجه به شکل ۳-۳۱، تابع تبدیل بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۴۲) بیان می شود که مشابه با کنترل کننده ی I است:

$$V_0 = -\frac{1}{R_1 C S} V_i \rightarrow G(s) = \frac{K_I}{S} ; K_I = \frac{-1}{R_1 C} \quad (3-142)$$



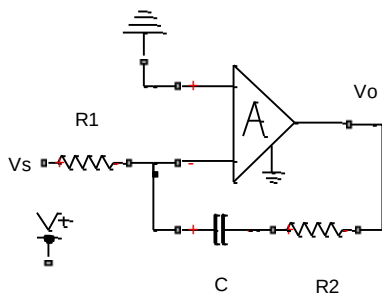
شکل ۳-۳۱: مدار کنترل کننده ی I

کنترل کننده ی PI

با توجه به شکل ۳-۳۲، تابع تبدیل بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۴۳) بیان می شود که مشابه با کنترل کننده ی PI است:

$$\frac{V_0(S)}{V_i(S)} = -\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1CS}\right) = -\frac{R_2CS + 1}{R_1CS} \rightarrow G(S) = K + \frac{K_I}{S} \quad (3-143)$$

وقتی که $K = \frac{R_2}{R_1}$, $K_I = \frac{1}{R_1C}$ باشد.

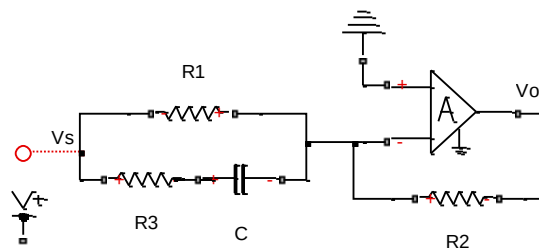


شکل ۳-۳۲: مدار کنترل کننده ی PI

کنترل کننده ی PD

با توجه به شکل ۳-۳۳، تابع تبدیل بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۴۴) بیان می شود که با انتخاب مناسب مقادیر المان ها مشابه با کنترل کننده ی PD است:

$$\frac{V_0(S)}{V_s(S)} = \frac{-R_2}{\left(R_3 + \frac{1}{CS}\right)R_1} \rightarrow G(S) = \frac{-((R_3 + R_1)CS + 1)R_2}{(R_3CS + 1)R_1} \quad (3-144)$$

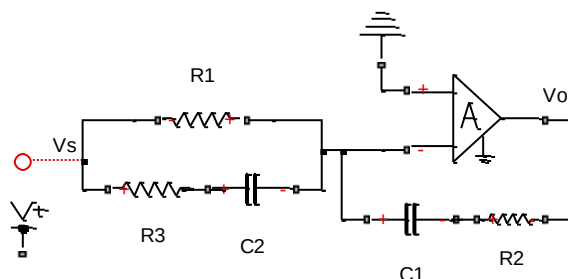


شکل ۳-۳۳: مدار کنترل کننده ی PD

کنترل کننده ی PID

با توجه به شکل ۳-۳۴، تابع تبدیل بین ولتاژ ورودی و خروجی با رابطه ی (۳-۱۴۴) بیان می شود که با انتخاب مناسب مقادیر المان ها مشابه با کنترل کننده ی PID است:

$$G(S) = \frac{V_o(S)}{V_s(S)} = \frac{(1 + R_2 C_1 S)(1 + (R_1 + R_3) C_2 S)}{R_1 C_1 S (1 + R_3 C_2 S)} \quad (3-145)$$



شکل ۳-۳۴: کنترل کننده ی PID

۳-۱۱- گشتاور الکتریکی در مدل هفرون فیلیپس

با توجه به مدل هفرون فیلیپس، گشتاور الکتریکی ΔT_e از جمع دو مولفه ی ΔT_{e1} و ΔT_{e2} مطابق رابطه ی (۳-۱۴۶) که از طریق میدان و سیستم تحریک به $\Delta \delta$ بستگی دارند، به وجود می آید.

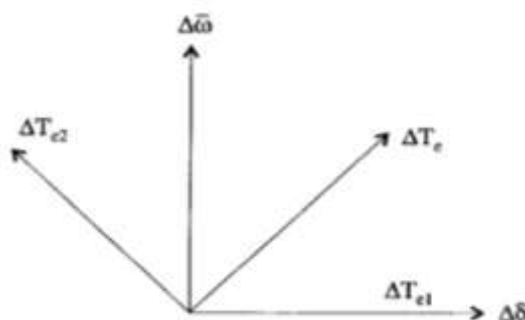
$$\begin{cases} \Delta T_{e1} = k_1 \Delta \delta \\ \Delta T_{e2} = k_2 \Delta E'_q \end{cases} \quad (3-146)$$

با توجه به اینکه تغییرات دینامیکی پریودیک است اگر به جای $S = j\omega_n$ قرار دهیم و مولفه ی کوپل ناشی از حلقه ی الکتریکی و تحریک یعنی T_{e2} را بر حسب $j\omega_n$ به دست آوریم، این کوپل ممکن است مولفه های هم فاز با $\Delta \delta$ (کوپل سنکرون کننده) یا هم فاز با $\Delta \omega$ (کوپل میراکننده) داشته باشد. (نوع تحریک بر روی T_{e2} تأثیر گذار است)

هر کوپل که متناسب با ω باشد، میراکننده و هر کوپل که متناسب با زاویه δ باشد، سنکرون کننده است. ممکن است کوپل سنکرون کننده یا میراکننده، مثبت یا منفی باشد. نوع مولفه های کوپل سنکرون کننده و میراکننده از سوی حلقه ی الکتریکی و تحریک ماشین که به محور روتور ماشین اثر می گذارد، بستگی به K_1 تا K_6 و دینامیک تحریک دارد و با توجه به بحث فوق نقش بسیار مهم نوع تحریک در پایداری گذرا و دینامیکی روشن می شود.

در نتیجه چنانچه کوپلی که از سوی حلقه ی الکتریکی همراه با تحریک به محور روتور وارد می شود، یعنی T_{e2} دارای مولفه های کوپل سنکرون کننده و میراکننده ی مثبت باشد، پایداری گذرا و پایداری دینامیکی، هر دو، بهبود می یابند و به عکس.

شکل ۳-۳۵ را در نظر بگیرید که دیاگرام فازوری گشتاور T_{e2} را در محور $\Delta\omega - \Delta\delta$ نشان می دهد.



شکل ۳-۳۵ : دیاگرام فازوری گشتاور T_{e1} و T_{e2}

- ۱- چنانچه T_{e2} در ربع اول شکل فوق باشد، موجب بهبود پایداری گذرا و دینامیکی می شود.
- ۲- چنانچه T_{e2} در ربع سوم شکل فوق باشد، موجب تضعیف پایداری گذرا و دینامیکی می شود.
- ۳- چنانچه T_{e2} در ربع چهارم شکل فوق باشد، پایداری گذرا بهبود و پایداری دینامیکی تضعیف می شود.
- ۴- چنانچه T_{e2} در ربع دوم شکل فوق باشد، پایداری گذرا تضعیف شده و پایداری دینامیکی بهبود می یابد.

ثابت می شود با حضور PSS در مدل هفرون فیلیپس، کوپل T_{e2} همیشه در ربع اول باقی می ماند که نه تنها پایداری دینامیکی بهبود یافته، بلکه پایداری گذرا هم مطلوب خواهد بود.

۳-۱۲- قضیه ی لیپانوف

اگر X_e نقطه ی تعادل سیستم غیرخطی ورودی صفر $\dot{X} = f(x)$ باشد و به ازای آن داشته باشیم $f(X_e) = 0$ ، آنگاه نقطه X_e تعادل پایدار است در صورتی که تابع جبری V مثبت معینی وجود داشته باشد به طوری که رابطه ی (۳-۳۶) برقرار باشد:

$$\dot{V}(x) = (\nabla V)^T f(x) \leq 0 \quad \langle or \rangle \quad \dot{V}(x) = (\nabla V)^T \dot{X} \leq 0 \quad (3-147)$$

مثال : ثابت کنید تابع $V(x) = x_1^2 + x_2^2$ یک تابع لیپانوف برای سیستم خطی زیر است:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 - x_2 \\ \dot{x}_2 = x_1 - x_2^3 \end{cases}$$

حل : برای اینکه $V(x)$ برای $\dot{X} = f(x)$ تابع لیپانوف باشد باید شرایط زیر را داشته باشد:

۱- $V(x)$ تابعی پیوسته و دارای مشتقات جزئی باشد.

۲- نقطه تعادل X_e یک نقطه ی مینیمم برای $V(x)$ باشد یعنی $\dot{V}(x)|_{X_e} \leq 0$

$$f(X_e) = 0 \rightarrow \begin{cases} 0 = -x_1 - x_2 \\ 0 = x_1 - x_2^3 \end{cases} \rightarrow X_e = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

در نتیجه نقطه ی $X_e = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ نقطه ی تعادل بوده و نقطه ی min تابع $V(x)$ نیز است و برقراری شرط زیر را بررسی می کنیم:

$$\nabla V(x)^T \cdot f(x) \leq 0 \rightarrow f(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_1 - x_2 \\ x_1 - x_2^3 \end{pmatrix}$$

$$\nabla V(x)^T = \left(\frac{\partial V}{\partial x_1} \quad \frac{\partial V}{\partial x_2} \right) = (2x_1 \quad 2x_2)$$

$$\rightarrow \dot{V}(x) = (2x_1 \quad 2x_2) \begin{pmatrix} -x_1 - x_2 \\ x_1 - x_2^3 \end{pmatrix} = -2x_1^2 - 2x_1x_2 + 2x_1x_2 - 2x_2 = -(2x_1^2 + 2x_2^4)$$

این عبارت باید همواره منفی باشد که هست.

تعریف منطقه‌ی جذب^۱: اگر با اعمال اغتشاشی، سیستمی را از نقطه‌ی تعادلش دور کنیم، بزرگترین منطقه از فضای حالت که مجدداً سیستم را به نقطه تعادل برمی‌گرداند، منطقه جذب نامیده می‌شود.

۳-۱۲-۱- روش کرازوفسکی

برای به دست آوردن تابع لیپانوف، سیستم غیرخطی با ورودی صفر $\dot{X} = f(x)$ و نقطه‌ی تعادل X_e را در نظر بگیرید. تابع جبری $V(x)$ مطابق رابطه‌ی (۳-۱۴۸)، در صورتی یک تابع لیپانوف برای سیستم است که ماتریس $F(x)$ در رابطه‌ی (۳-۱۴۹) برای همه‌ی مقادیر x ، منفی معین و یا تابع $F(x) -$ مثبت معین باشد، وقتی که $j(x)$ از رابطه‌ی (۳-۱۵۰) محاسبه می‌شود.

$$V(x) = f^T(x) \cdot f(x) \quad (۳-۱۴۸)$$

$$F(x) = j(x) + j^T(x) \quad (۳-۱۴۹)$$

$$j(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (۳-۱۵۰)$$

مثال: در مورد پایداری تابع زیر بحث کنید.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 \\ \dot{x}_2 = x_1 - x_2 - x_2^3 \end{cases}$$

در نقطه‌ی تعادل x_e باید مشتق متغیرهای حالت صفر باشد:

$$x_e : \begin{cases} -x_1 = 0 \\ x_1 - x_2 - x_2^3 = 0 \end{cases} \rightarrow x_e = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

پس از تعیین نقطه‌ی تعادل، ماتریس ژاکوبین را محاسبه می‌کنیم و پس از آن تابع $F(x)$ را به دست آورده و منفی معین بودن آن را بررسی می‌کنیم.

$$f(x) = \begin{pmatrix} -x_1 \\ x_1 - x_2 - x_2^3 \end{pmatrix} \rightarrow j(x) = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 - 3x_2^2 \end{bmatrix}$$

$$F(x) = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & -2 - 6x_2^2 \end{bmatrix} \text{ منفی معین باید باشد}$$

$$-F(x) = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 + 6x_2^2 \end{bmatrix} \text{ مثبت معین باید باشد} \quad \text{یا}$$

چون شرط اینکه $-F(x)$ مثبت معین باشد آن است که $\det(-F(x))$ همواره مثبت باشد، دترمینان آن را به دست می آوریم.

$$\text{for } \forall x : \det(-F(x)) = 4 + 12x_2^2 - 1 = 12x_2^2 + 3 > 0$$

و به ازای تمام مقادیر x تابع $V(x)$ ، تابع لیاپانوف سیستم است و به روش زیر محاسبه می شود.

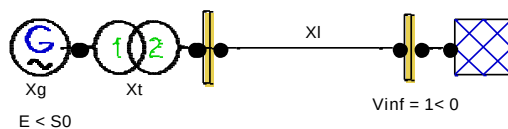
$$\Rightarrow \text{for } \forall x \rightarrow V(x) = f^T(x).f(x) = x_1^2 + (x_1 - x_2 - x_2^3)^2$$

در نتیجه، سیستم به ازای هر ورودی، میراکنندهی آن ورودی خواهد بود.

نکته قابل توجه این است که در سیستم های تک ماشینه برای پایداری گذرا، با یک سیستم غیرخطی درجه ی دو معادله ی نوسانی مواجه می شویم و در حل آن به مشکل برمی خوریم. در مثال های فوق برای سناریوهای مختلف اگر بتوانیم با شرایطی تابع لیاپانوف را برای سیستم های غیرخطی به دست آوریم، سیستم پایدار خواهد بود و خواهید دید با شرایطی مثل T بزرگ و P_0 ای که مقدارهای خاص دارد، می توان تابع لیاپانوف را به دست آورد.

۳-۱۲-۲- تابع انرژی

سیستم $SMIB^1$ شکل ۳-۳۶ را در نظر بگیرید:



شکل ۳-۳۶ : سیستم SMIB

در حالی که نیروگاه، قدرتی معادل $P_0 = 1^{pu}$ را به شبکه تزریق می کند، به علت یک خطای مجازی خط به مدت 30^s جدا شده و مجددا وصل می شود، می خواهیم به روش لیاپانوف پایداری این نیروگاه را بررسی کنیم.

معادله ی غیرخطی نوسان حاکم بر این سیستم عبارت است از:

الف) قبل از خطا

$$\begin{cases} P_m = P_0 \\ P_e = P_{max} \sin \delta \end{cases} \quad (151-3)$$

وقتی که پارامترهای فرمول مطابق رابطه‌ی (۱۵۲-۳) محاسبه می‌شود.

$$P_{max} = \frac{|E||V_{\infty}|}{\sum X}, \quad \delta_0 = \sin^{-1} \frac{P}{P_{max}}, \quad P = P_e = P_m \quad (152-3)$$

ب) حین خطا

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P_e) \\ P_e = 0 \end{cases} \text{ with : } \begin{cases} \delta(0) = \delta_0 \\ \frac{d\delta}{dt}(0) = 0 \end{cases} \quad (153-3)$$

با حل معادله‌ی نوسان به رابطه‌ی (۱۵۴-۳) می‌رسیم.

$$\delta(t) = \frac{\omega_0}{4H} P_0 t^2 + \delta_0 = f(t) \quad (154-3)$$

ج) پس از رفع خطا

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P_e) = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P_{max} \sin \delta) \text{ with : } \begin{cases} \delta(0) = f(t=T) = \frac{\omega_0}{4H} P_0 T^2 + \delta_0 \\ \frac{\partial \delta}{\partial t}(0) = f'(t,T) = \frac{\omega_0}{2H} P_0 T \end{cases} \quad (155-3)$$

معادله‌ی فوق یک معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی با شرایط اولیه است. برای فرار از حل این معادله از روش لیپانوف استفاده می‌کنیم.

در ادامه می‌خواهیم برای سیستم غیرخطی فوق تابع لیپانوفی به دست آوریم و از روی آن به پایداری سیستم پی ببریم. برای به دست آوردن تابع V ، طرفین رابطه‌ی (۱۵۵-۳) را در $\frac{\partial \delta}{\partial t}$ ضرب می‌کنیم.

$$M \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} \times \frac{\partial \delta}{\partial t} - \omega_0 (P_0 - P_{max} \sin \delta) \frac{\partial \delta}{\partial t} = 0 \quad (156-3)$$

وقتی که $M = 2H$ ضریب ممان است. حال از طرفین رابطه‌ی (۱۵۶-۳) انتگرال می‌گیریم:

$$V = \int_{\delta_0}^{\delta} M \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} - \omega \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial t} (P_0 - P_{max} \sin \delta) = cte. \quad (157-3)$$

$$V(\delta, \dot{\delta}) = \frac{1}{2} M \left(\frac{\partial \delta}{\partial t} \right)^2 - \omega_0 (P_0 (\delta - \delta_0) + P_{\max} (\cos \delta - \cos \delta_0)) = E_K + E_P = cte. \quad (158-3)$$

به تابع V که به روش فوق از روی معادله‌ی نوسان به دست آمد، تابع انرژی گویند.

دلیل این نام‌گذاری را در ادامه‌ی بحث روشن می‌کنیم. ولی هدف این است که بگوییم این تابع، یک تابع لیپانوف برای سیستم مورد نظر یعنی سیستم تک ماشینه‌ی متصل به شین بی‌نهایت است.

در زمان $t=T$ یعنی زمان رفع عیب (مرحله‌ی سوم) با شرایط اولیه‌ی (3-159) تابع انرژی مطابق رابطه‌ی (3-160) خواهد شد:

$$\delta(T) = \frac{\omega_0 P_0}{2M} T^2 + \delta_0, \quad \dot{\delta}(T) = \frac{\omega_0 P_0}{M} T \quad (159-3)$$

$$V(\delta(T), \dot{\delta}(T)) = \frac{1}{2} M \left(\frac{\omega_0 P_0}{M} T \right)^2 - \omega_0 \left\{ P_0 \left(\frac{\omega_0 P_0}{2M} T^2 \right) + P_{\max} \left(\cos \left(\frac{\omega_0 P_0}{2M} T^2 + \delta_0 \right) - \cos \delta_0 \right) \right\} \quad (160-3)$$

رابطه‌ی فوق مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل در هنگام قطع و وصل خط را نشان می‌دهد که مقدار ثابتی است. در ادامه ثابت می‌کنیم تابع V یک تابع لیپانوف برای سیستم مورد نظر است. شرط اینکه V یک تابع لیپانوف برای سیستم باشد، این است که:

$$(1) \quad \begin{cases} \dot{\delta} = 0 \\ P_m = P_e \end{cases} \text{ باید دارای نقطه‌ی مینیمم یکتا در نقطه‌ی تعادل باشد.}$$

(2) V تابع مثبت معین در حوالی نقطه‌ی تعادل δ_0 باشد.

$$(3) \quad \forall \delta \Rightarrow \dot{V} = \nabla V \leq 0$$

بررسی شرط اول: محاسبه‌ی گرادیان V شرط اول را تأمین می‌کند و مطابق رابطه‌ی (3-161) می‌باشد.

$$\nabla V = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial \dot{\delta}} \\ \frac{\partial V}{\partial \delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_K}{\partial \dot{\delta}} \\ \frac{\partial E_P}{\partial \delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \dot{\delta} \\ -\omega_0 (P_0 - P_{\max} \sin \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (161-3)$$

ملاحظه می‌شود که گرادیان تابع V یعنی ∇V در نقطه‌ی δ_0 که نقطه‌ی تعادل است، برابر صفر و مقدار تابع در این نقطه مینیمم است.

بررسی شرط دوم و مثبت معین بودن تابع V : از ماتریس هشین که مطابق رابطه‌ی (3-162) ساخته می‌شود، استفاده می‌کنیم.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial \dot{\delta}^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial \dot{\delta} \partial \delta} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \delta \partial \dot{\delta}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \delta^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & \omega_0 P_{max} \cos \delta \end{bmatrix} \quad (162-3)$$

چنانچه دترمینان ماینورهای ماتریس H مثبت باشد، تابع V مثبت معین است و چون همواره M و $P_{max} \cos \delta$ مثبت است، پس تابع V مثبت معین^۱ است.

بررسی شرط سوم: با محاسبه $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ در طول مسیر معادله‌ی نوسان بعد از خطا و با توجه به اینکه نمایش مجموع انرژی سیستم و مشتق آن، نرخ از بین رفتن انرژی توسط میرایی سیستم است، داریم:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_p}{dt} \quad (163-3)$$

مشتق هر یک از جملات را به دست می‌آوریم:

$$\frac{dE_k}{dt} = \frac{dE_k}{d\dot{\delta}} \times \frac{d\dot{\delta}}{dt} = M\dot{\delta} \times \frac{d\dot{\delta}}{dt} = M \frac{d^2\delta}{dt^2} \times \dot{\delta} = \omega_0 (P_0 - P_{max} \sin \delta) \dot{\delta} \quad (164-3)$$

$$\frac{dE_p}{dt} = \frac{dE_p}{d\delta} \times \frac{d\delta}{dt} = -\omega_0 [P_0 - P_{max} \sin \delta] \dot{\delta} \quad (165-3)$$

در نتیجه $\dot{V} = 0$ است و تابع V تعریف شده‌ی فوق یک تابع لیاپانوف برای سیستم مورد نظر است.

مطابق رابطه‌ی (۱۶۶-۳) مقدار تابع لیاپانوف فوق (تابع انرژی) را به ازای نقطه‌ی تعادل ناپایدار، مقدار بحرانی تابع V_{cr} گویند.

$$V_{cr}(\delta, \dot{\delta}) = V(\delta_u = \pi - \delta_0, 0) = \omega_0 [2P_{max} \cos \delta_0 - P_0(\pi - 2\delta_0)] \quad (166-3)$$

و طبق رابطه‌ی (۱۶۷-۳) مقدار تابع لیاپانوف به ازای فرمان پاک شدن عیب را $V_{clearance}$ گویند.

$$V_{cl}(\delta(T), \dot{\delta}(T)) = \frac{M}{2} \left(\frac{\omega_0 P_0}{M} T \right)^2 - \omega_0 \left[P_0 \left(\frac{\omega_0 P_0}{2M} T^2 \right) + P_{max} \left(\cos \left(\frac{\omega_0 P_0}{2M} T^2 + \delta_0 \right) - \cos \delta_0 \right) \right] \quad (167-3)$$

سیستم وقتی پایدار است که رابطه‌ی (۱۶۸-۳) برقرار باشد:

$$\Delta V = V_{cr} - V_{cl} > 0 \quad (168-3)$$

توجه کنید بدون حل معادله دیفرانسیل سیستم مورد نظر با توجه به رابطه ی (۳-۱۶۹) زمان بحرانی رفع عیب به دست می آید.

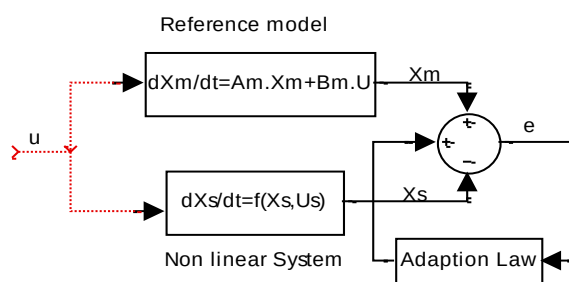
$$V_{cr} - V_{cl} = 0 \quad (۳-۱۶۹)$$

حاشیه ی پایداری از رابطه ی (۳-۱۷۰) قابل توصیف است. هرچه قدر k بیشتر باشد حاشیه ی پایداری بیشتر می شود.

$$k = \frac{V_{cr} - V_{cl}}{V_{cr}} \quad (۳-۱۷۰)$$

۳-۱۳- طراحی PSS تنظیمی به روش مدل مرجع با قانون تطابق لیپانوف

شکل ۳-۳۷ را در نظر بگیرید:



شکل ۳-۳۷: کنترل پذیر کردن سیستم غیر خطی به روش مدل مرجع

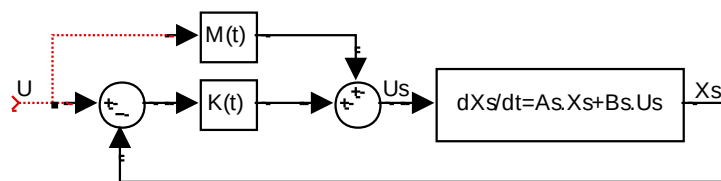
توجه کنید سیستم غیرخطی مورد استفاده ی شما از قبل ساخته شده و امکان تغییر پارامترهای آن را ندارید ولی با بلوک هایی می توان آن را با یک سیستم جانبی، کنترل پذیر نمود.

۳-۱۴- روش کنترل پذیر کردن یک سیستم غیر قابل کنترل

سیستم غیرخطی $\dot{X}_s = f(X_s, U)$ را حول نقطه ی کار خطی می کنیم:

$$\dot{X}_s = A_s X_s + B_s U_s \quad (۳-۱۷۱)$$

سپس سیستم خطی شده را مطابق شکل ۳-۳۸ قابل تنظیم می نماییم.



شکل ۳-۳۸ : قابل تنظیم نمودن سیستم خطی شده

طبق بلوک دیاگرام شکل ۳-۳۸ روابط زیر را داریم:

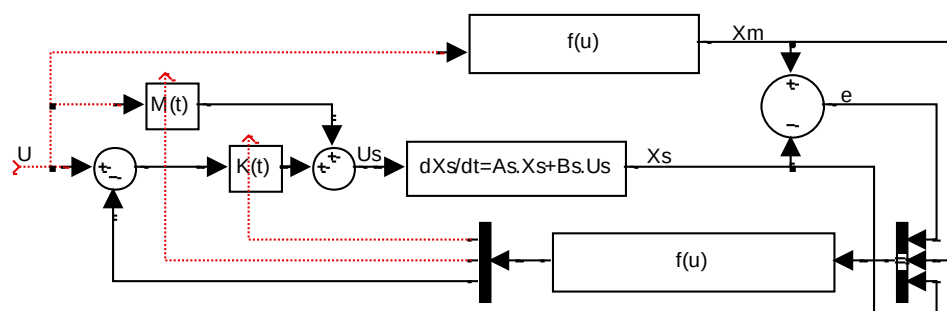
$$U_s = M(t)U + K(t)(U - X_s) \quad (۱۷۲-۳)$$

$$\dot{X}_s = [A_s - B_s k(t)]X_s + B_s[M(t) + K(t)]U \quad (۱۷۳-۳)$$

و معادله‌ی حالت به صورت رابطه‌ی (۳-۱۷۴) در می‌آید و سیستم قابل تنظیم خواهد بود.

$$\dot{X}_s = A(t) X_s + B(t)U \quad (۱۷۴-۳)$$

حال اگر بخواهیم رفتار معادلات دینامیکی فوق را مطابق مدل مرجع $\dot{X}_m = A_m X + B_m U$ نمایش دهیم، بایستی در بلوک دیاگرام شکل ۳-۳۹، $M(t)$ و $K(t)$ را در نقاط مختلف کار سیستم طوری تغییر دهیم که سیستم قابل تنظیم مانند مدل مرجع عمل نماید و خطای بین مدل مرجع و سیستم قابل تنظیم یعنی $e = X_m - X_s$ به سمت صفر میل کند.



شکل ۳-۳۹ : روش کنترل پذیر نمودن سیستم غیرخطی با هدف صفر نمودن خطای بین مدل مرجع و سیستم قابل تنظیم

در ادامه به نحوه‌ی استخراج قانون تطابق به روش لیپانوف به عنوان یک کنترل کننده‌ی پیشرفته جهت بهبود رفتار یک سیستم غیرخطی مطابق مدل مرجع، می‌پردازیم.

با قرار دادن دو رابطه‌ی $\dot{X}_m$ ، $\dot{X}_s$ در مشتق خطا، رابطه‌ی (۳-۱۷۵) را داریم:

$$\dot{e} = \dot{X}_m - \dot{X}_s = A_m e + [A_m - A(t)]X_s + [B_m - B(t)]U \quad (۱۷۵-۳)$$

می‌خواهیم پایداری دینامیک خطا را به روش لیاپانوف بررسی کنیم، یا به عبارت دیگر $M(t)$ و $K(t)$ ای را برای پایدار بودن سیستم فوق، به دست آوریم. بنابراین تابع لیاپانوف زیر را برای سیستم فوق تعریف می‌کنیم:

$$V(t) = e^T P e + Tr[(A_m - A(t))^T F_1^{-1}(A_m - A(t))] + Tr[(B_m - B(t))^T F_2^{-1}(B_m - B(t))] \quad (۱۷۶-۳)$$

که در آن Tr یک اپراتور است که مجموع عناصر روی قطر اصلی ماتریس را به ما می‌دهد. F_2, F_1 ماتریس متقارن مثبت معین انتخابی است و P ماتریس ریکاتی است که از رابطه‌ی (۱۷۷-۳) به دست می‌آید و ماتریس‌های $Q, R = I$ ، ماتریس‌های وزنی‌اند.

$$A_m^T P + P A_m + P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (۱۷۷-۳)$$

برای اینکه تابع $V(t)$ یک تابع لیاپانوف باشد بایستی رابطه‌ی زیر نامثبت باشد یعنی $\dot{V}(t) \leq 0$.

$$\dot{V}(t) = e^T (A_m^T P + P A_m) e + 2 Tr[(P_m - A(t))^T \times (Pe X_s^T - F_1^{-1} \dot{A}(t))] \quad (۱۷۸-۳)$$

$$+ 2 Tr[(B_m - B(t))^T \times (Pe U^T - F_2^{-1} \dot{B}(t))]$$

با توجه به رابطه‌ی (۱۷۹-۳) و مثبت معین بودن A_m ، ماتریس Q مثبت معینی وجود دارد به طوری که جمله‌ی اول رابطه‌ی (۱۷۸-۳) همواره منفی باشد و جملات دوم و سوم را برابر صفر قرار می‌دهیم تا همواره $V(t)$ منفی شود. در این صورت رابطه‌ی (۱۸۰-۳) را داریم:

$$A_m^T P + P A_m = -I \quad (۱۷۹-۳)$$

$$\begin{cases} Pe X_s^T - F_1^{-1} \dot{A}(t) = 0 \\ Pe U^T - F_2^{-1} \dot{B}(t) = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{A}(t) = F_1 Pe X_s^T \\ \dot{B}(t) = F_2 Pe U^T \end{cases} \quad (۱۸۰-۳)$$

طبق قانون تطابق، با توجه به روابط $A(t)$ ، $B(t)$ داریم:

$$\begin{cases} \dot{A}(t) = \dot{A}_s - (B_s \dot{K}(t) + \dot{B}_s K(t)) \\ \dot{B}(t) = B_s [\dot{M}(t) + \dot{K}(t)] + \dot{B}_s [M(t) + K(t)] \end{cases} \quad (۱۸۱-۳)$$

و اگر A_s, B_s با زمان آهسته تغییر کنند $\dot{A}_s = \dot{B}_s = 0$ رابطه‌ی فوق به شکل رابطه‌ی (۱۸۲-۳) در می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{A}(t) = -B_s \dot{K}(t) \\ \dot{B}(t) = B_s [\dot{M}(t) + \dot{K}(t)] \end{cases} \quad (۱۸۲-۳)$$

و از دو رابطه‌ی (۱۸۰-۳) و (۱۸۲-۳)، رابطه‌ی (۱۸۳-۳) نتیجه می‌شود:

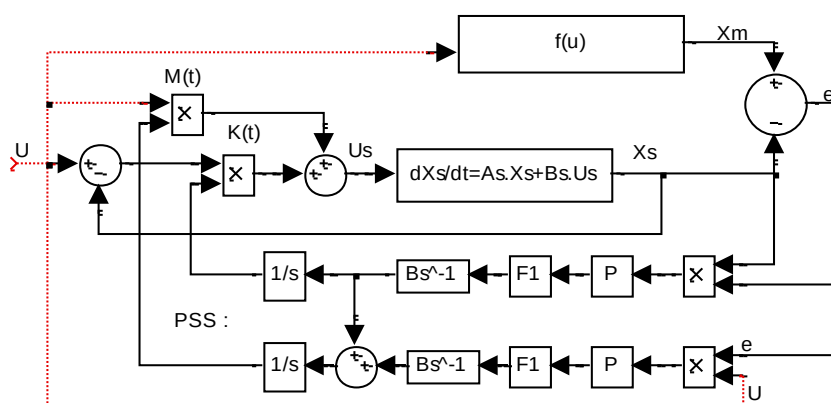
$$\begin{cases} -B_s \dot{K}(t) = F_1 P e X_s^T \\ B_s [\dot{M}(t) + \dot{K}(t)] = F_2 P e U^T \end{cases} \quad (۱۸۳-۳)$$

و در نهایت با انتگرال گیری از رابطه‌ی فوق رابطه‌ی (۱۸۴-۳) به دست می‌آید:

$$\begin{cases} K(t) = -\int [B_s^{-1} F_1 P e X_s^T] dt + K(0) \\ M(t) = \int [B_s^{-1} F_2 P e U^T + B^{-1} F_1 P e X_s^T] dt + M(0) \end{cases} \quad (۱۸۴-۳)$$

چنانچه مقادیر اولیه‌ی $M(0), K(0)$ را صفر قرار دهیم، بلا اشکال است زیرا ابتدا خطا ظاهر می‌شود و بعد از بین می‌رود.

شکل ۳-۴۰ دیاگرام کنترل غیرخطی یک سیستم غیرخطی به روش مدل مرجع با قانون تطابق لیپانوف را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴۰: دیاگرام کنترل غیرخطی سیستم غیرخطی به روش مدل مرجع با قانون تطابق لیپانوف

۳-۱۵- طراحی PSS به روش (LOC) Linear Optimal Control

در ابتدا به یادآوری کنترل بهینه می‌پردازیم. سیستم خطی توصیف شده با معادلات حالت را در نظر بگیرید، بر اساس کنترل بهینه‌ی سیستم مورد نظر، k یک ماتریس فیدبک حالت است و ورودی سیستم با رابطه‌ی (۱۸۵-۳) بیان می‌شود:

$$U = -kX \quad (۱۸۵-۳)$$

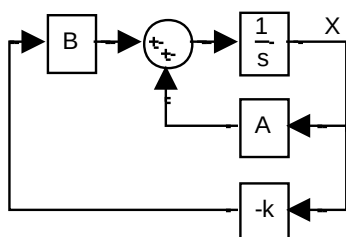
به طوری که با اعمال این کنترل کننده، تابع هدف رابطه‌ی (۱۸۶-۳) مینیمم شود.

$$\min(J) = \frac{1}{2} \int_0^\infty (X^T Q X)^T + (U^T R U)^T dt \quad (۱۸۶-۳)$$

که در آن ماتریس‌های قطری Q , R به ترتیب ماتریس‌های وزنی متغیرهای حالت X و بردار کنترل U هستند و از روی تجربه طراح به دست می‌آیند و ثابت می‌شود که مقدار ماتریس k از رابطه‌ی (۳-۱۸۷) به دست می‌آید.

$$k = R^{-1}B^T P \quad (۳-۱۸۷)$$

که در آن P ماتریس ریکاتی است و از معادله‌ی ریکاتی مطابق رابطه‌ی (۳-۱۷۷) به دست می‌آید. در نتیجه بلوک دیاگرام کنترل کننده‌ی بهینه‌ی فیدبک حالت شکل (۳-۴۱) است.



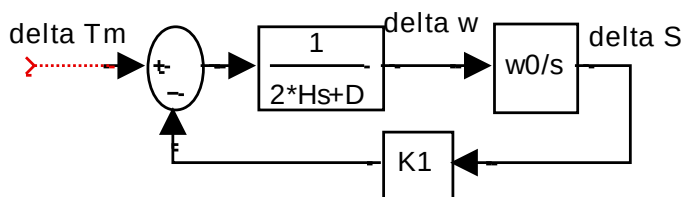
شکل ۳-۴۱ : بلوک دیاگرام کنترل کننده‌ی بهینه‌ی فیدبک حالت

با قرار دادن رابطه‌ی (۳-۱۸۵) در معادلات حالت سیستم اصلی رابطه‌ی (۳-۱۸۸) را داریم:

$$\dot{X} = AX - BkX = (A - Bk)X = A_c X \quad (۳-۱۸۸)$$

وقتی که $A_c = A - Bk$ باشد.

مثال: حلقه‌ی مکانیکی سیستم تک ماشینه را با صرف نظر کردن از معادلات الکتریکی و کنترلی، در نظر بگیرید.



شکل ۳-۴۲ : حلقه‌ی مکانیکی سیستم تک ماشینه با صرف نظر کردن از قسمت الکتریکی

اگر $f = 60^{Hz}$, $2H = 10^s$, $k_1 = 0.5$, $D = 0$ باشد، مطلوب است:

(۱) معادلات حالت سیستم

(۲) طراحی کنترل بهینه LOC جهت بهبود پایداری مدهای مکانیکی در صورتی که ماتریس‌های

$$\text{وزنی برابر } R = 1, Q = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ باشند.}$$

حل : (۱) معادلات حالت سیستم را به دست می آوریم:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\frac{k_1}{2H} & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{2H} \end{bmatrix} U$$

با جاگذاری مقادیر پارامترها، ماتریس های A,B را به دست می آوریم:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 377 \\ -0.05 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad ; \det \begin{pmatrix} \lambda_1 & -377 \\ 0.05 & \lambda_2 \end{pmatrix} = 0 \rightarrow \begin{cases} \lambda_1 = j4.342 \\ \lambda_2 = -j4.342 \end{cases}$$

$$\lambda = \sigma + j\omega \rightarrow f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{4.342}{2 \times 3.14} = 0.8^{Hz}, \xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 - \omega^2}} = 0$$

چون میرایی نداریم و $\xi = 0$ است، قطبها موهومی و سیستم نوسانی می باشد.

(۲) طراحی کنترل بهینه :

$$U = -kX, \begin{cases} k = R^{-1}B^T P \\ PA + A^T P + P(BR^{-1}B^T)P + Q = 0 \end{cases}$$

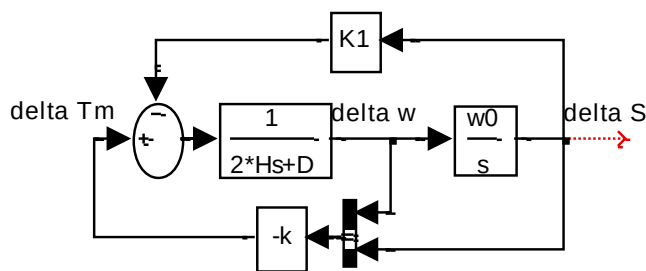
$$\text{if } : R^{-1} = 1, B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 377 \\ -0.05 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -0.05 \\ 377 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.25 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 0$$

$$\Rightarrow P = \begin{bmatrix} 1 & 2.071 \\ 2.071 & 395.3 \end{bmatrix}$$

$$, k = R^{-1}B^T P = [0.027 \quad 3.953]$$

مطابق شکل ۳-۴۳ در کنترل بهینه full state feedback داریم مثلا اگر در یک موتور DC بخواهیم کنترل بهینه انجام دهیم باید از تمام State ها یعنی i_a, i_f, ω فیدبک بگیریم.



شکل ۳-۴۳: کنترل بهینه ی حلقه ی مکانیکی سیستم تک ماشین

حال با اعمال کنترل بهینه، قطب‌های سیستم را به دست می‌آوریم که ملاحظه می‌شود همواره در سمت چپ صفحه ی S واقع هستند و سیستم پایدار شده است.

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ U = -kX \end{cases} \Rightarrow A_c = A - Bk$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 377 \\ 0.707 & -3.953 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \lambda_1 = -1.975 + j4.7 \\ \lambda_2 = -1.975 - j4.07 \end{cases}$$

۳-۱۶- فیلتر کالمن (Kalman Filter) و کاربرد آن در صنعت برق

به عنوان مقدمه به طور مختصر به توضیح اصطلاحات مهم در بحث دینامیک سیستم‌های قدرت می‌پردازیم:

(۱) Filtering: از روی یک سری اطلاعات حال در یک سیستم به اطلاعات حال دیگر در سیستم پی می‌بریم.

(۲) Predicting: از روی اطلاعات حال و گذشته‌ی سیستم به اطلاعات آینده‌ی سیستم دست می‌یابیم.

(۳) Smoothing: از روی اطلاعات حال سیستم به اطلاعات گذشته‌ی آن پی می‌بریم.

در بحث کنترل بهینه LOC حالت‌های سیستم در دسترس است و از طریق ماتریس k به صورت فیدبک حالت مطابق شکل ۳-۴۱، به بهبود رفتار دینامیکی یک سیستم اقدام می‌کند.

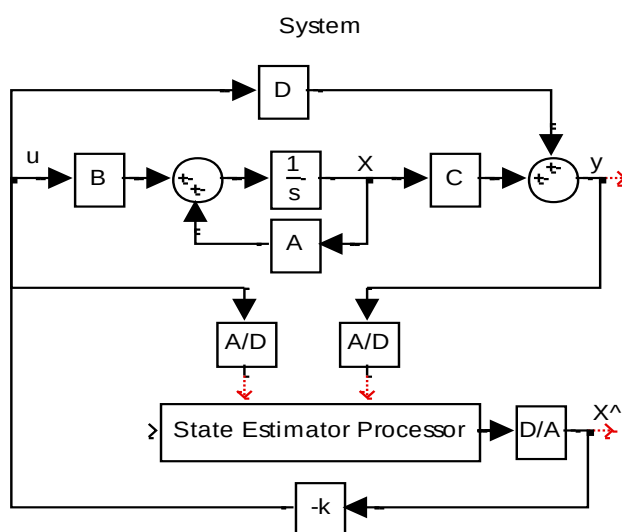
توسعه بحث LOC عبارت است از LQC^۱ و آن حالتی است که اطلاعات تمام حالت‌های سیستم در دسترس نباشند و توسط پردازنده‌ای به نام فیلتر کالمن یا هرگونه تخمین‌گر^۲ حالت دیگر، حالت‌های

^۱ Linear Quadratic Gaussian
^۲ estimator

سیستم را به دست آوریم و آنگاه از طریق کنترل بهینه‌ی خطی که فیدبک حالت با ضریب بهره‌ی k است به کنترل و پایداری سیستم پردازیم.

حال می‌خواهیم پردازنده‌ای به عنوان تخمین‌گر حالت معمولی طراحی کنیم که از روی ورودی U و خروجی y حالت‌های سیستم را تخمین بزند.

معمولاً تخمین X را با $\hat{X}$ نشان می‌دهند و در بحث کنترل خطی سیستم نشان داده شده در فضای حالت و از روی ورودی و خروجی تخمین‌گر حالت بدون حضور نویز به صورت شکل ۳-۴۴ به دست می‌آید.



شکل ۳-۴۴ : بلوک دیاگرام فضای حالت یک سیستم به همراه شماتیک تخمین‌گر حالت

پردازنده‌ی معمولی برای یک سیستم خطی بدون نویز را به صورت رابطه‌ی (۳-۱۸۹) بیان می‌کنیم:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = A\hat{X} + BU + H(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{X} \end{cases} \quad (۳-۱۸۹)$$

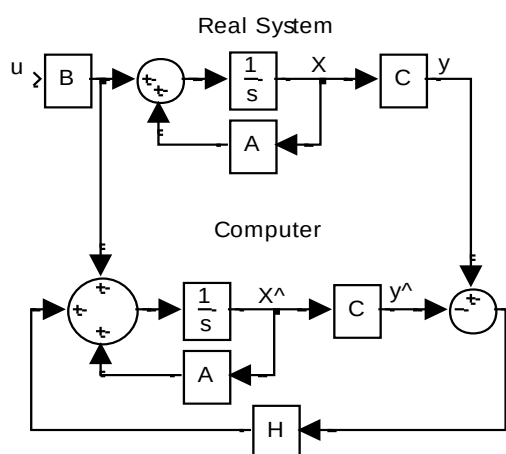
به طوری که خطای تخمین، $e(t)$ است و با شرط رابطه‌ی (۳-۱۹۰)، در بی‌نهایت به صفر میل می‌کند.

$$\begin{cases} X(t) \rightarrow \hat{X}(t) & \Rightarrow e(t) = X(t) - \hat{X}(t) = 0 \\ t \rightarrow \infty & \text{if } t \rightarrow \infty \end{cases} \quad (۳-۱۹۰)$$

ماتریس H در رابطه‌ی (۳-۱۸۹) را بهره‌ی رویت‌گر^۱ گویند که دارای دینامیک زیر است:

$$\dot{e}(t) = \dot{X}(t) - \dot{\hat{X}}(t) = (A - HC)e \quad (۳-۱۹۱)$$

رفتار تخمین گر حالت به ماتریس $A-HC$ بستگی دارد، اگر مقادیر ویژه ی $A-HC$ در سمت چپ صفحه ی S باشد، آن گاه برای تمامی شرایط اولیه ی غیر صفر، خطای $e(t)$ به سمت صفر میل می کند. بنابراین H ماتریس دلخواهی است به طوری که $A-HC$ مقادیر ویژه ی سمت چپ صفحه ی S داشته باشد و در سیستم های SISO ماتریس H یکتا است ولی در سیستم های MIMO یکتا نیست.



شکل ۳-۴۵ : پیاده سازی تخمین گر حالت در بلوک دیاگرام فضای حالت یک سیستم

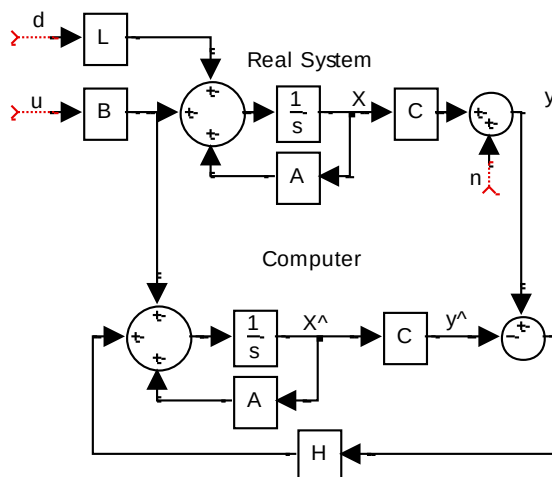
توجه کنید اگر ماتریس A سیستم دارای مقادیر ویژه ی سمت چپ باشد می توان ماتریس H را مساوی صفر قرار داد و به این تخمین گر، $peg\ stimaotr$ گویند.

۳-۱۶-۱- تخمین گر حالت سیستم دینامیکی همراه با نویز

شکل ۳-۴۶ بلوک دیاگرام سیستم رابطه ی (۳-۱۹۲) شامل نویز ورودی و نویز خروجی همراه با تخمین گر حالت فیلتر کالمن را نشان می دهد.

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + Ld \\ y = CX + n \end{cases} \quad (۳-۱۹۲)$$

وقتی که n, d به ترتیب بردارهای نویز در ورودی و خروجی است.



شکل ۳-۴۶: بلوک دیاگرام سیستم به همراه نویز ورودی و خروجی و تخمین گر حالت فیلتر کالمن

ماتریس Σ مانند ماتریس P از معادله‌ی ریکاتی بیان شده در رابطه‌ی (۳-۱۷۷) و ماتریس H از رابطه‌ی (۳-۱۹۳) به دست می‌آید.

$$H = \Sigma C^T N^{-1} \quad (۳-۱۹۳)$$

وقتی E تابع میانگین و $\delta(\tau)$ تابع ضربه باشد، روابط (۳-۱۹۴) و (۳-۱۹۵) به ترتیب توصیف‌گر نویز ورودی و خروجی است.

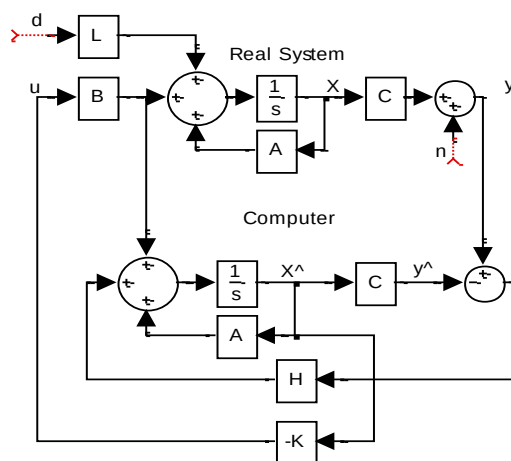
$$E[d, d^T] = D \delta(\tau) \quad (۳-۱۹۴)$$

$$E[n, n^T] = N \delta(\tau) \quad (۳-۱۹۵)$$

D ماتریس قدرت نویز در ورودی و N ماتریس قدرت نویز در خروجی، ماتریس‌های مهمی هستند که وابسته به مدل موردنظر است.

۳-۱۶-۲- کنترل کننده‌ی (LQG) Linear Quadratic Gaussian

ترکیب کنترل کننده‌ی بهینه‌ی خطی LOC و فیلتر کالمن را کنترل کننده‌ی LQG گویند و طرح‌واره آن به صورت زیر است.



شکل ۳-۴۷ : طرحواره ی کنترل کننده ی LQG

طراحی PSS را با LQG، از طریق تخمین state ها و کنترل آن را توسط کنترل بهینه انجام می دهیم. در ادامه جهت تعمیق درس، نیاز به یادآوری دو درس فرآیندهای تصادفی و کنترل فرآیندهای تصادفی می باشد. همچنین یادآوری کنترل دیجیتال (سیستم های گسسته) در حوزه ی Z لازم است، چرا که طیف وسیعی از مقالات LQG در حوزه ی Z می باشد.

تکالیف فصل سوم

۱. فرض‌های تسهیلی روی مدل ریاضی ارائه شده برای ماشین سنکرون را حذف نموده و مدل ریاضی دقیق ماشین سنکرون را به دست آورید.
۲. روابط مربوط به اندوکتانس خودی فازهای استاتور را استخراج و اثبات کنید. دقت کنید L_m, L_s مقادیری ثابت و تابعی از فاصله هوایی و جنس هسته و حجم مولد هستند.
۳. ماتریس‌های A, B را در مدل خطی چند جرم و فنر توربین بخار پنج جرمه، به دست آورید.
۴. با توجه به معادلات شار در محوره‌های $dq0$ که به معادلات Oliver مشهور است، معادلات دیفرانسیل غیرخطی الکتریکی ماشین سنکرون را بر حسب ولتاژ، جریان و اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها بنویسید.
۵. رابطه‌ی گین یا ضریب بهره PSS را برای حصول ضریب میرایی ξ_n اثبات کنید.
۶. منطقه‌ی جذب مسئله اغتشاش مجازی و قطع خط بین نیروگاه و شین بی نهایت را به دست آورید.
۷. برنامه‌ی کامپیوتری بنویسید که بر اساس اطلاعات ژنراتور، تحریک درجه یک، مدل تک‌ماشینه‌ی هفرون فیلپس و بار، مقادیر k_1 - k_6 را به دست آورد، سپس با توجه به معادلات حالت سیستم، مقادیر ویژه‌ی سیستم شامل مدهای مکانیکی و الکتریکی را استخراج نمایید و در نقاط مختلف کار (بارگیری‌های مختلف) پایداری فرکانس پایین را تحلیل نمایید و اگر سیستم ناپایدار باشد به طراحی PSS اقدام کرده و با قرار دادن PSS در مدار، مقادیر ویژه‌ی قبل و بعد از حضور PSS را به دست آورید.

$$\text{given: } P_0, Q_0, V_{t0}^{\delta 0}, X_d, X'_d, X_q, X'_q, R_e, X_e$$

$$I_{d0}, I_{q0}, V_{d0}, V_{q0}, \delta_0, E'_{q0} \quad \text{و می‌توان این پارامترها را به دست آورد:}$$

$$\text{wanted: } k_1, \dots, k_6$$

راهنمایی: انتهای کتاب *yu and non* این برنامه به *fortlan* نوشته شده است، برنامه را تبدیل به *MATLAB* یا *Visual C* نمایید.

۸. با توجه به روش کرازوفسکی، توابع لیاپانوفی برای سناریوهای پایداری با شرایط گفته شده به دست آورید و در رابطه با حد پایداری و ناپایداری نیروگاه متصل به شین بی نهایت به روش لیاپانوف بحث کنید.

۹. مدل غیر خطی یک ماشین dc تحریک مستقل را در نظر بگیرید (سیستم درجه سه غیرخطی).
مطلوب است طراحی یک کنترل کننده (PSS) غیرخطی مدل مرجع به روش لیاپانوف.
۱۰. مطلوب است طراحی PSS پیشرفته کنترل تطبیقی مدل مرجع به روش لیاپانوف برای یک سیستم تک ماشینیهی متصل به شین بی نهایت.
۱۱. مسئله ی نیروگاه تک ماشینیه را که با طراحی PSS سنتی پایدار کرده اید، مجدداً با طراحی یک PSS به روش LOC حل نمایید.
۱۲. مطلوب است طراحی یک PSS از نوع LQG برای یک سیستم تک ماشینیه با توجه به برنامه ی کامپیوتری و اطلاعات پروژه های قبلی (به بخش تکلیف ۷ مراجعه شود).
- راهنمایی : از طریق فیلتر کالمن حالت های سیستم را تخمین بزنید و از طریق کنترل بهینه ی خطی، مقادیر ویژه ی سیستم را همیشه سمت چپ محور موهومی نگه دارید.
۱۳. از سایت IEEE مقالات در مورد PSS نوع LQG بیابید و مورد مطالعه قرار دهید.

تمرین های فصل سوم

۱. از سایت IEEE بلوک دیاگرام انواع سیستم های استاندارد تحریک را استخراج کنید.
۲. با توجه به مدل ماشین سنکرون (هفرون فیلیپس) و مدل های انواع تحریک ها، طبقه بندی تحریک ها بر حسب قدرت نامی ژنراتورها را ارزیابی کنید.
- (با توجه به استانداردهای نیروگاه های کشور که پارس ژنراتور و شرکت توگا که ژنراتورها و توربین های 150^{MW} و 250^{MW} می سازند، چه نوع تحریک هایی برای هر یک از نیروگاه های گازی، بخاری و سیکل ترکیبی توصیه می کنید.)
۳. با مراجعه به سایت IEEE استاندارد انواع گاورنرها و توربین ها (با تشریح فیزیکی) و بلوک دیاگرام ریاضی آن ها را استخراج کنید.
۴. مقاله ای بنویسید (با استفاده از کتاب ogata) که کاربرد تئوری پایداری لیاپانوف را در سیستم قدرت تک ماشین به نمایش بگذارد.
۵. مثال طراحی را با برنامه ی کامپیوتری خود حل کنید.
۶. به روش کنترل بهینه یک موتور DC تحریک مستقل را که به مرور زمان پارامترهای آن تغییر کرده و در حال حاضر ناپایدار است، پایدار کنید.

پروژه های پیشنهادی فصل سوم

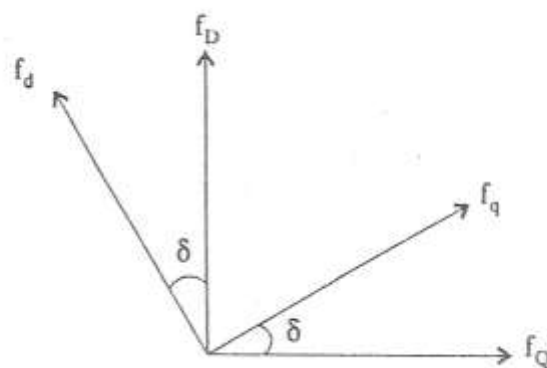
۱. طراحی و ساخت ژنراتورهای فرکانس بالا
۲. طراحی و ساخت دستگاه سنجش Online پارامترهای انواع ماشینهای الکتریکی. (سنکرون، آسنکرون، ژنراتور، ترانسفورماتور، موتور DC)
۳. بررسی انواع سیستمهای تحریک نیروگاهی در جهان و ایران
۴. بررسی پایداری سیستم قدرت در مقابله با اغتشاشات مختلف به روش لیپانوف
۵. طراحی پایدارساز بهینهی بدون حسگر در نیروگاه بندر عباس و مقایسهی آن با PSS سنتی
۶. طراحی و ساخت سیستم کنترل سرعت بدون سنسور موتور DC تحریک مستقل به روش فیلتر کالمن

فصل چهارم : دینامیک شبکه های قدرت چند ماشینه

۴-۱- روش های خطی سازی سیستم چند ماشینه

۴-۱-۱- خطی سازی حول نقطه ی کار

هر یک از ماشین ها، مدل مرجع دارند و بایستی یک مرجع مشترک در نظر گرفت چنانچه اختلاف فاز بین ولتاژ هر ماشین و مرجع مشترک δ باشد، بایستی روابط را به اندازه ی δ درجه دوران داد. شکل ۴-۱ را در نظر بگیرید.



شکل ۴-۱ : دیاگرام فازوری نیروهای محرکه در مختصات مرجع و واحد

V_d, V_q مولفه های ولتاژ در مختصات مرجع و V_D, V_Q مولفه های ولتاژ در مختصات واحد است به طور مشابه برای جریان نیز به همین ترتیب است. دوران ولتاژهای مختصات مرجع به مختصات واحد از طریق روابط (۱-۴) و (۲-۴) به ترتیب برای ولتاژ و جریان انجام می شود:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix} \quad (۱-۴)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (۲-۴)$$

برای n تا ماشین ماتریس ولتاژ و جریان در دو مختصات به ترتیب به صورت روابط (۳-۴) و (۴-۴) خواهد بود:

$$V_{dq} = \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \\ \vdots \\ V_{dn} \\ V_{qn} \end{bmatrix}, \quad V_{DQ} = \begin{bmatrix} V_{D1} \\ V_{Q1} \\ \vdots \\ V_{Dn} \\ V_{Qn} \end{bmatrix} \quad (۳-۴)$$

$$I_{dq} = \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{q1} \\ \vdots \\ I_{dn} \\ I_{qn} \end{bmatrix}, \quad I_{DQ} = \begin{bmatrix} I_{D1} \\ I_{Q1} \\ \vdots \\ I_{Dn} \\ I_{Qn} \end{bmatrix} \quad (۴-۴)$$

تعمیم دوران واحدها حول مرجع از طریق ماتریس T طبق رابطه ی (۵-۴) امکان پذیر است:

$$T = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ -\sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} & & 0 \\ & \dots & \\ 0 & & \begin{bmatrix} \cos \delta_n & \sin \delta_n \\ -\sin \delta_n & \cos \delta_n \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (۵-۴)$$

با استفاده از روابط (۶-۴) می توان فرمول بین ولتاژ و جریان را در مختصات واحد مطابق رابطه ی (۷-۴) به دست آورد.

$$I_{dq} = [T]I_{DQ}, \quad V_{dq} = [T]V_{DQ}, \quad I_{DQ} = [Y]V_{DQ} \quad (۶-۴)$$

$$I_{dq} = [T][Y][T]^{-1}V_{dq} = [Y']V_{dq} \quad (۷-۴)$$

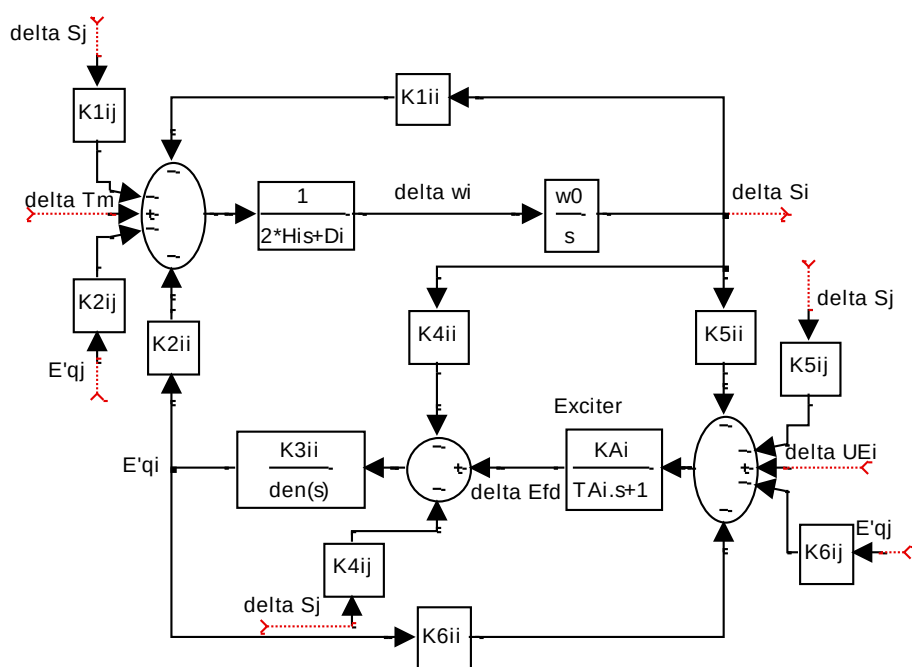
با توجه به مدل غیرخطی هر یک از ماشین ها و رابطه ی فوق که مربوط به شبکه است، مدل غیرخطی چند ماشینه را با توجه به نقطه ی کار، خطی می کنیم.

جهت تبدیل ماتریس دوران به یک رابطه ی خطی حول نقطه ی کار به عنوان مثال برای جریان از رابطه ی (۸-۴) استفاده می کنیم:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{Di} \\ \Delta i_{Qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_{0i} & -\sin \delta_{0i} \\ +\sin \delta_{0i} & \cos \delta_{0i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{di} \\ \Delta i_{qi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -i_{d0i} \sin \delta_{0i} - i_{q0i} \cos \delta_{0i} \\ i_{d0i} \cos \delta_{0i} - i_{q0i} \sin \delta_{0i} \end{bmatrix} \quad (8-4)$$

۴-۱-۲- تعمیم مدل هفرون فلیپس در سیستم های چند ماشینه

می توان مدل هفرون فلیپس را مطابق شکل ۴-۲ به سیستم های چند ماشینه تعمیم داد^۱:



شکل ۴-۲: تعمیم مدل هفرون فلیپس در سیستم های چند ماشینه

که پارامترهای مدل تعمیم یافته ی هفرون فلیپس شامل موارد زیر است:

(۱) پارامترهای تک تک ماشین ها شامل T'_{d0i}, D_i, H_i

(۲) پارامترهای خودی نقطه ی کار شامل $k_{1ii}, \dots, k_{6ii}$

(۳) پارامترهای تداخل ماشین ها با یکدیگر شامل $k_{1ij}, \dots, k_{6ij}$

^۱ این بحث از کتاب دینامیک آقای دکتر کراری صفحه ی ۱۸۲ اقتباس شده است.

در ادامه به محاسبه ی شش ماتریس $[K_1]$ تا $[K_6]$ می پردازیم که عناصر روی قطر آنها پارامترهای خودی نقطه ی کار ماشین یعنی k_{1ii} تا k_{6ii} می باشند و عناصر غیر قطر اصلی پارامترهای تداخل ماشین ها با یکدیگر هستند.

در صورت ناپایداری، روی ماشین ناپایداری که اندازه ی بخش حقیقی مثبت مقادیر ویژه اش بزرگتر از مقادیر ویژه ی ماشین های دیگر باشد، PSS می گذاریم.

رابطه ی (۹-۴) دیاگرام فازوری ماشین نام را توصیف می کند:

$$V_i = E'_{qi} e^{j(90-\delta_i)} - jx'_{di} I_i - (x_{qi} - x'_{di}) I_{qi} e^{-j\delta_i} \quad (9-4)$$

و برای ماشین n ام رابطه ی فوق به صورت ماتریسی عبارت است از:

$$[V] = [e^{j(90-\delta_i)}] [E'_{qi}] - j[x'_d] [I] + [x_q - x'_d] [e^{-j\delta}] [I_q] \quad (10-4)$$

در رابطه ی فوق هر گروه، ماتریس قطری است که در آن هر عنصر قطری مربوط به یک ماشین است. از طرفی رابطه ی (۷-۴) بین ولتاژ و جریان برقرار است و از ترکیب دو رابطه مقادیر جریان های هر ماشین به دست می آید. رابطه ی (۱۱-۴) را برای گشتاور الکتریکی ماشین نام می دانیم.

$$T_{ei} = \text{Re}[I_i^* V_i] \quad (11-4)$$

و پس از خطی سازی به رابطه ی (۱۲-۴) می رسیم:

$$[\Delta T_e] = [K_1] [\Delta \delta] + [K_2] \Delta E'_q \quad (12-4)$$

که در آن روابط زیر برای درایه های دو ماتریس $[K_1]$ و $[K_2]$ برقرار است:

$$\begin{cases} k_{1ii} = D_t F_{dii} + Q_t F_{qii} \\ k_{1ij} = D_t F_{dij} + Q_t F_{qij} \end{cases} \quad (13-4)$$

$$\begin{cases} k_{2ii} = D_t Y_{dii} + Q_t Y_{qii} \\ k_{2ij} = D_t Y_{dij} + Q_t Y_{qij} \end{cases} \quad (14-4)$$

وقتی که ضرایب D_t و Q_t از رابطه ی (۱۵-۴) به دست می آیند:

$$\begin{cases} D_t = (x_{qi} - x'_{di}) I_{qi0} \\ Q_t = (x_{qi} - x'_{di}) I_{di0} + E_{qi0} \end{cases} \quad (15-4)$$

توجه کنید با مطالعه ی مقاله ی آقای دکتر رنجبر که در رابطه با محاسبه ی ضریب k_1 تا k_6 برای مدل هفرون فلیپس تک ماشینه به شین بی نهایت می باشد و مقدمه ی ارائه شده، می توان درایه های سایر ماتریس ها را به صورت زیر دست آورد.

$$\begin{cases} k_{3ii} = [1 + [X_{di} - X'_{di}]Y_{dii}]^{-1} \\ k_{3ij} = [[X_{di} - X'_{di}]Y_{dij}]^{-1} \end{cases} \quad (۱۶-۴)$$

$$\begin{cases} k_{4ii} = [[X_{di} - X'_{di}]Y_{dii}]^{-1} \\ k_{4ij} = [[X_{di} - X'_{di}]F_{dij}] \end{cases} \quad (۱۷-۴)$$

$$[k_5] = [D_v][X_q][F_q] - [Q_v][X'_d][F_d] \quad (۱۸-۴)$$

$$[k_6] = [D_v][X_q][Y_d] - [Q_v][X'_d][Y_d] + [Q_v] \quad (۱۹-۴)$$

$$[D_v] = [V_{t0}]^{-1}[V_{d0}] \quad , \quad [Q_v] = [V_{t0}]^{-1}[V_{q0}] \quad (۲۰-۴)$$

۴-۱-۳- مدل ماتریسی هفرون فلیپس

مدل ماتریسی هفرون فلیپس را می توان به صورت روابط (۲۲-۴) تا (۲۹-۴) بیان نمود:

$$T_M = 2H_{eq} = \text{Diag}[2H_1, \dots, 2H_n] \quad (۲۱-۴)$$

$$D = \text{Diag}[D_1, D_2, \dots, D_n] \quad (۲۲-۴)$$

$$T'_{d0} = \text{Diag}[T'_{d0_1}, \dots, T'_{d0_n}] \quad (۲۳-۴)$$

$$M_1 = k_1 + k_3 R_1^{-1} R_2 \quad (۲۴-۴)$$

$$M_2 = k_2 + k_8 R_1^{-1} R_3 \quad (۲۵-۴)$$

$$M_3 = -k_3^{-1} + k_9 R_1^{-1} R_3 \quad (۲۶-۴)$$

$$M_4 = k_4 + k_9 R_1^{-1} R_2 \quad (۲۷-۴)$$

$$M_5 = k_5 + k_7 R_1^{-1} R_2 \quad (۲۸-۴)$$

$$M_6 = k_6 + k_7 R_1^{-1} R_3 \quad (۲۹-۴)$$

که $k_1, \dots, k_9$ طبق پیوست ۱ محاسبه می شود.

مدل حالت سیستم چند ماشینه به صورت رابطه ی (۳۰-۴) خواهد بود که در آن ماتریس های A و B از رابطه ی (۳۱-۴) محاسبه می شوند.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (30-4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_n & 0 & 0 \\ -\omega_0 T_m^{-1} M_1 - D T_m^{-1} & -\omega T_m^{-1} M_2 & 0 & 0 \\ -T_{d0}^{-1} M_4 & 0 & T_{d0}^{-1} M_3 & T'_{d0} \\ -K_A T_A^{-1} M_5 & 0 & -K_A T_A^{-1} M_6 & -T'_A \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_A T_A^{-1} \end{bmatrix} \quad (31-4)$$

وقتی که روابط زیر برای T_A و K_A برقرار است:

$$T_A = \text{Diag}[T_{A1}, \dots, T_{An}] \quad (32-4)$$

$$K_A = \text{Diag}[K_{A1}, \dots, K_{An}] \quad (33-4)$$

۴-۲- جایابی PSS در سیستم چند ماشینه

جهت پی بردن به پایداری سیستم چند ماشینه از الگوریتم زیر استفاده می کنیم:

(۱) ابتدا مدل تعمیم یافته ی هفرون فیلپس با ضرایب مربوط به آن را رسم می کنیم.

(۲) معادلات حالت سیستم را از روی آن به دست می آوریم.

(۳) با توجه به ماتریس A مقادیر ویژه ی کل سیستم را محاسبه می نماییم.

(۴) اگر مد مکانیکی ماشین ها (λ با ω کوچک تر) در سمت راست محور $j\omega$ باشد، سیستم ناپایدار است.

سپس برای جایابی PSS در سیستم چند ماشینه به روش زیر عمل می کنیم:

(۱) ابتدا اولین PSS را روی ماشینی قرار می دهیم که قسمت حقیقی مقدار ویژه ی آن بزرگ ترین مقدار مثبت را دارد و به روش تک ماشینه PSS آن را طراحی می کنیم.

(۲) PSS طراحی شده را که یک سیستم درجه دو یا سه است، به سیستم اضافه می کنیم و مجدداً ماتریس A معادله ی حالت جدید را به دست می آوریم.

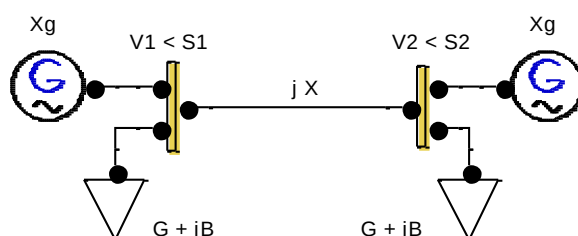
(۳) قدم های گفته شده را از مرحله ی (۱) تکرار می کنیم تا با جایابی های متعدد PSS که روی سیستم می گذاریم، یک سیستم پایدار داشته باشیم.

تکالیف فصل چهارم

۱. با توجه به مقدمه‌ی خطی‌سازی حول نقطه‌ی کار، سیستم غیرخطی چند ماشین را حول نقطه‌ی کار خطی کنید.

$$\begin{cases} \ddot{\delta}_i = \frac{\omega_0}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \\ P_{ei} = \sum (|E_i| |E_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})) \end{cases}$$

۲. بلوک دیاگرام سیستم دو ماشین را خطی زیر را رسم کرده و معادلات حالت آن را بنویسید. (سیستم تحریک درجه ۱ است.)



۳. با توجه به data مسئله‌ی امتحانی (تک ماشین) و data سیستم دوشینه‌ی مسئله‌ی امتحانی درس بررسی ۲ مقادیر ویژه‌ی سیستم را از روی ماتریس A به دست آورید.

آیا سیستم پایدار است؟ اگر پایدار نیست روی کدام یک از ماشین‌ها باید PSS گذاشت؟

۴. مقالات مرتبط با جاییابی PSS در سیستم چند ماشین را مطالعه نمایید.



تمرین های فصل چهارم

۱. برنامه کامپیوتری بنویسید که ضرایب خودی و متقابل سیستم چند ماشینهی خطی را با توجه به پارامترهای ماشین ها و نقطه‌ی کار سیستم که از پخش بار به دست می‌آید، محاسبه نماید.

پروژه های پیشنهادی فصل چهارم

۱. روش های مختلف طراحی PSS در سیستم های قدرت
۲. بررسی روش های جایابی PSS در سیستم های چند ماشینه (مرجع : پایان نامه های دکتر لسانی، دکتر پرنیانی و دکتر خدرزاده)

فصل پنجم: انعطاف پذیر کردن سیستم قدرت

۵-۱- روش های پیشرفته جهت انعطاف پذیر کردن سیستم قدرت

این روش ها جهت کنترل دینامیکی سیستم قدرت به وسیله ی به کار بردن موارد زیر تحقق می یابد:

(۱) ادوات FACTS^۱

(۲) نیروگاه های تلمبه ذخیره ای دور متغیر DFIG^۲

کنترل کننده های FACTS و نصب DFIG در نیروگاه های تلمبه ذخیره ای با ایجاد درجه آزادی مضاعف برای کنترل سیستم قدرت به منظور بهره برداری بهتر در "مکان های کلیدی" فاصله ی بین عملکرد سیستم قدرت در حالت کنترل نشده و کنترل شده را کم می کند.

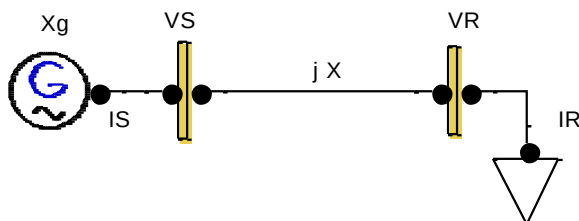
ماشین سنکرون و DFIG شامل مدهای کنترلی مد ژنراتوری، مد موتوری، مد کندانسوری می باشد که بسته به هدف بهره برداری می توانند در هر یک از این مدها کار کنند.

^۱ Flexible AC Transmission Systems

^۲ Double Fet Induction Generator

۵-۲- مدل خط بلند و بدون تلفات

شکل ۵-۱ را در نظر بگیرید:



شکل ۵-۱: سیستم تک ماشینه ی متصل به بار

رابطه ی (۵-۱) روابط ولتاژ و جریان یک خط بلند را بیان می کند.

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \sinh(\gamma x) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (۵-۱)$$

وقتی که x فاصله ی نقطه ی مورد نظر خط تا محل بار باشد و پارامترهای خط از طریق روابط (۵-۲) تا

(۵-۵) محاسبه می شوند.

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (۵-۲)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (۵-۳)$$

$$Z = r + jx = r + jL\omega \quad (۵-۴)$$

$$Y = g + jb = g + jc\omega \quad (۵-۵)$$

در حالت خاص $x = l$ که l طول خط است، رابطه ی (۵-۱) به شکل رابطه ی (۵-۶) نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (۵-۶)$$

در مدل خط بدون تلفات که $r = g = 0$ است، روابط (۵-۷) تا (۵-۹) را برای پارامترهای خط، ولتاژ و

جریان آن داریم:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (۵-۷)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} = j\omega\sqrt{LC} = j\beta \quad (۸-۵)$$

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta x) & Z_c \sin(\beta x) \\ \frac{1}{Z_c} \sin(\beta x) & \cos(\beta x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (۹-۵)$$

اگر خط انتقال به باری معادل امپدانس مشخصه خط Z_c وصل باشد دامنهی ولتاژ و جریان در هر نقطه‌ی خط با هم برابرند و فازورهای ولتاژ و جریان در ابتدا و انتهای خط با هم به اندازه‌ی $\theta = \beta l$ اختلاف فاز دارند و در این حالت توان انتقالی که به SIL^1 معروف است طبق رابطه‌ی (۵-۱۰) است:

$$P_0 = SIL = \frac{V_S^2}{Z_c} = \frac{V_R^2}{Z_c} = \frac{V^2}{Z_c} \quad (۱۰-۵)$$

توجه کنید بارگیری خطوط به مقدار 2.5 SIL ، حد حرارتی خط است.

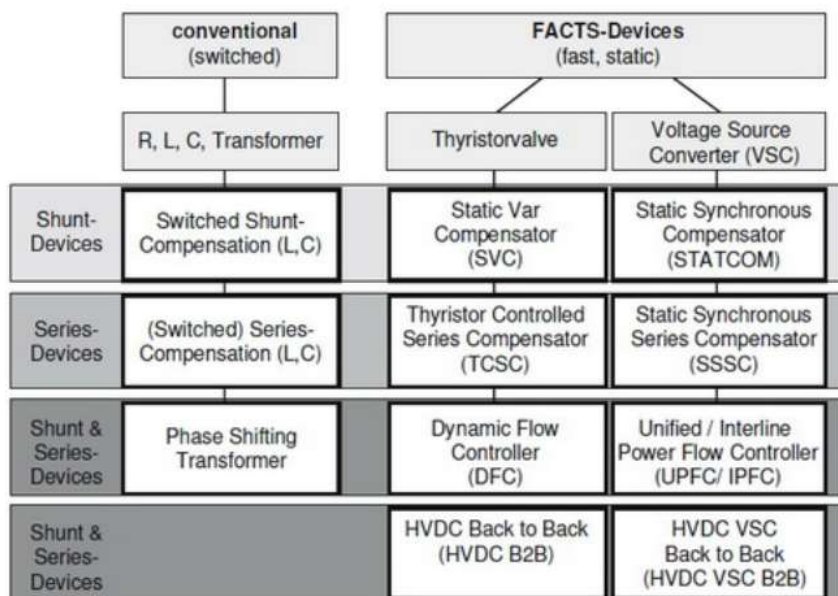
در واقع وقتی بار خط، یک SIL است، خاصیت خازنی و سلفی خط توان راکتیو همدیگر را جبران می‌کنند و ولتاژ در طول خط مسطح است.

اگر بار خط بیشتر از یک SIL باشد، خاصیت سلفی خط غالب است و اگر کمتر از یک SIL باشد، خاصیت خازنی خط غالب خواهد بود.

۵-۳- تأثیر جبران سازه‌های غیرفعال و فعال در مشخصه‌ی خطوط انتقال

جبران سازه‌های خطوط انتقال به دو دسته‌ی جبران سازه‌های غیرفعال یا متعارف و جبران سازه‌های فعال یا همان ادوات FACTS مطابق شکل ۵-۲ تقسیم‌بندی می‌شوند.

^۱ SIL : Surge Impedance Loading



شکل ۵-۲ : دو دسته ی اصلی ادوات جبران ساز

در ادامه به توضیح مختصری از این دو دسته جبران ساز می پردازیم.

۵-۳-۱- جبران سازی غیرفعال

خازن های سری و موازی و راکتورهای سری و موازی قابلیت تغییرات پیوسته را ندارند و با مدارشکن^۱ در مدار می آیند. ضریب جبران سازی سری و ضریب جبران سازی موازی به ترتیب مطابق روابط (۵-۱۱) و (۵-۱۲) بیان می شود:

$$K_{se} = \frac{X_{se}}{X_L} \quad (۵-۱۱)$$

$$K_{sh} = \frac{X_L}{X_{sh}} \quad (۵-۱۲)$$

وقتی که X_L راکتانس خط، X_{se} راکتانس خازن یا سلف سری و X_{sh} راکتانس خازن یا سلف موازی است.

در این صورت، امپدانس مشخصه، SIL خط، و زاویه ی الکتریکی به ترتیب از روابط (۵-۱۳) تا (۵-۱۶) به دست می آیند:

$$Z'_c = Z_c \sqrt{\frac{1-K_{se}}{1-K_{sh}}} \quad (۵-۱۳)$$

$$P'_0 = P_0 \sqrt{\frac{1-K_{sh}}{1-K_{se}}} \quad (۱۴-۵)$$

$$\beta' = \beta(1-K_{se})(1-K_{sh}) \quad (۱۵-۵)$$

$$\theta' = \theta \sqrt{(1-k_{sh})(1-k_{se})} \quad (۱۶-۵)$$

۵-۳-۲- جبران سازی فعال

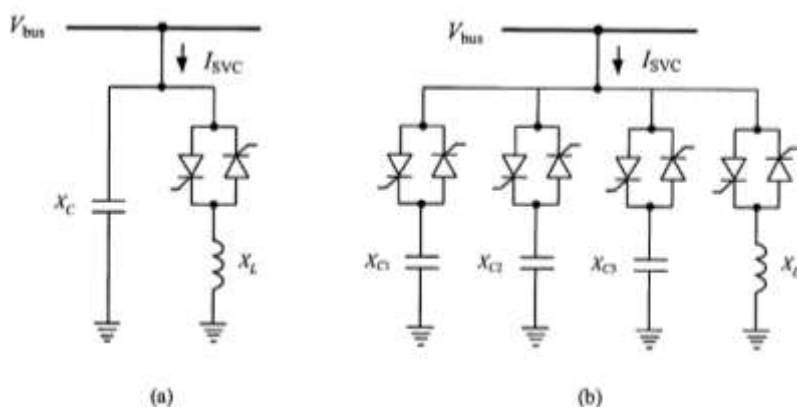
این جبران‌سازها قابلیت تغییرات پیوسته دارند مانند ادوات FACTS که به دو دسته‌ی زیر تقسیم می‌شوند:

(۱) نسل قدیم با استفاده از ترستور مثل SVC , TCR , TCSC.

(۲) نسل جدید با استفاده از GTO مثل STATCOM , UPFC , SSSC.

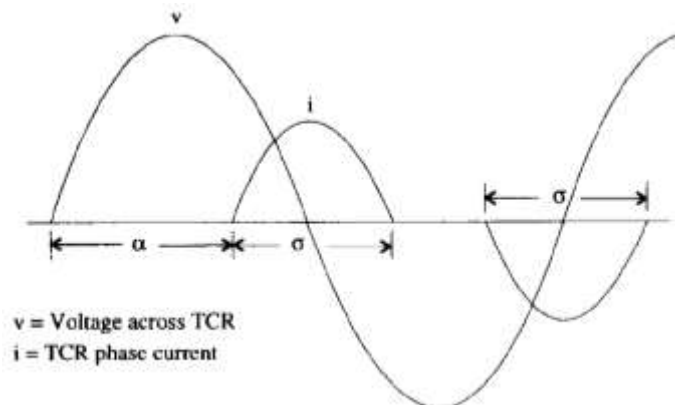
ساختمان و نمای ظاهری انواع ادوات FACTS نسل قدیم

(۱) SVC : مطابق شکل ۵-۳ ممکن است از ترکیب موازی TCR و خازن ثابت یا ترکیب موازی TCR و TSC تشکیل شده باشد.



شکل ۵-۳ : ساختمان SVC : (a) TCR با خازن ثابت (b) TCR با TSC

طبق شکل ۵-۴ رابطه‌ی (۵-۱۷) بین زاویه‌ی آتش α و زاویه‌ی هدایت σ برقرار است:



شکل ۵-۴: شکل موج ولتاژ و جریان TCR

$$\sigma + 2\alpha = 2\pi \quad (5-17)$$

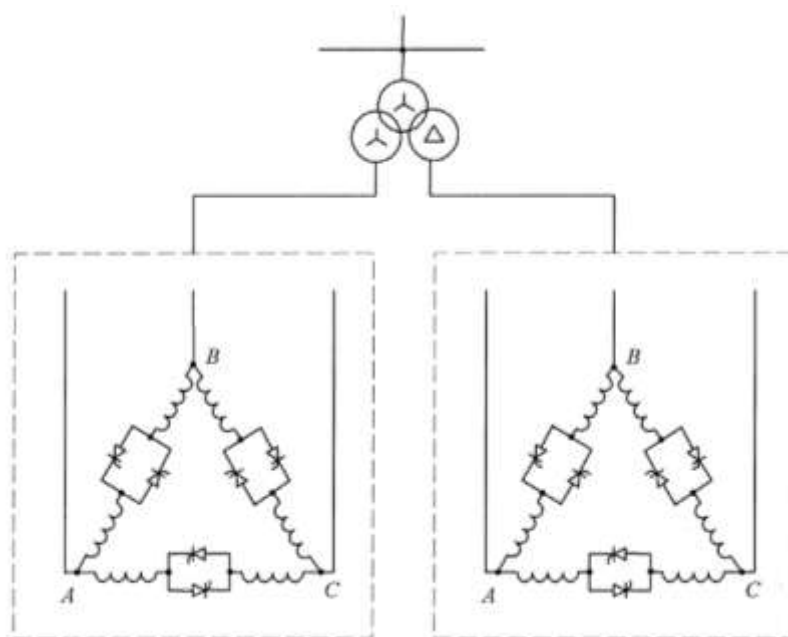
در نتیجه راکتانس SVC در حالت شکل ۵-۳(a) از رابطه‌ی (۵-۱۸) محاسبه می‌شود:

$$X_{SVC} = X_{TCR} \parallel X_C \quad (5-18)$$

وقتی که X_{TCR} از رابطه‌ی (۵-۱۹) به دست می‌آید:

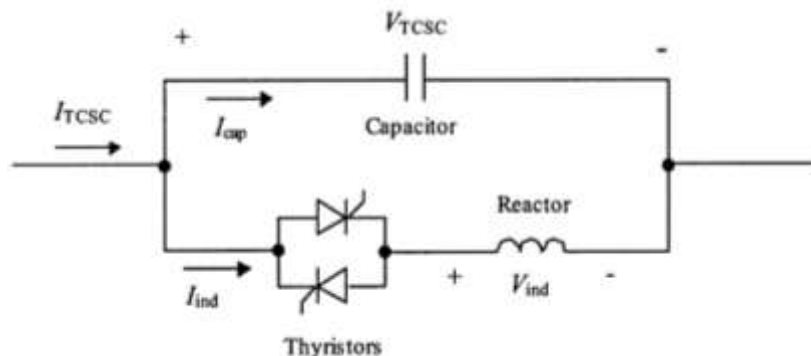
$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{\sigma - \sin \sigma} = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)} \quad (5-19)$$

در طرح SVC ارزان قیمت Alexandror مطابق شکل ۵-۵ از یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه و خازن و فیلتر و ترستور Δ parallel استفاده می‌شود.



شکل ۵-۵: پیکربندی TCR ۱۲-پالسه به همراه ترانسفورماتور با دو سیم پیچ ثانوی

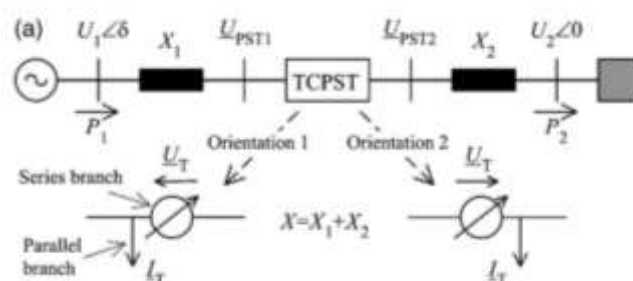
(۲) TCSC: ساختمان و مدل ظاهری TCSC مطابق شکل ۵-۶ ترکیب موازی از یک خازن ثابت و TCR است. TCSC به طور سری در خط انتقال نصب می شود و طبق رابطه ی (۵-۲۰) از طریق تغییر زاویه ی آتش α ، راکتانس سری خط را تحت تاثیر قرار می دهد.



شکل ۵-۶: طرح پایه ای از TCSC

$$X_{TCSC} = X_C \parallel X_L(\alpha) \quad (۵-۲۰)$$

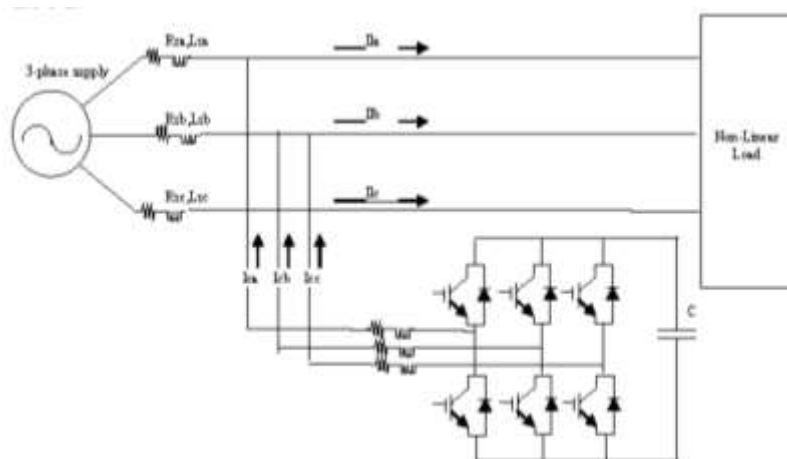
(۳) TCPST^۱: متشکل از ترانسفورماتور Boost که به صورت سری و ترانسفورماتور Excitation که به صورت موازی با شبکه نصب می شوند. شکل (۵-۷) نشان دهنده ی شبکه ی تک خطی به همراه TCPST است که برای دو فاز دیگر هم مشابه خواهد بود.



شکل ۵-۷: شبکه ی تک خطی به همراه TCPST

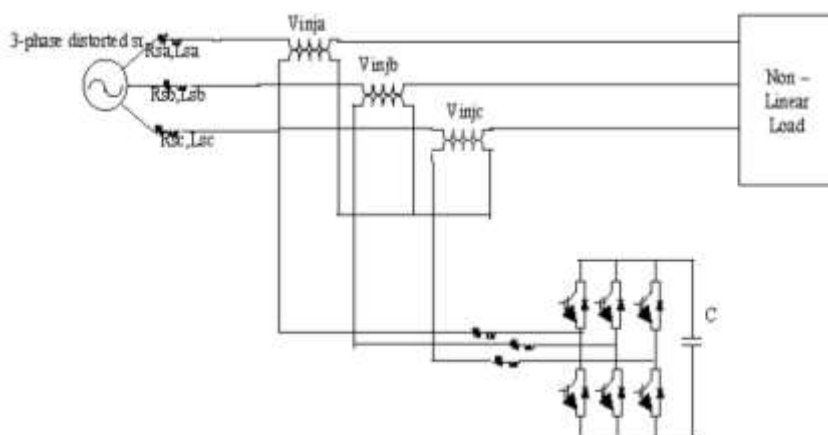
ساختمان و نمای ظاهری انواع ادوات FACTS نسل جدید

(۱) STATCOM: مطابق شکل ۵-۸، یک عنصر موازی با شبکه است که متشکل از سوئیچ های GTO می باشد.



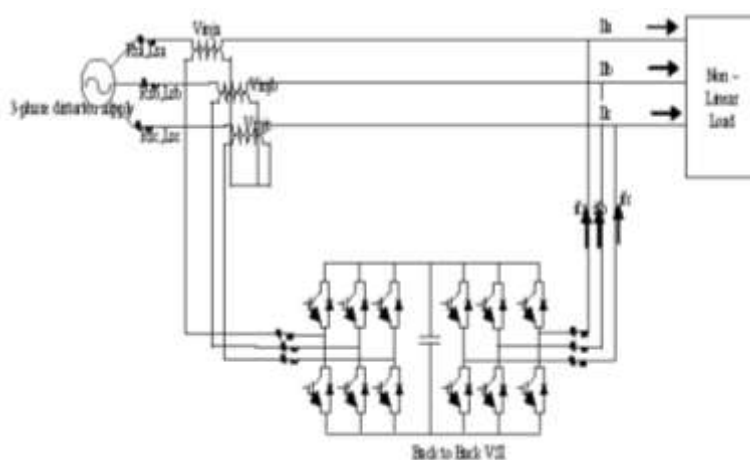
شکل ۵-۸ : STATCOM سه سیمه ی سه فاز

(۲) SSSC : مطابق شکل ۵-۹، به صورت سری با شبکه نصب می شود.



شکل ۵-۹ : SSSC سه سیمه ی سه فاز

(۳) UPFC : مطابق شکل ۵-۱۰، به صورت سری-موازی به شبکه متصل می شود.



شکل ۵-۱۰ : UPFC سه سیمه ی سه فاز

۵-۴- مدل خطی و غیرخطی سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت با اضافه شدن

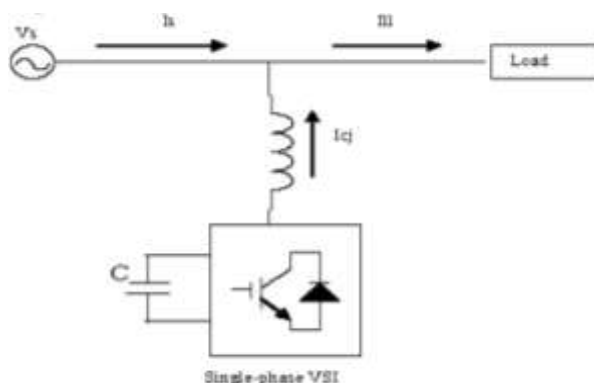
عناصر جبران ساز کنترل پذیر

در بحث های گذشته مدل غیرخطی و خطی سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت بدون ادوات FACTS بررسی شد، در ادامه می خواهیم مدل را با حضور ادوات FACTS توسعه دهیم. ضمناً طراحی کنترل کننده های FACTS جهت بهبود پایداری دینامیکی و گذرا مورد بررسی قرار می گیرند. یک سیستم تک ماشینه را با حضور سه عنصر FACTS نسل قدیم SVC، TCSC و TCPST در نظر بگیرید. رابطه ی (۵-۲۱) برای توان الکتریکی عبوری خط برقرار است:

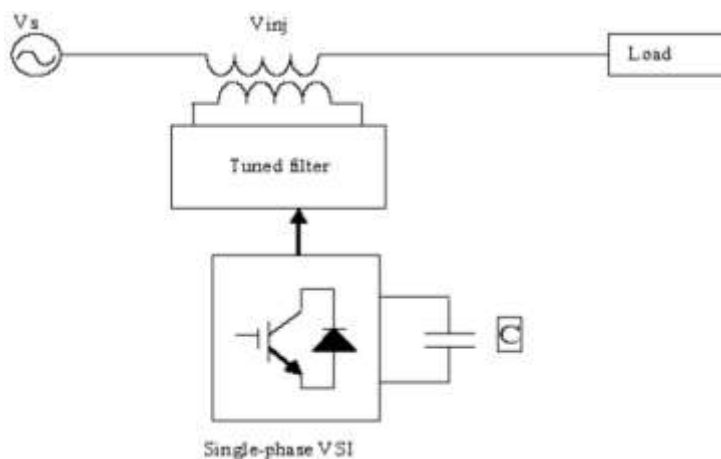
$$P = \frac{|V_i||V_j|}{\sum x_{ij}} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (۵-۲۱)$$

SVC اندازه ی ولتاژ V_i ، TCSC مقدار $\sum x$ و TCPST مقدار δ را تغییر می دهد و به کمک هر یک از این ها می توان توان الکتریکی P_e و در نتیجه، پایداری سیستم را افزایش داد.

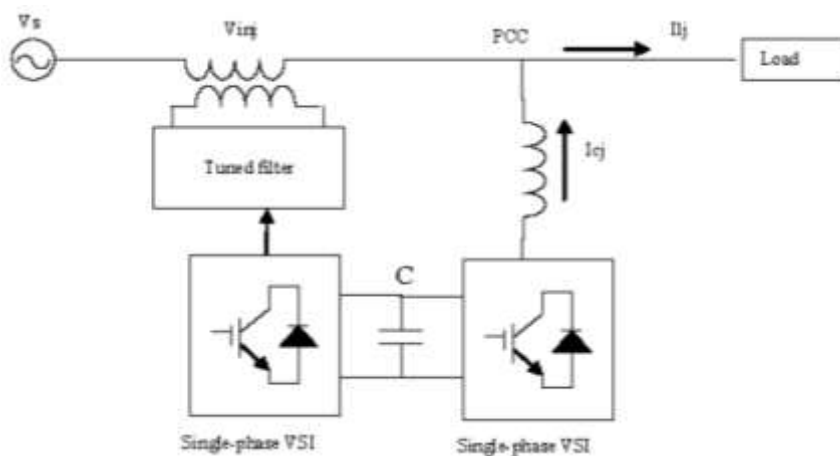
شکل های ۵-۱۱ تا ۵-۱۳ یک سیستم قدرت تک ماشینه را همراه با ادوات FACTS نسل جدید نمایش می دهد.



شکل ۵-۱۱ : STATCOM تک فاز



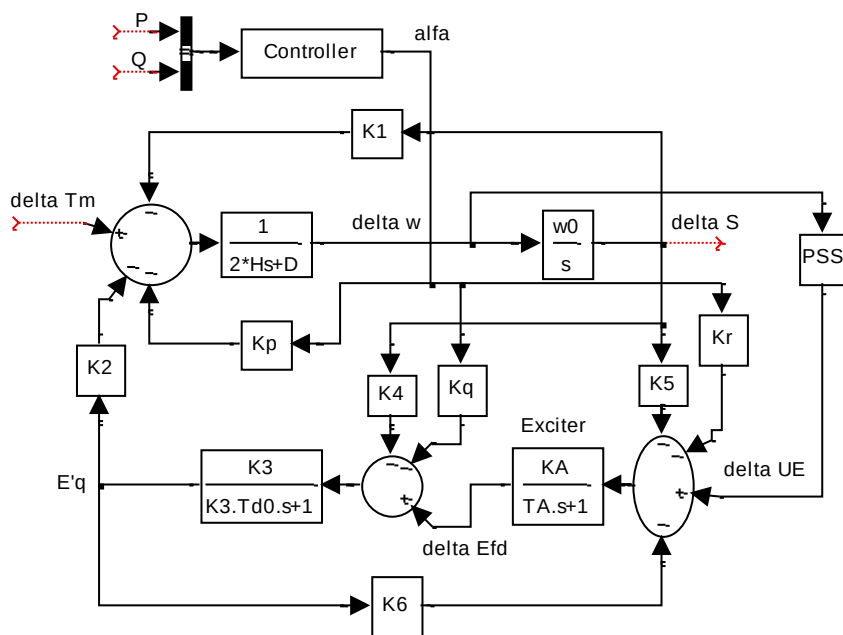
شکل ۵-۱۲ : SSSC تک فاز



شکل ۵-۱۳ : UPFC تک فاز

بر روی ادوات FACTS با هدف پایداری، کنترلرهای قرار می‌دهیم.

شکل ۵-۱۴ مدل اصلاح‌شده‌ی هفرون فلیپس با حضور ادوات FACTS می‌باشد.



شکل ۵-۱۴: مدل اصلاح شده ی هفرون فلیپس با حضور ادوات FACTS

توجه کنید مدل هفرون فلیپس با حضور عناصر FACTS مشابه مدل قبلی ماشین سنکرون است، فقط گین‌ها و ضریب بهره‌های k_p ، k_q ، k_r را مطابق شکل که از طریق زاویه‌ی آتش α به سیستم

سیگنال اضافه می کند، اضافه دارد. محاسبه ی k_r , k_q , k_p بستگی به نوع ادوات FACTS استفاده شده دارد و مقادیر فوق از روی مدل غیرخطی شان به دست می آید.^۱

توجه کنید کلیه ی عناصر FACTS و مدل خطی و غیرخطی برای محاسبات پایداری گذرا و دینامیکی تمام شبکه های استاندارد مطالعاتی در نرم افزار PSAT موجود است.

در حالت دائم بسته به نوع ادوات جبران ساز که موازی یا سری با شبکه قرار گرفته باشند، ماتریس ادمیتانس شبکه انعطاف پذیر شده و می تواند از طریق تغییرات زیر پخش بار را در شبکه کنترل کند.

(۱) اگر عنصر FACTS موازی درشین i باشد، درایه ی Y_{ij} , Y_{ii} تغییر کرده و به زاویه ی α وابستگی پیدا می کند و به صورت $Y_{ij}(\alpha)$, $Y_{ii}(\alpha)$ نمایش داده می شوند.

(۲) اگر عنصر FACTS سری در خط ij باشد، هر چهار درایه ی ماتریس Y_{bas} تغییر می کند و به صورت رابطه ی (۲۲-۵) نمایش داده می شود.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{ii}(\alpha) & Y_{ij}(\alpha) \\ Y_{ji}(\alpha) & Y_{jj}(\alpha) \end{bmatrix} \quad (22-5)$$

۵-۵- کاربرد دینامیک سیستم قدرت در سایر حوزه ها

۵-۵-۱- دینامیک و اجزای خودروی هیبرید برقی H.E.V

خودروی هیبرید برقی، اتومبیل جدیدی است که بدون از دست دادن کیفیت، راحتی و کارایی خودروهای فعلی به میزان سه برابر در روند مصرف سوخت صرفه جویی می کند و در عین حال به طور موثر از آلاینده ی آگروز جهت حفاظت محیط زیست می کاهد. خودروی هیبرید برقی HEV ادغامی از خودرو احتراق معمولی ICE و خودروی برقی EV است. این خودرو دارای مزایای هر دو نوع خودرو است در حالی که معایب هریک را نیز کم می کند.

در این خودروها باتری برای ذخیره ی انرژی الکتریکی استفاده می شود و انرژی الکتریکی از طریق یک ماشین الکتریکی به کار مکانیکی در چرخ های خودرو تبدیل می شود، همچنین سوخت ذخیره شده در اتومبیل از طریق موتور احتراقی برای تولید کار مکانیکی در چرخ ها و یا تبدیل به انرژی الکتریکی توسط همان ماشین الکتریکی و ذخیره در باتری استفاده می شود. ضمناً در مرحله ی ترمزگیری، انرژی مکانیکی توسط ژنراتور الکتریکی در باتری ذخیره می شود.

^۱ کتاب FACTS، ترجمه ی مهندس درافشان

انواع خودروهای هیبرید شامل خودروی هیبرید برقی سری، موازی، سری-موازی می باشد و اجزای مدل خودروی هیبرید برقی عبارتند از :

(۱) موتور احتراقی و مدل دینامیکی آن

(۲) ژنراتور کنترل کننده

(۳) موتور الکتریکی

(۴) سیستم ذخیره ی انرژی (باتری)

(۵) مدل جعبه دنده

(۶) مدل رانشی نهایی

(۷) مدل چرخ و محور

(۸) مدل بدنه و شاسی

(۹) مدل اگزوز

(۱۰) سیکل حرکتی

توجه کنید نرم افزار Adviser توسط آزمایشگاه ملی انرژی های نو آمریکا^۱ وابسته به وزارت انرژی آمریکا^۲ تهیه و در محیط MATLAB /Simulink برای تحلیل این خودروها به کار برده می شود.

مدل سازی خودرو هیبرید برقی

نیروهای رابطه ی (۵-۲۳) در مقابل نیروی رانشی خودروی در حال حرکت، وجود دارند:

$$mgc_r + \frac{1}{2} \rho c_p AV^2 + ma + mg \sin \theta \quad (۵-۲۳)$$

که به ترتیب از چپ به راست نیروی غلبه بر مقاومت چرخ، نیروی غلبه بر مقاومت هوا، اینرسی جرم خودرو و نیروی غلبه بر شیب هستند.

گشتاور و سرعت زاویه ای مورد نیاز در چرخ های خودرو ناشی از نیروی رانشی به ترتیب به صورت رابطه های (۵-۲۴) و (۵-۲۵) بیان می شود:

^۱ NREL

^۲ DOE

$$T = F_x r_r \quad (۲۴-۵)$$

$$\omega = \frac{V}{r_r} \quad (۲۵-۵)$$

وقتی که m جرم خودرو، θ زاویه‌ی شیب جاده، a شتاب خودرو، A سطح مقطع خودرو، V سرعت خودرو، C_r ضریب مقاومت چرخشی بین چرخ و جاده، C_p ضریب مقاومت هوا و g شتاب ثقل زمین است.

تکالیف فصل پنجم

۱. بررسی پایداری گذرای نیروگاه تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت متشکل از خط HVDC موازی با خط AC که قدرت معادل P_0 را به شبکه تزریق می کند.

(الف) خط HVDC دچار مشکل شود و خط قطع شود. (اتصال کوتاه در وسط خط)

(ب) خط AC دچار مشکل شود و پس از مدتی خط معیوب از مدار خارج شود.

۲. پایداری یکی از شبکه های استاندارد را در حضور عناصر FACTC در نرم افزار PSAT بررسی نمایید.

۳. مدل دینامیکی دو ماشین زیر را در مدهای گفته شده، استخراج کنید.

۱- ماشین سنکرون ۲- ماشین DFIM

۴. پروژه ی PSAT : دیاگرام تک خطی یک کوره ی قوس الکتریکی (Electric Arc Furnace) 80^{MVAR} که از طریق یک باس بار 132^{KV} با سطح اتصال کوتاه 2500^{MVAR} تغذیه می شود را در نظر بگیرید. کوره، هارمونیک و فلیکر در شبکه تولید می کند و SVC مانع تاثیر این ها در شبکه می شود.

در اینجا اندازه و کنترل SVC نصب شده در باس بار 15^{KV} مطرح می شود.

ترانس کوره $15/0.9^{KV}$ و تغییر Tap ترانسفورماتور همواره مقدار ثابتی است و قدرت آن 80^{MVAR} است و مدل بار کوره غیرخطی است.

وقتی کلید k (کلید SVC) باز است، شبیه سازی با PSAT، جریان های فازهای AC، کوره و خازن FC نصب شده در باسی که ترانس کوره در آن نصب شده است را به صورت غیرقابل قبول و در شرایط نامطلوب نشان می دهد.

(الف) با بستن کلید و وارد شدن SVC با توان راکتیو $\pm 64^{MVAR}$ در مدار، نتیجه ی شبیه سازی سیستم هنوز دارای هارمونیک و فلیکر است، اگرچه نتایج بهتر می شود.

(ب) اگر به جای SVC، جبران ساز با توان راکتیو $\pm 32^{MVAR}$ از نوع STATCOM توسط کلید k به سیستم اضافه شود، نتیجه شبیه سازی فاقد هارمونیک و فلیکر است.

از نقطه نظر اقتصادی SVC 1^{KVAR} معادل یک دلار و STATCOM 1^{KVAR} معادل ۲۵ دلار است.

پروژه های پیشنهادی فصل پنجم

۱. افزایش پایداری زاویه ای و ولتاژ شبکه سراسری با جبران سازی خطوط 765^{KV}
۲. طراحی و ساخت خودروی هیبرید برقی - پیل سوختی

فصل ششم : مطالعات دینامیکی عناصر الکترونیک قدرت در سیستم قدرت

با توجه به مدل چند جرم و فنر و سیستم‌های کنترلی نیروگاهی و شبکه، اگر در صورت وجود خازن سری یا TCSC در خط، معادلات از درجه‌ی ۲۷ سیستم تک‌ماشینه را بنویسیم، وقتی جبران‌سازی سری خازن از ۳۰ درصد بیشتر می‌شود، مقادیر ویژه‌ی مربوط به جرم و فنر به سمت محور $j\omega$ می‌رود و علت شکستن شفت توربین-ژنراتور همین می‌باشد.

با طراحی کنترل‌کننده‌ی کلاسیک یا کنترل بهینه می‌توان با این پدیده مقابله کرد. ضمناً در سیستم چند ماشینه هم به همین صورت می‌توان مطالعات را دنبال نمود.

در ادامه، مطالعات دینامیکی عناصر الکترونیک قدرت را در مطالعات دینامیکی سیستم قدرت بررسی می‌کنیم. عناصر الکترونیک قدرت شامل لامپ‌های خلاء، دیود، ترایستور، IGBT، GTO می‌باشد.

۶-۱- انواع جریان‌های الکتریکی

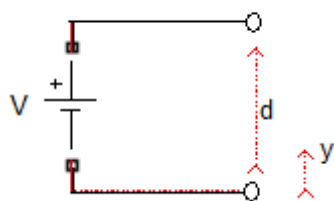
حرکت بار الکتریکی را جریان الکتریکی گویند. از انواع جریان‌های الکتریکی می‌توان به موارد زیر

اشاره نمود:

- (۱) جریان هدایتی^۱: از حرکت رانشی الکترون ها و حفره ها در هادی ها و نیمه هادی ها به وجود می آید.
- (۲) جریان الکترولیتی^۲: از حرکت یون های مثبت و منفی به وجود می آید.
- (۳) جریان انتقالی^۳: از حرکت الکترون ها و یون ها در خلأ به وجود می آید.

۶-۲- دیود خلا

مسئله ۱ : طرح واره ی مداری که یک دیود خلأ با بار فضایی محدود در آن قرار می گیرد در شکل ۶-۱ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱: مدار متصل شده به یک دیود خلأ با بار فضایی محدود

مطلوب است :

۱- $V(y)$, $E(y)$ در ناحیه ی بین دو الکترو

۲- کل بار در ناحیه ی بین دو الکترو

۳- کل بار سطحی روی کاتد و آند

۴- زمان گذر یک الکترون از کاتد به آند به ازای $V_o = 200^V$, $d = 1^{cm}$

پاسخ : طبق معادله ی پواسون نشان داده شده در رابطه ی (۶-۱) و $\rho = 0$ ، معادله ی لاپلاس مطابق رابطه ی (۶-۲) نتیجه می شود.

$$\nabla^2 V = \frac{-\rho}{\epsilon_0} \quad (۶-۱)$$

$$\nabla^2 V = 0 \quad (۶-۲)$$

^۱ Conduction Current

^۲ Electrolytic Current

^۳ Convection Current

۱- قبل از گرم شدن کاتد در فضای بین آند و کاتد، بار وجود ندارد و در نتیجه طبق معادله‌ی لاپلاس داریم:

$$\nabla^2 V = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \Rightarrow V(y) = ay + b$$

با اعمال شرایط مرزی رابطه‌ی زیر را برای ولتاژ داریم:

$$\begin{cases} y=0, V=0 \\ y=d, V=V_0 \end{cases} \Rightarrow V(y) = \frac{V_0}{d} y$$

حال می‌توان شدت میدان الکتریکی را به کمک رابطه‌ی (۳-۶) به دست آورد:

$$E = -\nabla V \quad (3-6)$$

$$\bar{E} = -\frac{\partial V}{\partial y} a_y \rightarrow \bar{E}(y) = -\frac{V_0}{d} \hat{y}$$

۲- تحت میدان الکتریکی چنانچه کاتد که همان ظرف جیوه است گرم شود، الکترون‌ها از کاتد گرم می‌جوشد و با سرعت صفر، کاتد را با توجه به رابطه‌ی $\bar{F} = q\bar{E}$ ترک می‌نمایند.

میدان الکتریکی در کاتد صفر است.

$$E(0) = a_y E_y(0) = -a_y \left. \frac{dV}{dy} \right|_{y=0} = 0$$

و در حالت دائم، چگالی جریان ثابت و مستقل از y است و از رابطه‌ی (۴-۶) به دست می‌آید.

$$j = -\bar{a}_y j = -\bar{a}_y \rho(y) u(y) \quad (4-6)$$

طبق قانون نیوتن $F = ma$ برای سرعت $u = a_y u(y)$ داریم:

$$m \frac{du(y)}{dt} = -eE(y) = e \frac{dV(y)}{dy}$$

$$\text{if : } m \frac{du}{dt} = m \frac{du}{dy} \times \frac{dy}{dt} = m \cdot \frac{du}{dy} \cdot u = \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} mu^2 \right)$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{2} mu^2 \right) = e \frac{dV}{dy} \rightarrow \frac{1}{2} mu^2 = eV \quad \langle \text{when} \rangle \begin{cases} V(0)=0 \\ u(0)=0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow u = \left(\frac{2e}{m} V \right)^{\frac{1}{2}}, u = \sqrt{\frac{2e}{m} V}$$

وقتی که $m = 9.11 \times 10^{-31}$, $-e = 1.6 \times 10^{-19}$ است.

برای یافتن $V(y)$ در ناحیه‌ی بین الکترودها باید معادله‌ی پواسون را در حالی که ρ از رابطه‌ی (۴-۶) به دست می‌آید، محاسبه کرد.

$$\rho(y) = \frac{-j}{u} = -j \sqrt{\frac{m}{2eV}}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2eV(y)}} \rightarrow \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\sqrt{2}j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{e}} V^{\frac{1}{2}} + C$$

$$\begin{cases} y=0 \\ V=0 \end{cases} \rightarrow \frac{dV}{dy} = 0 \rightarrow C = 0$$

$$\Rightarrow V^{-\frac{1}{2}}(y) dV = 2 \frac{j}{\epsilon_0} \left(\frac{m}{2e} \right)^{\frac{1}{2}} dy \xrightarrow{\int_{V=0}^V = \int_0^d} 2V_0^{\frac{1}{2}} = 2 \frac{j}{\epsilon_0} \left(\frac{m}{2e} \right)^{\frac{1}{2}} d$$

$$j = \frac{4\epsilon_0}{9d^2} \sqrt{\frac{2e}{m}} V_0^{\frac{3}{2}} \quad A/m^2$$

که جریان از نوع انتقالی است.

$$\begin{cases} y=0 \\ V=0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V(y) = \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{j}{\epsilon_0} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{m}{2e} \right)^{\frac{1}{3}} y^{\frac{4}{3}} \\ V_0 = \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{j}{\epsilon_0} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{m}{2e} \right)^{\frac{1}{3}} d^{\frac{4}{3}} \end{cases}$$

$$V(y) = V_0 \left(\frac{y}{d} \right)^{\frac{4}{3}} \xrightarrow{E = -\nabla V} E(y) = - \left(\frac{4V_0}{3d} \right) \left(\frac{y}{d} \right)^{\frac{1}{3}}$$

با کم و زیاد کردن V_0 جریان کم و زیاد می‌شود.

در نتیجه می‌توان کل بار بین دو الکترودها را به کمک معادله‌ی پواسون و طبق رابطه‌ی (۵-۶) به دست آورد:

$$Q = \rho_v \times S \times d \quad (۵-۶)$$

$$\nabla^2 V = \frac{\rho_v}{\epsilon_0} \rightarrow \rho_v = -\epsilon_0 \left(\frac{4V_0}{3d} \right)$$

$$Q = -\left(\frac{4V_0}{3d}\right)\epsilon_0 \times S$$

۳- به محاسبه‌ی کل بار سطحی می‌پردازیم که از رابطه‌ی (۶-۶) به دست می‌آید:

$$\rho_{sa} = \epsilon_0 E(d) \quad (۶-۶)$$

$$\rho_{sa} = \epsilon_0 E(0) = \epsilon_0 \left(\frac{4V_0}{3d}\right)(-\bar{a}_y) = 0$$

۴- با توجه به روابط به دست آمده برای سرعت و ولتاژ به محاسبه‌ی زمان گذر یک الکترون از کاتد به آند می‌پردازیم:

$$u = \sqrt{\frac{2eV}{m}}, \quad V = V_0 \left(\frac{y}{d}\right)^{\frac{4}{3}} \Rightarrow u = \left(\frac{2eV_0}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{y}{d}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{dy}{dt} = u = \left(\frac{2eV_0}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{y}{d}\right)^{\frac{2}{3}} \Rightarrow t = \frac{3d}{\sqrt{\frac{2eV_0}{m}}}$$

۳-۶- دیود P-N

چگالی بار الکتریکی را در کتب مختلف با روابط مختلف بیان کرده‌اند که دو رابطه را به عنوان نمونه مطرح می‌کنیم که در رابطه‌ی دوم تغییرات چگالی بار را خطی فرض نموده‌ایم.

$$\rho = 2\rho_0 \operatorname{sech} \frac{x}{a} \tanh \frac{x}{a} \quad (۷-۶)$$

$$\rho = ax \rightarrow -\frac{w}{2} < x < \frac{w}{2} \quad (۸-۶)$$

مسئله‌ی ۲: یک دیود P-N نیمه هادی که در امتداد محور x قرار دارد و در ناحیه‌ی x منفی نیمه هادی نوع P و در ناحیه‌ی x مثبت نیمه هادی نوع n قرار دارد را بررسی می‌کنیم. (تزریق ناخالص پنج ظرفیتی و سه ظرفیتی در سیلیکون مساوی است)

مطلوب است محاسبه‌ی $E(x)$, $V(x)$:

پاسخ: طبق معادله‌ی پواسون داریم:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{ax}{\xi} \rightarrow \frac{dV}{dx} = -\frac{ax^2}{2\xi} + c_1$$

با اعمال شرایط مرزی می توان ثابت c_1 را به دست آوریم:

$$x = \pm \frac{w}{2}, E(x) = 0 \Rightarrow c_1 = \frac{aw^2}{8\xi}$$

$$E = -\nabla V = -\frac{dV}{dx} = \frac{a}{2\xi}x^2 - \frac{aw^2}{8\xi}$$

با انتگرال گیری از رابطه ی E می توان رابطه ی $V(x)$ را به دست آورد.

$$V(x) = -\frac{a}{6\xi}x^3 + \frac{aw^2}{8\xi}x + c_2$$

اگر پتانسیل را در $x=0$ برابر صفر قرار دهیم $c_2=0$ خواهد بود و افت پتانسیل روی پیوند از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$V_j = V\left(+\frac{w}{2}\right) - V\left(-\frac{w}{2}\right) = \frac{aw^3}{12\xi}$$

با داشتن ولتاژ پیوند می توان بار الکتریکی و ظرفیت خازنی لایه ی تهی را از رابطه ی (۹-۶) و (۱۰-۶) به دست آورد:

$$Q = A \int_0^{\frac{w}{2}} \rho dx \quad (9-6)$$

$$C = \frac{dQ}{dV_j} \quad (10-6)$$

$$Q = A \int_0^{\frac{w}{2}} ax dx = A \frac{aw^2}{8}$$

$$C = \frac{dQ}{dw} \times \frac{dw}{dV_j} = \frac{Aaw}{4} \times \frac{4\xi}{aw^2} = \frac{A\xi}{w}$$

با جایگزینی w بر حسب V_j مقدار ظرفیت خازن اتصال^۱ در دیود P-N مطابق رابطه ی زیر به دست می آید:

$$C = A \sqrt{\frac{a\xi^2}{12V_j}}$$

۶-۴-۲- آشنایی با ادوات FACTS

۶-۴-۱- مقدمه

سیستم های قدرت مدرن دارای پیچیدگی بالایی بوده و از آن ها انتظار می رود که در هر جایی از شبکه، افزایش تقاضای برق را با کیفیت توان و هزینه ی قابل قبول پاسخ دهند. با تجدید ساختار شبکه ی قدرت، نایقینی های بسیاری در بهره برداری این سیستم وارد شده است. رگولاتورها محدودیت هایی را برای توسعه ی شبکه ی انتقال ایجاد کرده اند. تمام مسایل گفته شده، حاشیه پایداری سیستم را کاهش داده و خطر خاموشی های زنجیره ای را افزایش می دهند. راه حل این مشکل، انعطاف پذیر کردن سیستم انتقال (و حتی توزیع) است؛ که به وسیله ی ادوات FACTS انجام می شود. این ادوات، بهره برداری منعطف از سیستم را فراهم آورده و فشار ناشی از تغییرات شرایط سیستم (بار، ولتاژ و ...) را کاهش می دهد [۱].

مفهوم "سیستم های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر"^۱ (FACTS)، نخستین بار در سال ۱۹۸۸ میلادی، توسط دکتر ناراین هینگورانی^۲ معرفی شد و در ادامه در سال ۱۹۹۵، دکتر هینگورانی، مفهوم "توان سفارشی" را که در واقع گسترش مفهوم سیستم های انعطاف پذیر به سیستم توزیع بود را نیز معرفی نمود [۱].

۶-۴-۲- شارش توان در سیستم انتقال

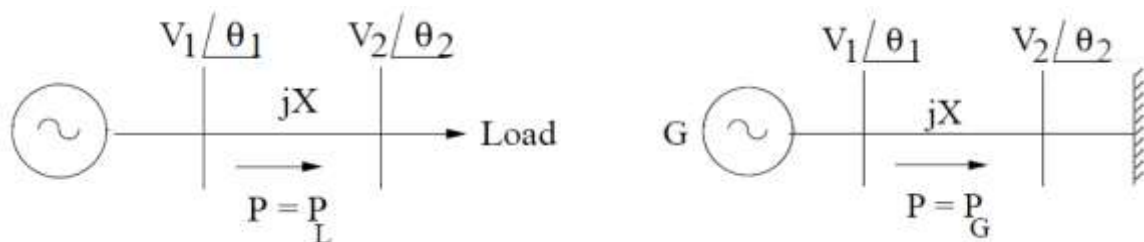
سیستم دو باسه ی ساده ی شکل ۱ را در نظر بگیرید. در این دو شکل توان انتقالی از باس شماره ۱ به باس شماره ۲ از معادله ی زیر محاسبه می شود:

$$P = \frac{V_1}{V_2} \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

تفاوت دو شکل زیر در این است که در شکل (الف)، توان انتقالی را باس اول تعیین می کند و هرچه توان تولید کند، توسط باس بی نهایت مصرف می شود؛ اما در شکل (ب)، توان انتقالی را باس بار تعیین می کند. معمولاً ولتاژ در دو سر خط توسط رگولاتورهای ولتاژ ثابت نگاه داشته می شود و تغییر در میزان انتقال توان، مقدراً اختلاف زاویه بین دو باس را تعیین می کند [۱].

^۱ Flexible AC Transmission Systems

^۲ Narain G. Hingorani



شکل ۴. ژنراتور متصل به الف) باس بینهایت، و ب) باس بار

۶-۴-۲- کنترل شارشی توان در خط انتقال سیستم جریان متناوب

برای افزایش ظرفیت انتقال توان خطوط، حفظ پایداری سیستم در شرایط متفاوت، باید بتوان شارش توان در خطوط انتقال را کنترل کرد. پایداری سیستم می تواند توسط خطاهای مختلف (مانند خروج خط یا ژنراتور، افزایش ناگهانی بار، و ...)، نوسانات فرکانس پایین توان (ناشی از نوسانات روتور ژنراتور)، از دست رفتن سنکرونیسم و فروپاشی ولتاژ ناشی از خطاهای بزرگ، مورد تهدید قرار گیرد. در هر خط انتقال برای توان عبوری (رابطه ی ۱-۱) یک حداکثر وجود دارد. که از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

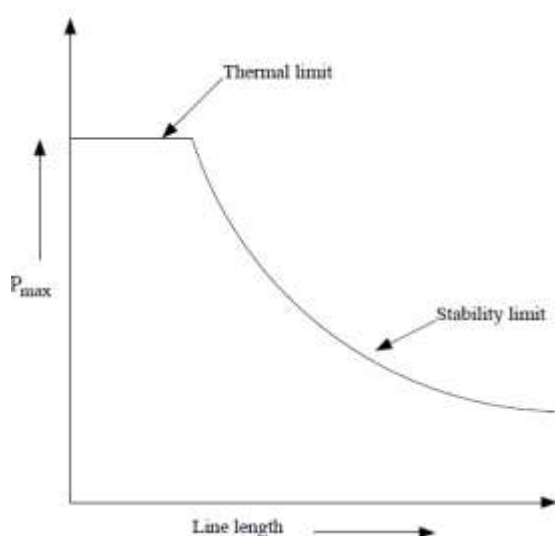
$$P_{max} = \frac{V_1}{V_2} \sin(\theta_{max}) \quad (2)$$

در رابطه ی بالا θ_{max} ، مقداری بین 30° و 40° را دارد؛ که با توجه به حاشیه های پایداری سیستم میزان انعطاف باس ها، تعیین می شود. در خطوط بلند، میزان توان حداکثری که می تواند از خط عبور کند را حاشیه پایداری سیستم تعیین می کند؛ در حالی که در خطوط کوتاه، توان حداکثر را حد حرارتی هادی های خط تعیین می کند. رابطه ی بین توان حداکثر و طول خط در شکل ۳ آمده است.

این مشکل تنها یکی از مشکلاتی است که در شبکه ی انتقال وجود دارد. این مشکل و بسیاری از مشکلات دیگر به وسیله ی حفظ حاشیه پایداری سیستم تخفیف داده می شود. به دلیل مشکلات بسیاری که در توسعه ی شبکه ی انتقال وجود دارد؛ این راه حل به دلایل اقتصادی، زیست محیطی، و رگولاتوری، گزینه ای عملی و مناسب برای حفظ پایداری سیستم نیست. می توان حد پایداری سیستم را با به کارگیری کنترل کننده های دینامیکی سریع مبتنی بر الکترونیک قدرت برای کنترل پخش بار توان های اکتیو و راکتیو، کاهش داد. با به کارگیری این کنترل کننده ها، سیستم های انتقال جریان متناوب، در برابر شرایط متغیری که در بالا به آن ها اشاره شد منعطف می شود. سیستم های انتقال انعطاف پذیر جریان متناوب یا به اختصار، FACTS، سیستم هایی متشکل از تجهیزات استاتیک هستند که نسبت به سیستم های قدیمی کنترل پذیری و قابلیت انتقال توان بیش تری دارند. طبق تعریف انجمن مهندسان برق و الکترونیک^۱ (IEEE)، سیستم انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS) عبارت است از "سیستمی مبتنی بر الکترونیک قدرت و سایر تجهیزات استاتیک که کنترل یک یا تعداد بیشتری از

^۱ Institute of Electrical and Electronics Engineers

سیستم های انتقال انعطاف پذیر را برای افزایش کنترل پذیری و قابلیت انتقال توان آن ها فراهم می آورند [۲].



شکل ۵. توان حداکثر قابل عبور از خط به عنوان تابعی از طول خط

پس برای کنترل یک خط انتقال، لازم است تا پارامترهای اصلی آن را کنترل کرد. این پارامترها عبارتند از:

۱- امپدانس سری

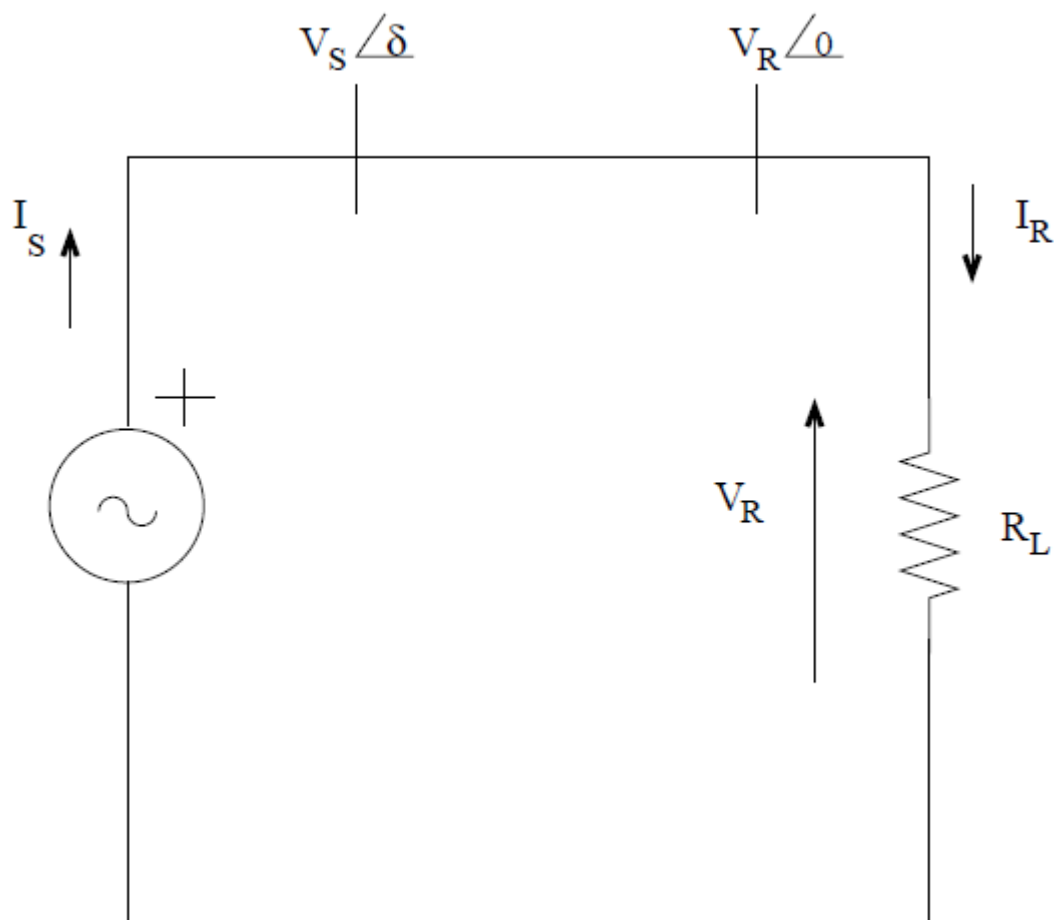
۲- امپدانس موازی

۳- زاویه فاز

که ادوات FACTS، کنترل این پارامترها را میسر می سازند. در ادامه در مورد جبرانسازی توان راکتیو که کلید کنترل ولتاژ و توان در خطوط انتقال است مطالبی را بیان می کنیم.

۶-۳-۴- جبران سازی توان راکتیو در خطوط انتقال جریان متناوب

خط انتقال بلندی را در نظر بگیرید که در یک سمت آن یک ژنراتور، و در سمت دیگر یک بار با ضریب توان واحد قرار گرفته است. برای سادگی فرض می کنیم که سیستم سه فاز متقارن بوده و ولتاژها و جریان های بین سه فاز متعادل هستند؛ لذا می توانیم از مدل تک خطی این سیستم، همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است برای تحلیل استفاده کنیم.



شکل ۶: شمای تک خطی خط انتقال متصل به ژنراتور و بار

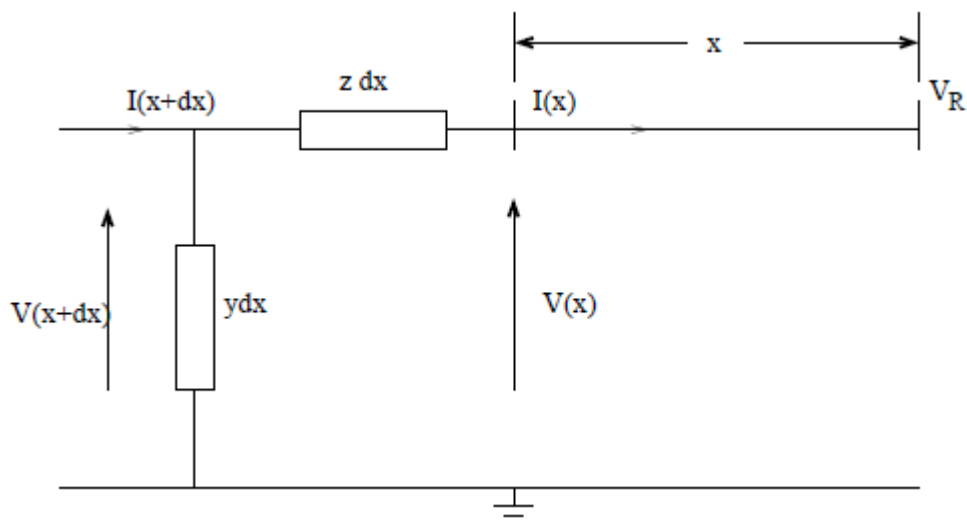
در شکل ۴، اگر عنصر دیفرانسیلی کوچکی از خط، با طول dx را در فاصله x از انتهای خط در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$I(x + dx) = I(x) + ydx.V(x + dx)$$

$$V(x + dx) = V(x) + zdx.I(x)$$

در رابطه های بالا برای پارامترهای فیزیکی خط در واحد طول داریم:

$$x = \omega l \text{ و } b = \omega c \text{ و } z = r + jx \text{ و } y = g + jb$$

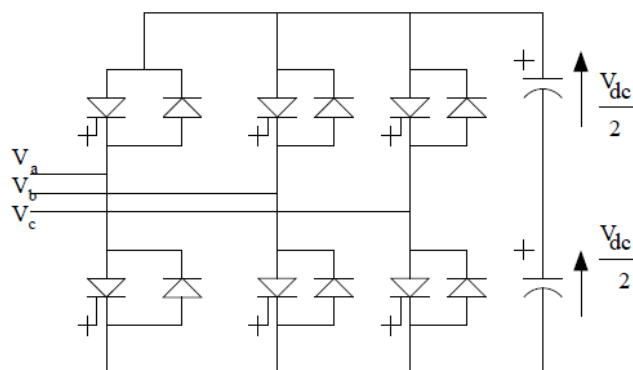


شکل ۷: ولتاژ و جریان در یک خط بلند

در ادامه در خصوص کنترل کننده های مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ صحبت کرده و آن ها را با مبدل های امپدانس متغیر مقایسه می کنیم.

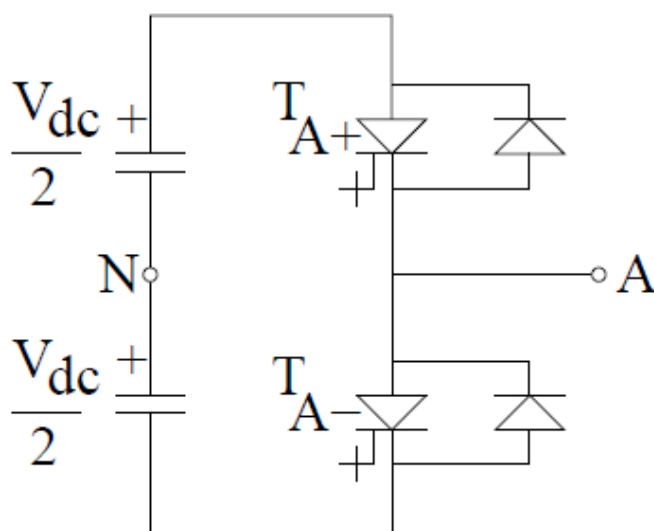
۶-۴-۴- مقدمه ای در مورد کنترل کننده های مبتنی بر مبدل های منبع ولتاژ

شکل ۴ شمایی از یک مبدل منبع ولتاژ را نشان می دهد.



شکل ۸. مبدل منبع ولتاژ سه فاز

شکل بالا شمایی از یک مبدل منبع ولتاژ سه فاز شش پالسه را نمایش می دهد. این مبدل ولتاژ DC خازن ها را به ولتاژ AC سه فاز در خروجی خود تبدیل می کند. برای توضیح بیشتر شکل ۵ را که یکی از فازهای این مبدل را نشان می دهد در نظر بگیرید.



شکل ۹. مبدل تکفاز نیم موج

در این حالت سوییچ های T_{A+} و T_{A-} که می توانند ترستور، IGBT، GTO و ... باشند؛ کلیدهایی قابل کنترل می باشند که می توانند در هر لحظه از زمان روشن (ویا خاموش) شوند. نحوه ی کار کلیدها به گونه ای است که در هر لحظه یکی روشن و دیگری خاموش است. اگر هر کلید در هر سیکل موج فقط یک بار روشن شود؛ کلیدزنی به صورت موج مربعی انجام شده است و مقدار پیک هارمونیک اصلی ولتاژ خروجی (V_{AN1}) از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$V_{AN1} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right)$$

این نحوه از کلیدزنی، هارمونیک های زوج را حذف کرده؛ اما هارمونیک های فرد را در بر دارد که دامنه ی آن ها از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$V_{ANn} = \frac{V_{AN1}}{n} = \frac{\frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right)}{n}, \quad n = 3, 5, 7, \dots \quad (4)$$

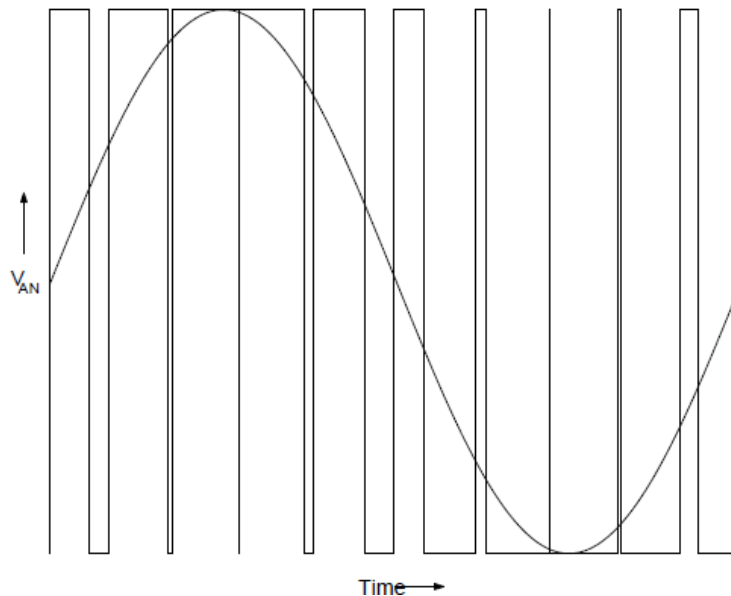
همانطور که مشاهده شد؛ در این نحوه از کلیدزنی، دامنه ی ولتاژ خروجی مستقل از پارامترهای کلیدزنی بوده و قابل کنترل نمی باشد؛ و فقط زاویه فاز ولتاژ قابل کنترل است. می توان نشان داد که اگر از مبدل سه فاز استفاده شود (شکل ۴)؛ هارمونیک های مضارب ۳ (هارمونیک های ۳، ۹، ۱۵، ۲۱ و ...) حذف می شوند؛ و هارمونیک های مضارب $n = 6 \pm 1, n = 1, 2, \dots$ باقی می ماند. همچنین با افزایش تعداد پالس ها از ۶ پالس به دوازده پالس، در فرمول قبل، هارمونیک های مربوط به n های فرد نیز حذف می شوند؛ و فقط هارمونیک های $n = 6 \pm 1, n = 2, 4, \dots$ باقی می ماند.

گفتیم که با این نحوه ی کلیدزنی، دامنه ی ولتاژ خروجی قابل کنترل نیست. راه حل این مسئله، مدولاسیون عرض پالس^۱ (PWM) است. این نوع مدولاسیون، قابلیت کنترل دامنه ی ولتاژ خروجی را دارد و دامنه ی هارمونیک اصلی خروجی آن برابر است با:

^(۱) Pulse Width Modulation

$$V_{AN1} = m \left(\frac{V_{dc}}{2} \right), \quad 0 < m \leq 1$$

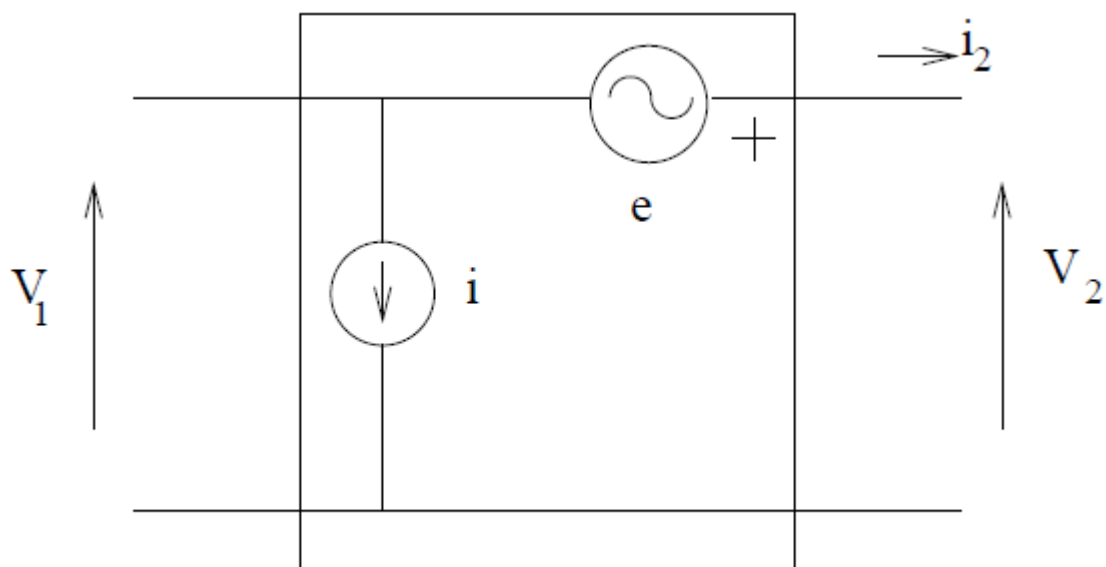
که m ، اندیس مدولاسیون نامیده می شود. حداکثر مقدار m در مدولاسیون بردارهای فضایی (SVM) به دست می آید و برابر $\frac{2}{\sqrt{3}}$ است. روش کار PWM، در شکل ۶ آمده است:



شکل ۱۰. مدولاسیون PWM

۶-۴-۵- مدل عمومی ادوات FACTS

همانطور که گفته شد؛ ادوات FACTS، کنترل یکی یا تعداد بیشتری از سه پارامتر اصلی خط انتقال (امپدانس سری، امپدانس موازی و زاویه فاز) را فراهم می آورند. از این میان UPFC، قابلیت کنترل هر سه پارامتر را دارد. برای بررسی بیشتر، به شکل ۷ توجه کنید.



شکل ۱۱. مدار معادل UPFC

شکل ۷ نمایش دهنده ی مدار معادل تک خطی یک UPFC است. UPFC شامل دو مبدل منبع ولتاژ (VSC) است؛ که یکی از طریق یک ترانسفورماتور سری، ولتاژ e را به خط اضافه کرده و دیگری جریان i را از خط جذب می کند. اگر فازورهای ولتاژ تزریقی و جریان جذب شده را به ترتیب با E و I نمایش دهیم؛ با چشم پوشی از تلفات، خواهیم داشت:

$$Re\{V_1 I^*\} = Re\{E I^*\}$$

$$\bar{I} = (I_p - jI_r)e^{j\theta_1}$$

$$\bar{E} = (V_p + jV_r)e^{j\theta_1}$$

در روابط بالا، θ_1 ، فاز V_1 ، و φ_r ، فاز I_r بوده؛ و اندیس های p و r نشان دهنده ی مولفه های اکتیو و راکتیو متغیر مربوطه است. از معادلات بالا، رابطه ی زیر حاصل می شود:

$$V_1 I_p = I_r V_p \quad (7)$$

در ادوات مختلف FACTS، مولفه های اکتیو و راکتیو E و I ، مقادیر متفاوتی خواهند داشت. در هر یک از این ادوات، برخی از این ۴ متغیر، معادلات محدودیت ها، و بقیه متغیرها، معادلات قابل کنترل بوده؛ که کنترل یک یا تعداد بیشتری از پارامترهای خط را امکان پذیر می سازند. به عنوان مثال در یک جبران ساز استاتیک توان راکتیو (SVC) خواهیم داشت:

$$V_p = 0, \quad V_r = 0, \quad I_p = 0, \quad I_r = -B_{SVC} V_1$$

(۸) که در اینجا، B_{SVC} متغیر کنترلی بوده و سه معادله ی دیگر محدودیت ها را تشکیل می دهند. در جدول ۲، همه ی محدودیت ها و متغیرهای کنترلی برای ادوات مختلف FACTS، آورده شده است.

جدول ۱. محدودیت ها و پارامترهای کنترلی در ادوات مختلف FACTS

کنترل کننده ی FACTS	محدودیت ها	پارامترهای کنترلی
SVC	$V_p=0, V_r=0, I_p=0,$ $I_r = -B_{SVC} V_1$	B_{SVC}
TCSC	$I_p=0, I_r=0, V_p=0,$ $V_r = -X_{TCSC} I_2$	X_{TCSC}
PST (PAR)	$\bar{E} = V_1 (e^{j\varphi} - 1) \approx jV_{10}$	φ
STATCOM	$V_p=0, V_r=0, I_p=0$	I_r
STATCOM به همراه منبع انرژی	$V_p=0, V_r=0$	I_r, I_p
SSSC	$I_p=0, I_r=0, V_p=0,$	V_r
SSSC به همراه منبع انرژی	$I_p=0, I_r=0$	V_r, V_p

در ادامه به معرفی یک به یک ادوات FACTS، که در جدول ۱ آورده شده است؛ می پردازیم.

۵-۶- معرفی انواع ادوات FACTS

۵-۶-۱- مقدمه

در این بخش، ادوات مختلف FACTS، خلاصه وار معرفی شده و ویژگی های مختلف هریک برشمرده می شود.

تعریف کنترل کننده ی FACTS عبارت است از: "یک سیستم مبتنی بر الکترونیک قدرت و سایر تجهیزات استاتیک، که کنترل یک یا تعداد بیشتری از پارامترهای سیستم انتقال جریان متناوب را فراهم می کند." [۱]

کنترل کننده های (ادوات) FACTS به صورت زیر دسته بندی می شوند:

- ۱- کنترل کننده های موازی
- ۲- کنترل کننده های سری
- ۳- کنترل کننده های ترکیبی سری-سری
- ۴- کنترل کننده های ترکیبی موازی-سری

دسته بندی دیگری که برای این کنترل کننده ها به کار می رود به صورت زیر است:

- أ. کنترل کننده های مبتنی بر امپدانس (یا ادمیتانس) متغیر
- ب. کنترل کننده های مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ

انواع مختلف کنترل کننده های هر کدام از این دسته ها در جدول ۱، خلاصه وار آورده شده است.

جدول ۲. انواع مختلف ادوات FACTS استفاده شده در سیستم انتقال

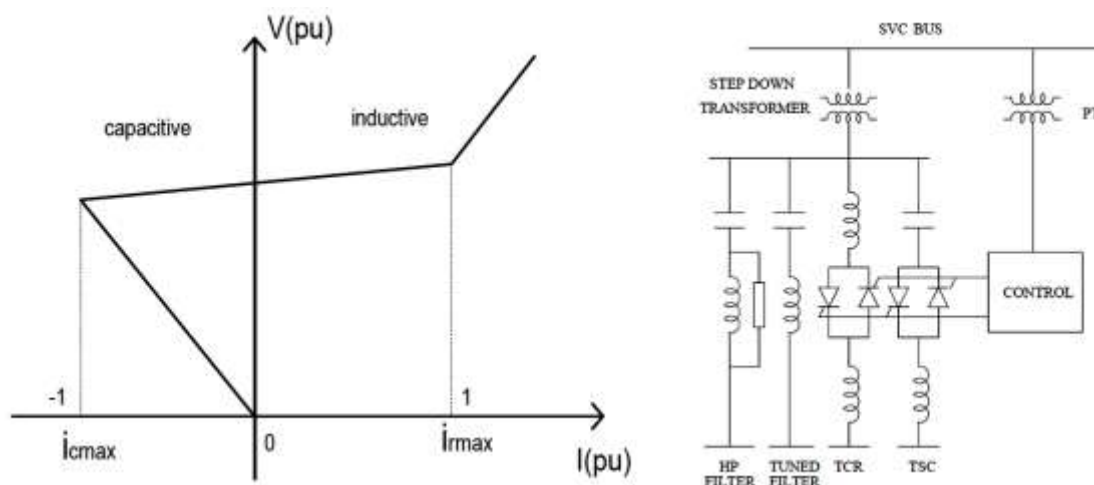
کنترل کننده های امپدانس متغیر	کنترل کننده های مبتنی بر منبع ولتاژ	کنترل کننده های مصارف خاص
جبران ساز استاتیک توان راکتیو (SVC)	جبران ساز سنکرون استاتیک (STATCOM)	مقاومت قطع کنترل شده با تریستور (TCBR)
جبران ساز سری کنترل شده با تریستور (TCSC)	جبران ساز سنکرون استاتیک سری (SSSC)	محدود کننده ی ولتاژ کنترل شده با تریستور (TCVL)
ترانسفورماتور شیف فاز کنترل شده با تریستور (TCPST)	کنترل کننده ی یکپارچه ی شارش توان (UPFC)	تثبیت کننده ی ولتاژ کنترل شده با تریستور (TCVR)

کنترل کننده ی توان بین فاز (IPC)	کنترل کننده ی شارش توان بین خطوط (IPFC)	
میراکننده ی NGH-SSR		

۶-۵-۲- جبران ساز استاتیک توان راکتیو^۱ (SVC)

این جبران ساز، از ادوات قدیمی استفاده شده در خطوط انتقال می باشد. این جبران ساز، به عنوان یک ادمیتانس متغیر قابل کنترل عمل می کند؛ که کنترل ادمیتانس آن از طریق ترستورهای متصل شده به صورت پشت به پشت کنترل می شود.

در ابتدا، SVC برای جبران سازی، بارهای با تغییرات سریع (مانند ذوب آهن، کوره های قوس الکتریکی و ...) به کار می رفت. در خطوط سیستم قدرت از این عنصر برای بهبود پویای ضریب توان، و همچنین متعادل کردن جریان های سمت تولید استفاده می شود. [pady] دقت، دسترس پذیری و پاسخ سریع SVC، در مقایسه با جبرانگرهای موازی قدیمی، آن را به وسیله ای بسیار کارآمد در کنترل ولتاژ حالت گذرا و حالت ماندگار تبدیل نموده است. SVC از جمله جبرانگرهای موازی بوده و همانطور که در شکل ۷ مشخص است؛ می تواند در هر دو حالت سلفی و خازنی (به ترتیب جذب یا تزریق توان راکتیو) عمل کند. [hingo]



شکل ۱۲: جبران کننده ی استاتیک توان راکتیو (SVC) و مشخصه ی ولتاژ-جریان آن

محدوده عملکردی SVC، بین I_{cmax} و I_{rmax} بوده و شیب مشخصه در این محدوده بین ۰.۲٪ تا ۰.۵٪ در نظر گرفته می شود. در جریان های خازنی بزرگتر از I_{cmax} ، این عنصر به یک خازن تبدیل شده و توان راکتیو آن، بصورت تابعی از ولتاژ شبکه تغییر می کند. کاربردهای اصلی SVC عبارتند از: [khuist]

۱. تثبیت ولتاژ

^۱ Static VAR Compensator

۲. افزایش ظرفیت انتقال خطوط

۳. افزایش پایداری دینامیکی

۴. کاهش تلفات انتقال

SVC می تواند از عناصر زیر تشکیل شود:

۱. راکتور کنترل شده با تریستور^۱

۲. خازن سوویچ شده با تریستور^۲

۳. راکتور سوویچ شده با تریستور^۳

۴. خازن سوویچ شده به صورت مکانیکی^۴

در هر آرایش SVC، با کنترل زاویه آتش تریستورها، می توان خازنی یا سلفی بودن SVC، و همچنین مقدار توان راکتیو آن را کنترل کرد.

۶-۵-۲-۱- تحلیل و فرمولاسیون SVC

در بحث ادوات FACTS، مکان یابی در کارایی و موثر بودن عنصر FACTS بسیار مهم است. در حالت ایده-آل عنصر FACTS در مرکز الکتریکی سیستم قرار می گیرد. به عنوان مثال، یک خط انتقال بی اتلاف، مانند آنچه در شکل ۱۰ آمده است را در نظر بگیرید. ولتاژ مرکز الکتریکی این سیستم (در اینجا وسط خط) توسط رابطه ی زیر توصیف می شود:

$$V_{mo} = \frac{V \cos(\delta/2)}{\cos(\theta/2)}$$

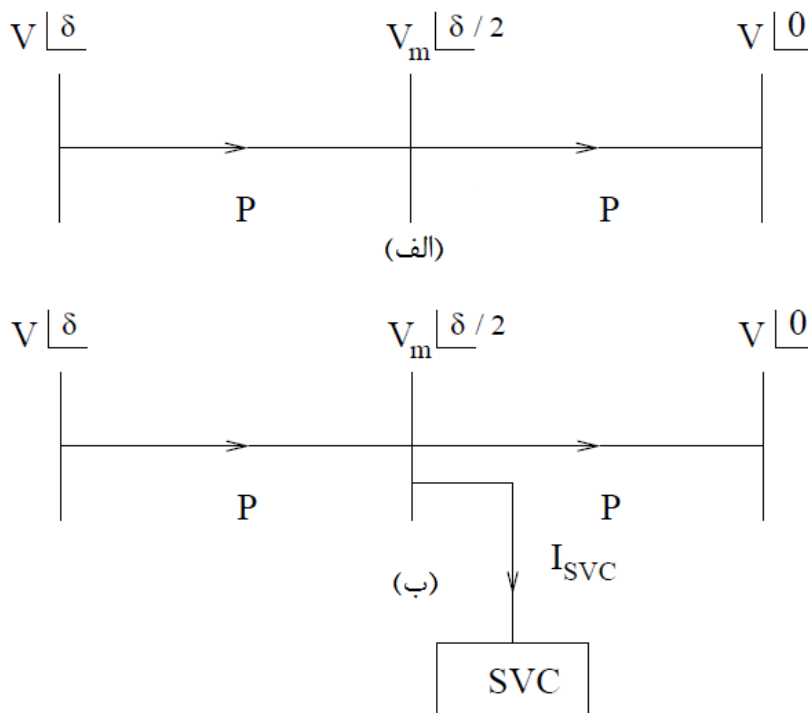
که در این رابطه، $\theta = \beta L$ که β برابر ثابت فاز بوده و از رابطه ی $\beta = \omega \sqrt{LC}$ به دست می آید. L طول خط، C ظرفیت خازنی واحد طول خط، l اندوکتانس واحد طول خط، ω فرکانس زاویه ای کاری سیستم و در انتها θ نیز طول الکتریکی خط نامیده می شود.

^۱ Thyristor-controlled Reactor

^۲ Thyristor-switched Capacitor

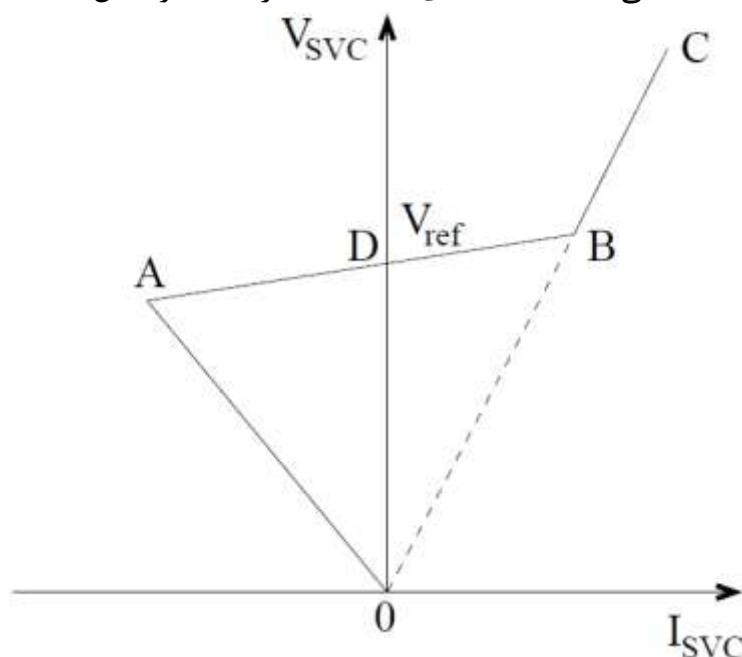
^۳ Thyristor-switched reactor

^۴ Mechanically-switched Capacitor



شکل ۱۳: خط انتقال بی اتلاف (الف) بدون SVC و (ب) به همراه SVC

تغییرات ولتاژ در وسط خط ماکزیمم است. SVC این تغییرات را محدود می کند و در اینجا بهترین مکان برای نصب SVC وسط خط می باشد. مشخصه ی حالت ماندگار SVC در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: مشخصه ولتاژ-جریان SVC

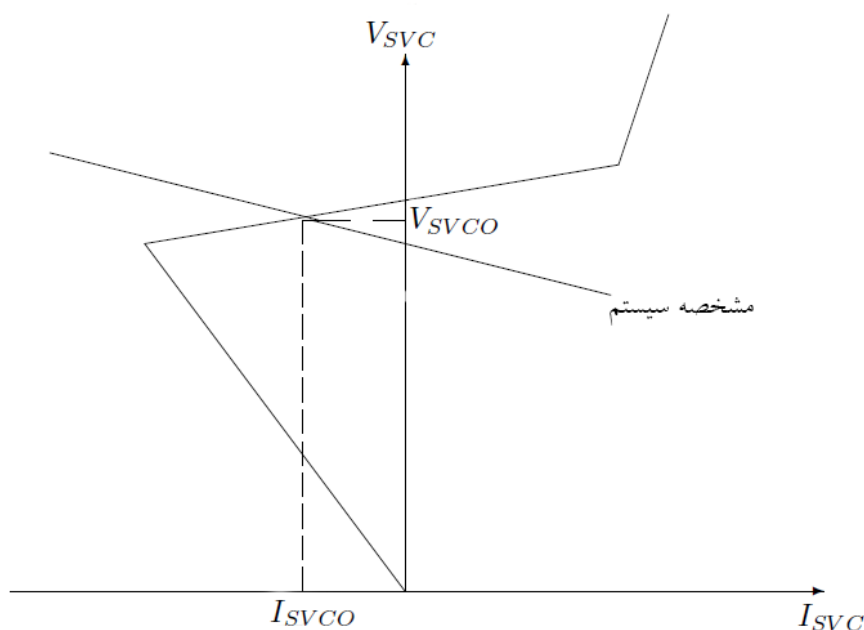
قسمت ADB محدوده ی کنترل SVC بوده و شیب آن در حدود ۱٪ تا ۵٪ است. شیب این قسمت طوری تنظیم می شود تا از رسیدن مکرر SVC به محدودیت های خازنی و سلفی خود جلوگیری کند و همچنین کارکرد چند SVC در باس مشابه و یا باس های مجاور ممکن شود. در قسمت OA، SVC به حد

خازن خود رسیده و در قسمت BC نیز SVC به حد سلفی خود رسیده است. جریان SVC از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$I_{SVC} = -B_{SVC} V_{SVC} \quad (1)$$

در رابطه ی بالا، B سوسپتانس SVC است. دقت شود که در حالت سلفی جریان کشیده شده توسط SVC مثبت و در حالت خازنی این جریان منفی است. مشخصه ی سیستم نیز در باس وسط خط نیز از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$V_{SVC} = V_{Th} - X_{Th} I_{SVC} \quad (2)$$



شکل ۱۵: به دست آوردن نقطه کار SVC

ولتاژ باسی که SVC به آن متصل است از برخورد دو مشخصه ی بالا محاسبه می شود. V_{Th} و V_{Th} ولتاژ و راکتانس تونن دیده شده از باس SVC هستند و از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$V_{Th} = V_{mo} = \frac{V \cos(\delta/\gamma)}{\cos(\theta/\gamma)} \quad (3)$$

$$X_{Th} = \frac{Z_c}{\gamma} \tan(\theta/\gamma) \quad (4)$$

در رابطه ی بالا Z_c امپدانس مشخصه ی خط بوده و برابر $Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}}$ می باشد.

پارامتر دیگری که در SVC مطرح می شود، محدوده کنترلی SVC است. این پارامتر به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_{SVC} = V_{ref} + X_s I_{SVC} \quad (5)$$

از معادلات (۲) و (۵) خواهیم داشت:

$$V_{SVC} = V_m = \frac{V_{Th} X_s}{X_s + X_{Th}} + \frac{V_{ref} X_{Th}}{X_s + X_{Th}} \quad (6)$$

و شارش توان در خط از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$P = \frac{V_m V \sin(\delta/\gamma)}{Z_n \sin(\theta/\gamma)} \quad (7)$$

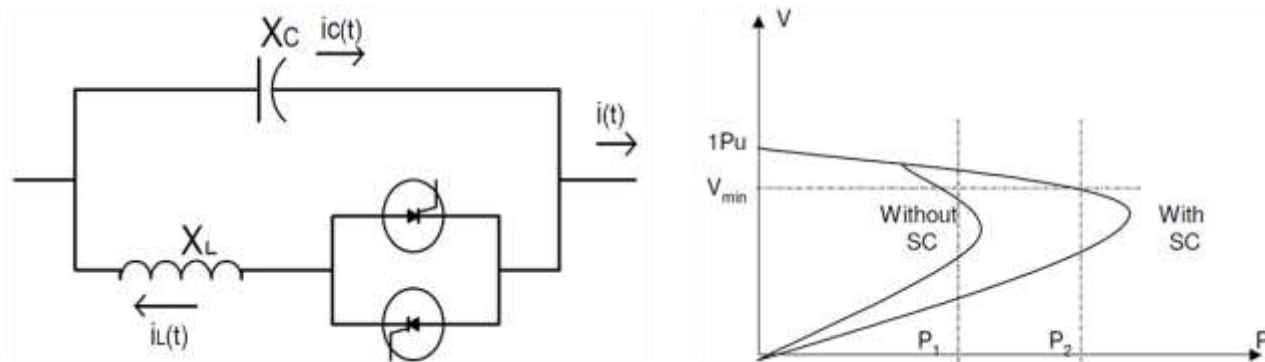
۶-۵-۳- خازن سری کنترل شده با تریستور^۱ (TCSC)

این عنصر از یک خازن ثابت، به همراه یک راکتور کنترل شده با تریستور تشکیل شده است. دلیل استفاده از راکتور به جای خازن در شاخه ی کنترل شده با شیر تریستوری^۲، ممکن ساختن جبران سازی سریع و پیوسته می باشد. در خطوط انتقال بلند، همانگونه که در فصل اول گفته شد؛ در حالت بدون جبران سازی، به دلیل راکتانس بالای خط، افزایش در توان انتقالی ممکن است سبب ناپایداری شود. در چنین شرایطی می توان به کمک TCSC، با کاهش راکتانس خط از این مشکل جلوگیری کرده و حاشیه پایداری خط را افزایش داد. این مطلب در شکل ۸-ب نشان داده شده است. همچنین با این کار تلفات انتقال نیز کاهش می یابد. این عنصر در شکل ۸ نشان داده شده است. [۱]

خازن سری اقتصادی ترین راه حل برای کنترل توان در خطوط است؛ اما بهره برداران به دلیل مشکل نوسانات زیرسنگرون^۳ (SSR)، از استفاده از این عناصر پرهیز می کنند. خازن های موازی این مشکل را ندارند؛ اما مشکلی که در خازن های موازی وجود دارد، وابستگی زیاد کارایی آن ها به مکان نصب اسن عناصر است. حتی در صورتی که خازن موازی در مرکز الکتریکی خط نصب شود نیز برای افزایش ظرفیت انتقال خط، به ظرفیت نامی بسیار بیشتری در خازن موازی، نسبت به خازن سری نیاز است. نسبت ظرفیت در دو حالت سری و موازی از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\frac{Q_{se}}{Q_{sh}} = \tan^2 \left(\frac{\delta_{max}}{2} \right) \quad (۸)$$

Q_{sh} و Q_{se} به ترتیب ظرفیت خازن های سری و موازی هستند. δ_{max} بیشینه زاویه خط (اختلاف زاویه دو ابتدا و انتهای خط) است که معمولا مقداری بین ۳۰ تا ۴۰ درجه دارد. طبق رابطه ی بالا، مقدار Q_{se} حدود ۷٪ تا ۱۳٪ Q_{sh} است. خازن های سری از خازن های موازی گران تر هستند؛ اما با توجه به نسبت ظرفیت ها برای افزایش مقدار یکسان ظرفیت خط، خازن های سری در مجموع اقتصادی تر می باشند. همچنین محل نصب آن ها نیز به اندازه ی خازن های موازی مهم نیست.



شکل ۱۶: خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC)

^۱ Thyristor-Controlled Series Capacitor

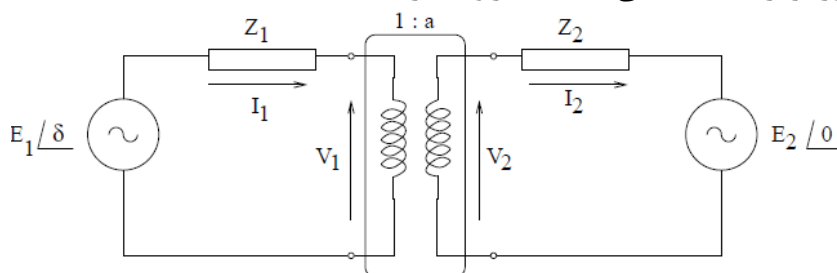
^۲ Thyristor valve

۶-۵-۴- ترانسفورماتور استاتیک شیف فاز^۱ (SPST)

۶-۵-۴-۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای شیف فاز (PST) از سال ۱۹۳۰ به منظور کنترل شارش توان در خطوط انتقال مورد استفاده قرار گرفته اند. کاربرد اصلی این ادوات کنترل شارش توان در حلقه و اطمینان از شارش توان در مسیر قید شده در قراردادهاست. این ادوات برای افزایش ظرفیت خطوط استفاده نمی شوند و به همین دلیل در خطوط بلند از آن ها استفاده نمی شود. با استفاده از کنترل کننده های مبتنی بر الکترونیک قدرت، می توان از آن ها برای تنظیم پویای شارش توان و تقویت پایداری دینامیکی استفاده کرد. در این صورت به چنین عناصری اصطلاحاً، ترانسفورماتورهای استاتیک شیف فاز گفته می شود. نام دیگری که برای چنین عناصری استفاده می شود، تنظیم کننده ی زاویه فاز کنترل شده با تریستور (TCPAR) می باشد.

برای تشریح کار ترانسفورماتور شیف فاز، به شکل ۱۴ توجه نمایید. این شکل یک ترانسفورماتور شیف فاز ایده آل را نشان می دهد که در دو طرف آن دو شبکه معادل تونن نشان داده شده است. نسبت تبدیل این ترانسفورماتور برابر $a = e^{j\varphi}$ می باشد (φ زاویه فاز است)



شکل ۱۷: ترانسفورماتور شیف فاز متصل به یک شبکه

در شکل ۱۴ معادلات زیر برقرار است:

$$V_r = aV_1, \quad I_1 = a^* I_r = e^{-j\varphi} I_r \quad (9)$$

$$V_1 I_1^* = V_r I_r^* \quad (10)$$

$$I_r = \frac{V_r - E_r}{Z_r} \quad (11)$$

از معادله ی ۹، معادله ی ۱۲ به دست می آید:

$$I_1 = \frac{a^*(aV_1 - E_r)}{Z_r} = \frac{V_1 - a^* E_r}{Z_r} \quad (12)$$

اگر از تلفات شبکه های معادل صرف نظر کنیم خواهیم داشت:

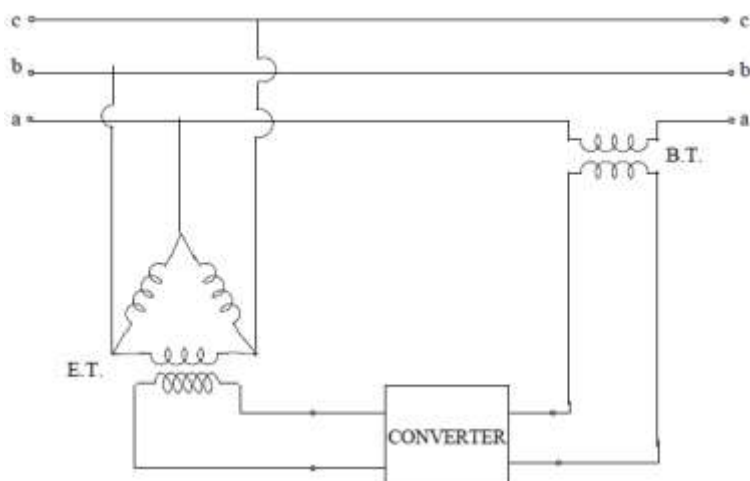
$$Z_1 = jx_1, \quad Z_r = jx_r \quad (13)$$

و در نتیجه رابطه ی شارش توان در این شبکه به صورت زیر خواهد بود:

^۱ Static Phase-Shifting Transformer

$$I_1 = \frac{E_1 E_r \sin(\delta + \phi)}{x_1 + x_r} \quad (14)$$

پارامتر قابل کنترل در اینجا، ϕ می باشد که در بازه ی $\phi_{min} < \phi < \phi_{max}$ قابل تغییر است. این بازه به مقادیر نامی PST وابسته است. در شکل ۱۵ شمای کامل یک ترانسفورماتور استاتیک شیفت فاز (SPST) نشان داده شده است.



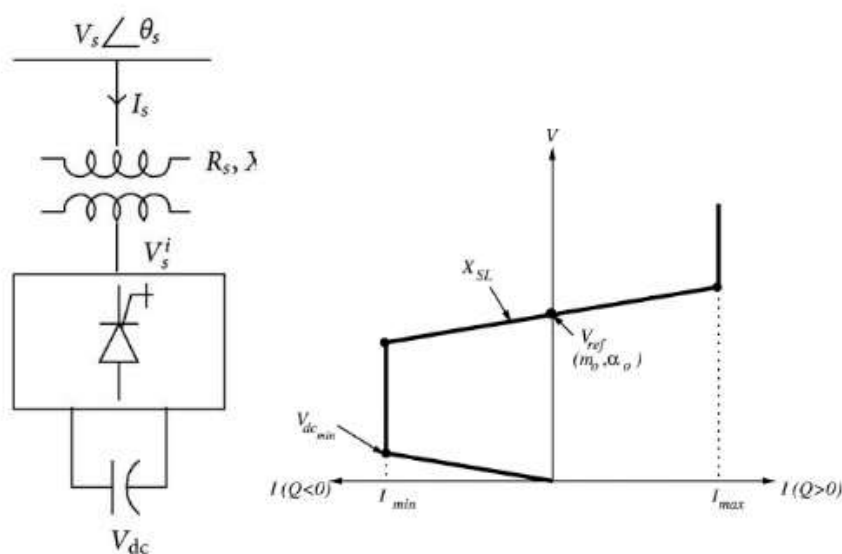
شکل ۱۸: شمای PST

۶-۵-۵- جبران ساز سنکرون استاتیک^۱ (STATCOM)

STATCOM، یکی از ادوات مدرن FACTS می باشد؛ که از دسته ی کنترل کننده های مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ^۲ (VSC) می باشد. STATCOM از یک خازن ثابت تشکیل شده که ولتاژ آن توسط یک مبدل منبع ولتاژ به ولتاژ متناوب (AC) تبدیل شده و این مجموعه از طریق یک ترانس که به آن ترانس کوپلینگ اطلاق می شود به طور موازی به شبکه متصل می شود (شکل ۹).

^۱ Static Synchronous Compensator

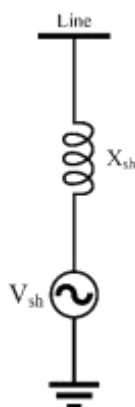
^۲ Voltage Source Converter



شکل ۱۹: جبران کننده ی سنکرون استاتیک (STATCOM) به همراه مشخصه ی ولتاژ-جریان آن

در کنترل STATCOM از مدولاسیون پهنای پالس (PWM) بهره برده می شود؛ که در فصل اول در مورد آن توضیح داده شده است. از آنجایی که عناصر نیمه هادی درون مبدل منبع ولتاژ با فرکانس بالا کلیدزنی می شوند؛ باید از عناصری استفاده شود که تلفات بسیار پایینی داشته باشند. از این رو در STATCOM از ترستورهای با قابلیت خاموش کردن گیت (GTO)، و یا ترانزیستور دوقطبی با گیت عایق شده^۱ (IGBT) استفاده می شود. [۱]

STATCOM می تواند با یک منبع ولتاژ AC متغیر مدل شود. این مدار معادل در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۲۰: مدار معادل یک STATCOM متصل شده به خط انتقال

^۱ Insulated-gate bipolar transistor

این عنصر در سیستم، مانند یک منبع ولتاژ کنترل شده عمل می کند؛ و به همین دلیل عملکرد بهتری نسبت به SVC، که به عنوان یک ادمیتانس متغیر عمل می کند؛ از خود نشان می دهد. برتری های STATCOM، نسبت به SVC عبارتند از: [۱]

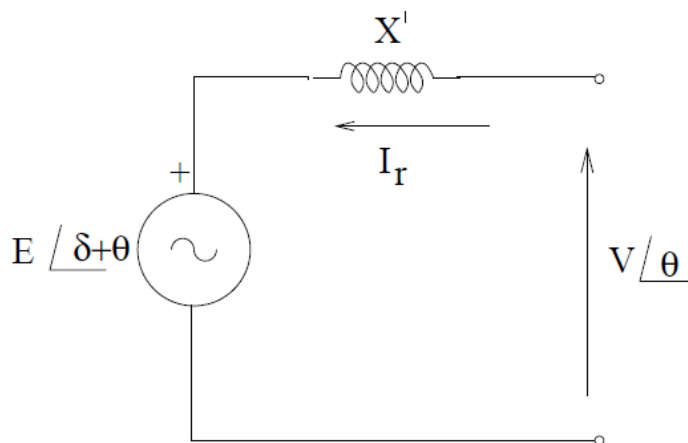
۱. پاسخ سریع تر
۲. حجم کمتر (به دلیل حذف قسمت های بزرگ، مانند راکتورها)
۳. قابل جابجایی و مقیاس پذیر (مدولار)
۴. قابلیت استفاده از منابع توان اکتیو برای تبادل آن با شبکه و یا تامین تلفات داخلی عنصر FACTS
۵. عملکرد بسیار خوب در ولتاژهای پایین (به دلیل مستقل بودن جریان راکتیو عنصر از ولتاژ شبکه در حالی که در SVC، این گونه نیست (این مطلب در شکل ۹-ب مشخص است).

۶-۵-۵-۱- تحلیل و فرمولاسیون STATCOM:

اساس کار STATCOM بسیار شبیه به کندانسور سنکرون است که می تواند ولتاژ باس متصل به آن را با تغذیه یا مصرف توان راکتیو تنظیم کند. مدار معادل کندانسور سنکرون در شکل ۱۸ آمده است. در این شکل یک منبع ولتاژ ac متغیر (E) وجود دارد که دامنه ی آن توسط جریان میدان کندانسور قابل کنترل است. اگر از تلفات چشم پوشی کنیم، اختلاف زاویه بین ولتاژ تولیدی (E) و ولتاژ باس (V) را می توان صفر در نظر گرفت. با تغییر دامنه ی E جریان راکتیو تزریقی توسط کندانسور قابل کنترل است. اگر $E=V$ باشد، این جریان صفر است. اگر $E>V$ باشد، نقش خازنی و در صورتی که $E<V$ باشد نقش سلفی خواهد داشت. جریان راکتیو در کندانسور برابر است با:

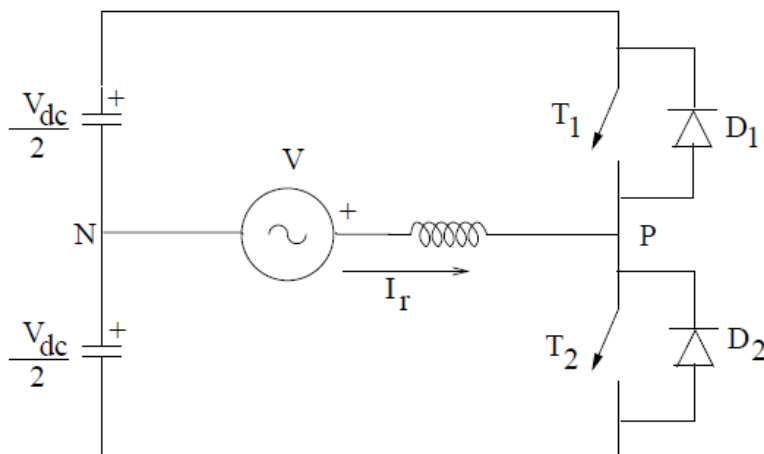
$$I_r = \frac{V-E}{X'} \quad (14)$$

در رابطه ی بالا، δ صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۱: مدار معادل کندانسور سنکرون

شکل ۱۹ مدار معادل یک STATCOM تک فاز را نشان می دهد. STATCOM نیز مدار معادلی شبیه کندانسور سنکرون دارد (به کندانسور سنکرون STATCON نیز گفته می شود). ولتاژ AC از طریق یک خازن به ولتاژ DC مرتبط است.



شکل ۲۲: مدار معادل یک STATCOM تکفاز

گاهها در سمت DC، یک منبع انرژی مانند باتری وجود دارد. در این صورت می توان ولتاژ DC یعنی V_{dc} را در مقدار ثابتی نگاه داشت. کلیدهای T_1 و T_2 (IGBT، GTO یا ...) که دارای کموتاسیون خودی هستند در یک دوره ی زمانی یک بار روشن و خاموش می شوند. سهم هدایت هر کلید، 180° درجه می باشد. نکته ای که در اینجا باید بدان دقت شود آن است که این زمانی که یکی از این دو کلید روشن است دیگری خاموش باشد. دیودهای D_1 و D_2 هدایت جریان در جهت معکوس را میسر می سازند. بار روی خازن ها باعث بایاس شدن دیود ها در جهت معکوس می شود. ولتاژ V_{PN} در حالت های مختلف کلید ها به صورت زیر است:

$$T_1 \text{ is on \& } T_2 \text{ is off} \gg V_{PN} = \frac{V_{dc}}{r} \quad (15)$$

$$T_1 \text{ is off \& } T_2 \text{ is on} \gg V_{PN} = -\frac{V_{dc}}{r} \quad (16)$$

ولتاژ تغذیه ی V فرکانس ω دارد. در این صورت مقدار rms مولفه اصلی ولتاژ عبارتست از:

$$E_1 = \frac{\sqrt{r}}{\pi} \int_0^\pi \frac{V_{dc}}{r} \sin \theta d\theta = \frac{\sqrt{r}}{\pi} V_{dc} \quad (17)$$

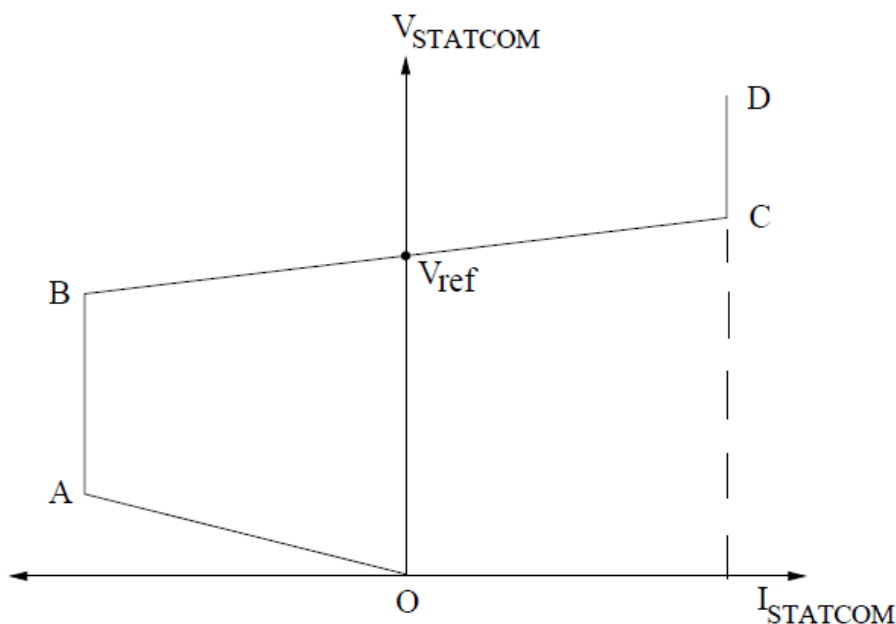
مانند مطلبی که در مورد کندانسور سنکرون بیان شد، اگر $E_1 > V$ باشد STATCOM جریان خازنی می کشد؛ و اگر $E_1 < V$ باشد جریان سلفی کشیده می شود.

در لحظه ای که T_1 روشن است، جریان I_r سلفی است و جریان شارش شده در مدار از آنجایی که یک جریان پسفاز است، منفی است (I_r). جریان شارش شده در کلید T_1 (i_{T1}) برابر $-I_r$ است. پس از 90° درجه

i_{T1} برابر صفر شده و I_r از صفر عبور کرده و مثبت می شود و دیود ۱ هدایت می کند. برای روشن و خاموش شدن T_2 نیز تحلیل مشابهی برقرار است. حال حالت عملکرد خازنی را بررسی می کنیم. در این حالت I_r در حین روشن شدن T_1 مثبت است و این جریان از دیود ۱ عبود می کند. ۹۰ درجه بعد جهت جریان معکوس شده و این بار از طریق کلید ۱ (T_1) عبور می کند. در زمان خاموش شدن کلید ۱ جریان در پیک خود قرار دارد. به همین دلیل در حالت خازنی STATCOM به کلیدهای با کموتاسیون خودی نیاز است مانند GTO ها، IGBT ها و ... نیاز است. در مقایسه با کندانسور سنکرون، ولتاژ خروجی STATCOM دارای هارمونیک های زیادی است که باید به منظور عملکرد کارا و موثر STATCOM این هارمونیک ها حذف شود. در مقابل STATCOM مزایای زیادی نسبت به کندانسور سنکرون دارد. این مزیت ها عبارتند از:

۱. پاسخگویی بسیار سریع تر، در مقایسه با کندانسور سنکرون با تغییر در شرایط کاری سیستم
۲. STATCOM در جریان اتصال کوتاه دخیل نمی شود
۳. STATCOM رفتار مقارنی بین حالت های پسفاز و پیشفاز از خود نشان می دهد
۴. قسمت های متحرک ندارد و در نتیجه تعمیر و نگهداری آن ساده تر است
۵. مشکل از دست رفتن سنکرونیزم در STATCOM وجود ندارد

در شکل ۲۰ مشخصه ی حالت ماندگار STATCOM کشیده شده است. در این شکل جریان STATCOM کاملاً راکتیو در نظر گرفته شده و از تلفات آن صرفنظر شده است. شیب قسمت BC در این مشخصه طوری تنظیم می شود تا STATCOM مکرراً به محدودیت های سلفی و خازنی خود نرسد. نکته ی دیگر اینکه باید این شیب به گونه ای انتخاب شود که عملیات موازی چند STATCOM فراهم شود. V_{ref} ولتاژ متناظر با جریان صفر است و STATCOM اغلب حول این نقطه بهره برداری می شود.



شکل ۲۳: مشخصه ی ولتاژ-جریان STATCOM

۶-۵-۶- جبران ساز سنکرون استاتیک سری^۱ (SSSC)

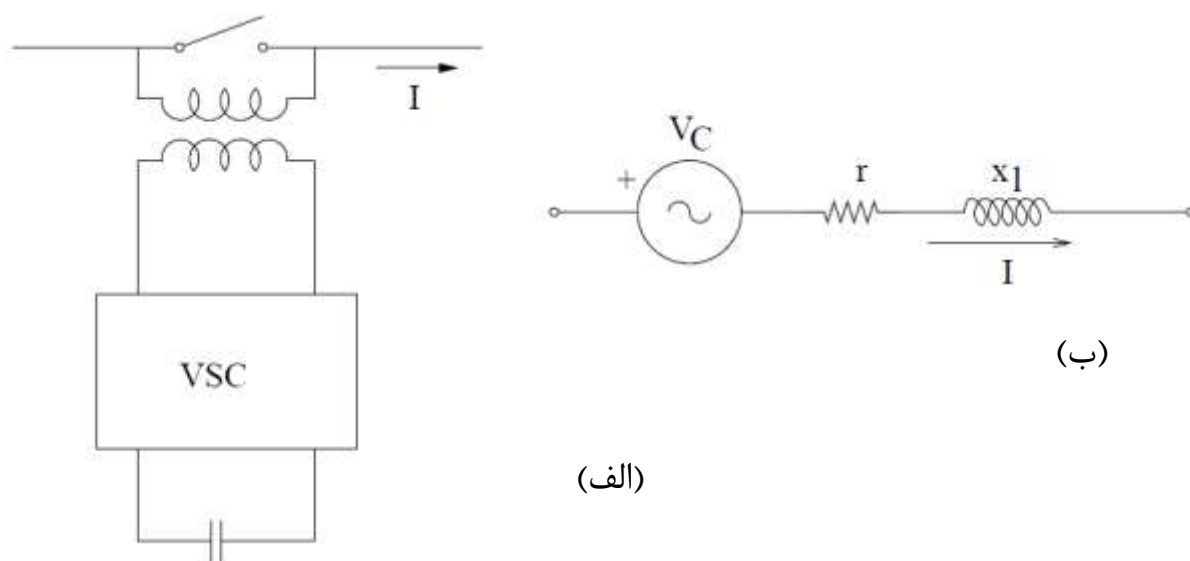
ساختار داخلی این عنصر، همانند STATCOM بوده و تفاوت این دو در نحوه ی اتصال با شبکه است. SSSC به صورت سری با شبکه متصل می شود. SSSC نیز مانند STATCOM یک عنصر مدرن FACTS می باشد؛ که مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ است. به لحاظ سری بودن این عنصر با شبکه، می توان این عنصر را با TCSC مقایسه کرد. نتایج این مقایسه نیز موید برتری SSSC است. برتری های این عنصر نسبت به TCSC، در زیر آورده شده اند: [۱]

۱. حذف عناصر بزرگ مانند راکتورها و خازن ها
۲. بهبود مشخصه های فنی
۳. قابلیت متقارن (مشخصه مشابه در هر دو حالت خازنی و سلفی)
۴. قابلیت استفاده از منابع توان اکتیو برای تبادل آن با شبکه و یا تامین تلفات داخلی عنصر

FACTS

SSSC می تواند به صورت مجزا و یا به عنوان بخشی از UPFC یا CSC به کار گرفته شود؛ که این عناصر در ادامه معرفی خواهند شد. شکل ۱۰ SSSC را به همراه مدار معادل آن نشان می دهد.

^۱ Static Synchronous Series Compensator



شکل ۲۴: جبران کننده ی سنکرون استاتیک سری به همراه مدار معادل آن

حال به بررسی و تحلیل کارکرد SSSC می پردازیم. در شکل ۲۱-ب مدار معادل SSSC نشان داده شده است. اندازه ی V_c را می توان به منظور کنترل شارش توان کنترل کرد. اگر هیچ منبع انرژی در سمت DC نباشد، و با در نظر گرفتن تعادل توان و همچنین چشم پوشی از تلفات مبدل به معادله ی زیر می رسیم:

$$\text{Re}\{V_c I^*\} = 0 \quad (16)$$

اگر ولتاژ V_c ۹۰ درجه از جریان عقب تر باشد، محدوده کاری خازنی است و اندازه جریان خط افزایش یافته و به دنبال آن شارش توان افزایش می یابد. از طرفی دیگر اگر V_c ۹۰ درجه جلوتر از I باشد، محدوده عملکردی سلفی است و جریان خط کاهش می یابد و در نتیجه شارش توان کاهش می یابد.

در تحلیل بالا از تلفات صرف نظر شده است. اما باید توجه داشت که همیشه تلفات وجود دارد و لذا اختلاف فاز بین جریان I و ولتاژ V_c در عمل کمتر از ۹۰ درجه است. در حالت کلی معادلات زیر را داریم:

$$\bar{V}_c = V_c (\cos \gamma - j \sin \gamma) e^{j\varphi} = (V_{cp} - jV_{cr}) e^{j\varphi} \quad (16)$$

در این رابطه، φ زاویه فاز جریان خط و γ نیز میزان پسفازی ولتاژ V_c نسبت به جریان I است. V_{cp} و jV_{cr} مولفه های اکتیو و راکتیو ولتاژ V_c هستند. در اینجا قرارداد می کنیم که ولتاژ پسفاز نسبت به جریان مثبت است. با توجه به این قرارداد ولتاژ مثبت متنظر با کارکرد خازنی SSSC و ولتاژ منفی متنظر با کارکرد سلفی آن است. همانطور که قبلا نیز ذکر شد؛ اندازه ی γ مقداری نزدیک ۹۰ درجه دارد. در نتیجه می توان نوشت:

$$\gamma = \text{sign}(V_{cr}) * [-90^\circ + \alpha^\circ] \quad (16)$$

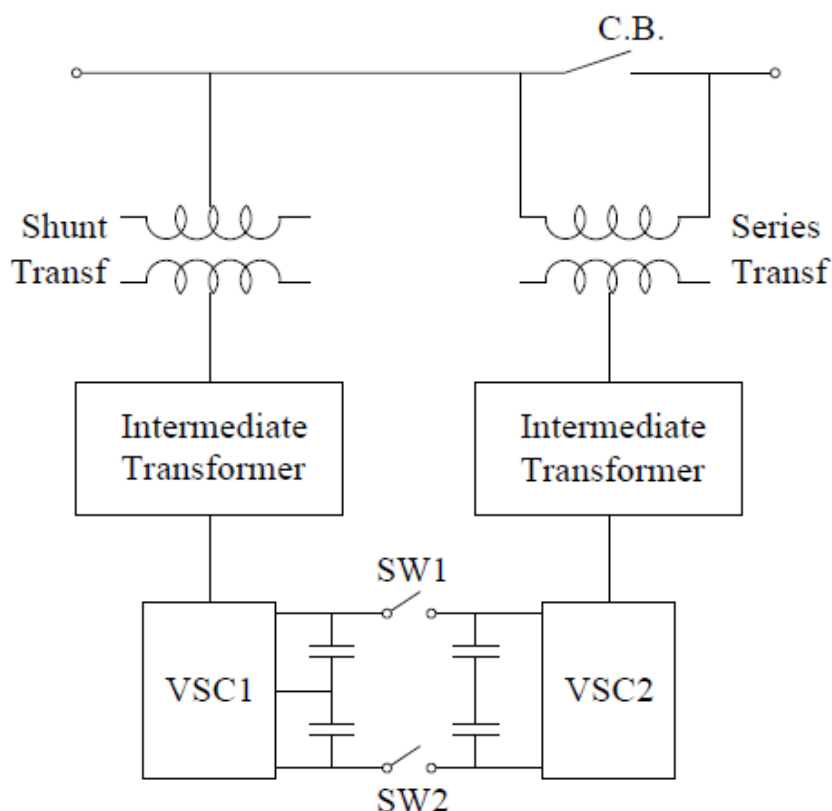
که در اینجا $sign(.)$ تابع علامت است. از معادلات (۱۵) و (۱۶) نتیجه می شود که:

$$V_{Cr} = V_C \cos \alpha, \quad V_{Cp} = V_C \sin \alpha \quad (16)$$

تلفات SSSC بسیار پایین است و لذا اندازه ی V_{Cp} بسیار کوچک است و می توان از آن برای سادگی محاسبات چشم پوشی نمود. در حالت های گذرا این ولتاژ تغییر می کند و در نتیجه ولتاژ پیوند DC در این شرایط متغیر خواهد بود.

۶-۵-۷- کنترل کننده ی یکپارچه ی شارش توان^۱ (UPFC)

این کنترل کننده که فراگیرترین کنترل کننده در تثبیت ولتاژ و شارش توان در خطوط انتقال است که توسط لازلو گیوگی^۲ معرفی شده است [pdy8.1]. این کنترل کننده از دو مبدل منبع ولتاژ تشکیل شده است؛ که با یک خازن، از طریق یک پیوند DC، به هم متصل شده اند. یکی از مبدل ها به صورت سری و دیگری به صورت موازی به شبکه متصل می شود (شکل ۱۱). در واقع می توان UPFC را مانند یک STATCOM و یک SSSC در نظر گرفت که با یک خازن مشترک به هم متصل شده اند.



شکل ۲۵: کنترل کننده ی یکپارچه ی شارش توان (UPFC)

^۱ Unified Power Flow Controller

^۲ Laszlo Gyugyi

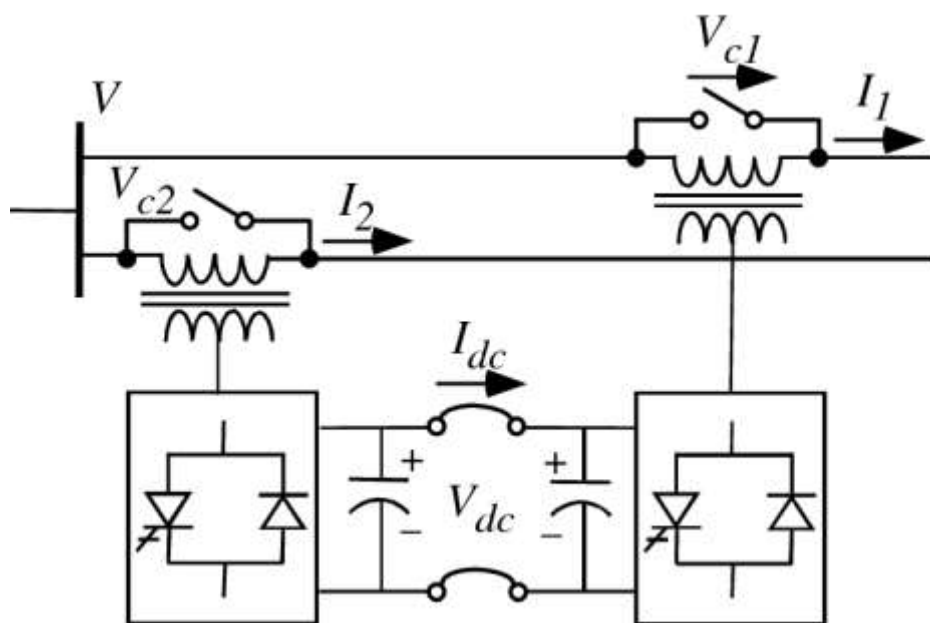
به شکل ۱۱ توجه کنید. در این شکل که شمای کلی یک UPFC را نشان می دهد؛ اگر کلیدهای SW1 و SW2 هر دو باز باشند؛ دستگاه مانند یک STATCOM و یک SSSC عمل می کنند. اگر کلیدها هر دو بسته باشند؛ توان اکتیو می تواند بین دو مبدل انتقال یابد. قسمت سری UPFC می تواند توان اکتیو را با شبکه نیز مبادله کند.

حال کمی کارکرد UPFC را توضیح می دهیم. همانطور که در بخش SSSC توضیح داده شد استفاده از یک منبع انرژی مارا قادر می سازد تا علاوه بر کنترل توان راکتیو، توان اکتیو را هم کنترل کنیم. در حقیقت توسط UPFC هر دو این توان ها را می توانن با تزریق ولتاژهای اکتیو و راکتیو به صورت مجزا کنترل کرد. شکل ۲۳ یک SSSC متصل به ابتدای یک خط انتقال نشان می دهد. اگر توان مورد نیاز در پیوند DC توسط یک مبدل که به صورت موازی با خط متصل شده است تامین گردد؛ می توان توان های اکتیو و راکتیو را به صورت مستقل از هم کنترل کرد که چنین عنصری همان UPFC است. همچنین مبدل موازی حتی می تواند توان راکتیو را تولید و یا مصرف کند طوری که قسمتی از بار روی ژنراتور های متصل به باس ابتدای خط آزاد شود. همچنین اگر ظرفیت نامی مبدل موازی به اندازه ی کافی باشد؛ می توان UPFC را در هر مکان از خط و در هر ولتاژی نصب کرد.

۶-۵-۸- کنترل کننده ی شارش توان بین خطوط^۱ (IPFC)

این عنصر، قابلیت تبادل توان اکتیو بین خطوط را فراهم می کند. در این سیستم، هرکدام از دو خط انتقال که قرار است توان بین آن ها مبادله شود، یک VSC سری داشته و این دو VSC، در سمت DC به هم پیوند می خورند. شمای IPFC در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

^۱ Interline Power Flow Controller



شکل ۲۶: کنترل کننده ی توان بین خطوط (IPFC)



۶-۶-۶ مدل سازی دینامیکی ادوات FACTS

۶-۶-۶-۱ مقدمه

روش مرسوم پایدار کردن نوسانات دینامیک سیستم از گذشته تا کنون، استفاده از پایدارساز سیستم قدرت^۱ (PSS) بوده است. با ظهور ادوات الکترونیک قدرت، تلاش های موفقی در افزایش بازدهی و کنترل پذیری سیستم قدرت انجام شد. ادوات مختلف FACTS از جمله ی این موفقیت ها می باشند. نکته ی مهمی که در این فصل با آن سروکار داریم؛ استفاده از این عناصر برای بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت است. سیستمی که می تواند به PSS در بهبود دینامیک سیستم قدرت کمک کرده یا حتی جایگزین آن شود. تمرکز ما در این فصل بر روی سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بینهایت^۲ (SMIB) است.

در این فصل، مدل خطی شده ی هفرون-فیلیپس [heffron] سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت (SMIB)، به همراه ادوات فکتس (FACTS) متصل شده ی به آن آورده شده است. این مدل به تحلیل دینامیک سیستم قدرت، در حضور این ادوات کمک کرده؛ و نقش این سیستم ها را در کنترل پذیر کردن و افزایش قابلیت انتقال توان خطوط انتقال نشان می دهد.

۶-۶-۶-۲ مدل یکپارچه ی هفرون-فیلیپس [۳]، در حضور ادوات FACTS

در این بخش، مدل هفرون-فیلیپس سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی نهایت به همراه ادوات مختلف FACTS، آورده شده است.

۶-۶-۶-۳ سیستم تک ماشینه در حضور SVC، TCSC و PST

در [۴]، یک مدل یکپارچه برای سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بینهایت، در حضور ادوات FACTS ارائه داده است. در این مقاله عناصر SVC، TCSC، و PST به سیستم تک ماشینه اضافه شده و تاثیر آن ها بر پارامترهای مدل هفرون-فیلیپس بررسی شده است.

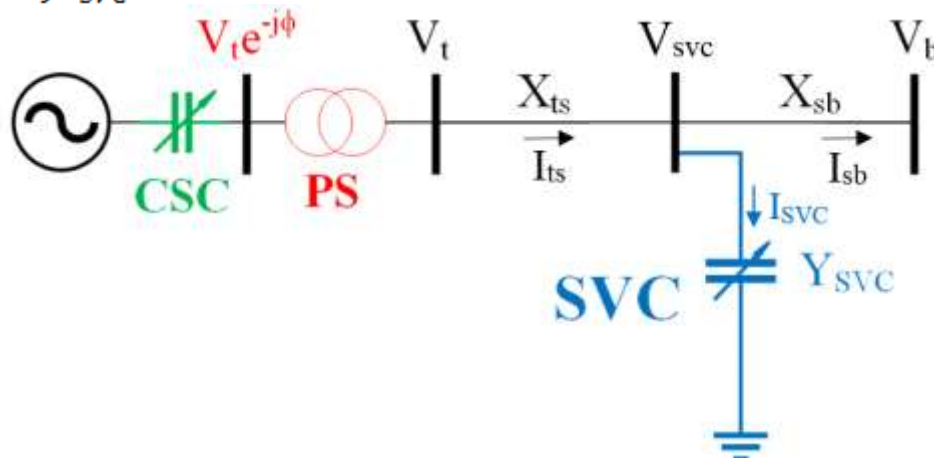
^۱ Power System Stabilizer

^۲ Single-Machine Infinite Bus

شکل ۱۳ را در نظر بگیرید. در این شکل به ابتدای خط ترانسفورماتور شیفت فاز (PST)، خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC) - یا به صورت کلی راکتانس سری کنترل شده - اضافه شده اند. جبران کننده استاتیک توان راکتیو (SVC) نیز به خط انتقال (جایی وسط دو باس ابتدا و انتهای خط) متصل شده است.

مدل SVC را می توان تابعی از Δf_{SVC} در نظر گرفت. به صورت زیر:

$$\vec{Y}_{SVC} = -\frac{\Delta f_{SVC}}{jX_{SVC}} \quad (9)$$



شکل ۲۷: سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور SVC، PST و TCSC

در شکل ۱۳ داریم:

$$\vec{I}_{sb} = \vec{I}_{ts} - \vec{Y}_{SVC} \vec{V}_{SVC} \quad (10)$$

$$\vec{V}_{SVC} = jX_{sb} \vec{I}_{sb} + V_b = jX_{sb} \vec{I}_{ts} - jX_{sb} \vec{Y}_{SVC} \vec{V}_{SVC} + V_b \quad (11)$$

(۱۲)

$$\vec{V}_t = jX_{sb} \vec{I}_{ts} + V_{SVC} = jX_{ts} \vec{I}_{ts} + j \left(\frac{X_{sb}}{1 + jX_{sb} \vec{Y}_{SVC}} \right) \cdot \vec{I}_{ts} + \frac{V_b}{1 + jX_{sb} \vec{Y}_{SVC}} \quad (13)$$

پارامترهای زیر را تعریف می کنیم:

$$C = \frac{1}{1 + jX_{sb} \vec{Y}_{SVC}} = 1 - \frac{\Delta f_{SVC} X_{sb}}{X_{SVC}}, \quad X_{TL} = X_{ts} + \frac{X_{sb}}{C}$$

(۱۴) حال معادله ی (۱۲) را به صورت زیر بازنویسی می کنیم:

$$\vec{V}_t = jX_{TL} \cdot \vec{I}_{ts} + \frac{V_b}{C}$$

با دقت در معادله ی (۱۴) نتیجه می شود که سیستم تک ماشینه در حضور SVC را می توان با یک سیستم تک ماشینه ای که امپدانس خط آن با X_{TL} و ولتاژ باس بینهایت آن نیز با V_b جایگزین شده است. پس برای نوشتن معادلات سیستم تک ماشینه در حضور SVC، کافی است معادلات سیستم تک (۱۵) ماشینه با امپدانس خط X_{TL} و باس بینهایت با ولتاژ V_b بنویسیم. قبل از پرداختن به این کار، تاثیر دو عنصر دیگر (PST, TCSC) را بررسی می کنیم.

تاثیر TCSC تنها روی امپدانس سری خط است. امپدانس سری خط در حضور TCSC به صورت زیر است. (۱۶) لازم به ذکر است که در اینجا نیز فرض شده است که میزان امپدانس TCSC، تابعی از Δf_{TCSC} است.

$$X_{TL} = (X_{ts} + X_{sb}) - \Delta f_{TCSC} X_{TCSC}$$

تاثیر ترانسفورماتور شیفت فاز (PST)، تنها روی زاویه ی δ است. بدین منظور زاویه ی δ ، باید به صورت زیر اصلاح شود:

$$\delta_{new} = \delta_{old} + \Delta f_{PST} f. \quad (۱۷)$$

حال به بررسی کنترل کننده ی این ادوات می پردازیم. برای این کنترل کننده نیز مدل یکپارچه ای پیشنهاد می شود. فرض می شود که سیگنال ورودی کنترل کننده $\Delta \varphi$ است. با تجزیه ی سیگنال $\Delta \varphi$ به مولفه های موهومی و حقیقی در صفحه ی S داریم:

$$\Delta f_* = K_* C(j\omega_s) \Delta \varphi = K_* K_s \Delta \delta + K_* K_D \omega_s \Delta \omega$$

که در رابطه ی بالا، $K_* C(s)$ تابع تبدیل واحد آماده ساز سیگنال (با بهره ی K_*) است. ω_s نیز فرکانس زاویه ای نوسانات بوده و $*$ (اندیس K) می تواند هر کدام از ادوات سه گانه ی مطرح شده در این بخش باشد.

حال معادلات غیرخطی هفرون فیلپس را می نویسیم و سپس تاثیر ادوات مذکور را در آن ها، با توجه به مطالب گفته شده در بالا بررسی می کنیم. معادلات غیرخطی سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بینهایت همان گونه که در فصل های قبلی نیز بیان شد؛ به صورت زیر می باشند:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega_s \Delta \omega \\ \dot{\Delta \omega} &= \frac{P_m - P_e - D \cdot \Delta \omega}{2H} \\ \dot{E}'_q &= \frac{-E_q + E_{qe}}{T'_{d0}} \\ \dot{E}'_{qe} &= \text{Reg}(s) \cdot (V_{t0} - V_t) = K_A \frac{V_{t0} - V_t}{1 + sT_A} \\ P_e &= \frac{E'_q V_b \sin \delta}{X'_{d\Sigma}} - V_b^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \frac{X_q - X'_d}{X'_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \\ E_q &= E'_q \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} - V_b \cos \delta \frac{X_d - X'_d}{X'_{d\Sigma}} \end{aligned}$$

$$V_{td} = V_b \sin \delta \frac{X_q}{X_{q\Sigma}} , \quad V_{tq} = E'_q \frac{X_L}{X'_{d\Sigma}} + V_b \cos \delta \frac{X'_d}{X'_{d\Sigma}}$$

جایی که:

$$X'_{d\Sigma} = X_L + X'_d , \quad X_{q\Sigma} = X_L + X_q , \quad X_{d\Sigma} = X_L + X_d$$

حال این معادلات را برای سیستم تک ماشینه در حضور ادوات FACTS بازنویسی می کنیم:

$$P_e = \frac{E'_q V_b \sin(\delta + \Delta f_{PST} f.)}{CX'_{d\Sigma}} - V_b^2 \sin^2(\delta + \Delta f_{PST} f.) \frac{X_q - X'_d}{2C^2 X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}}$$

$$E_q = E'_q \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} - V_b \cos(\delta + \Delta f_{PST} f.) \frac{X_d - X'_d}{CX'_{d\Sigma}}$$

$$V_{td} = V_b \sin(\delta + \Delta f_{PST} f.) \frac{X_q}{CX_{q\Sigma}} , \quad V_{tq} = E'_q \frac{X_{TL}}{X'_{d\Sigma}} + V_b \cos(\delta + \Delta f_{PST} f.) \frac{X'_d}{CX'_{d\Sigma}}$$

جایی که: (دقت شود که در این حالت X_L با X_{TL} که از رابطه ی (۱۳) به دست می آید جایگزین می شود).

$$X'_{d\Sigma} = X_{TL} + X'_d , \quad X_{q\Sigma} = X_{TL} + X_q , \quad X_{d\Sigma} = X_{TL} + X_d$$

حال با خطی سازی معادلات غیرخطی بالا به روابط خطی زیر می رسم:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\delta} &= \omega_s \Delta \omega \\ \Delta \dot{E}_{qe} &= \frac{-\Delta E_{qe} - K_A(K_\delta \Delta \delta - K_f \Delta E'_q - K_v \Delta f_*)}{T_A} \\ \Delta \dot{E}'_q &= \frac{-K_f \Delta \delta - K_r \Delta E'_q - K_q \Delta f_* + \Delta E_{qe}}{T'_{d0}} \\ \Delta \dot{\omega} &= \frac{-K_\omega \Delta \delta - K_r \Delta E'_q - K_q \Delta f_* - D \Delta \omega}{2H} \\ \Delta \dot{E}_{qe} &= \frac{-\Delta E_{qe} - K_A(K_\delta \Delta \delta - K_f \Delta E'_q - K_v \Delta f_*)}{T_A} \end{aligned}$$

جایی که:

$$K_\omega = \frac{\partial P_e}{\partial \delta} , \quad K_r = \frac{\partial P_e}{\partial E'_q} , \quad K_f = \frac{\partial E_q}{\partial E'_q} , \quad K_\delta = \frac{\partial E_q}{\partial \delta} , \quad K_\omega = \frac{\partial V_t}{\partial E'_q} , \quad K_f = \frac{\partial V_t}{\partial \delta} , \quad K_v = \frac{\partial V_t}{\partial \Delta f_*} , \quad K_q = \frac{\partial E_q}{\partial \Delta f_*} , \quad K_P = \frac{\partial P_e}{\partial \Delta f_*}$$

روابط بالا، معادلات خطی شده ی سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بینهایت، در حضور ادوات FACTS است. K_p ، K_q و K_v بلوک دیاگرام ادوات FACTS را نشان می دهد. دیاگرام هفرون-فیلیپس این سیستم در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

شکل ۲۸: مدل هفرون-فیلیپس مدل تک ماشینه متصل به شین بینهایت در حضور ادوات FACTS

۶-۶-۴- سیستم تک ماشینه به همراه UPFC [۵]

همان گونه که از نام این عنصر بر می آید؛ وظیفه ی اصلی آن کنترل شارش توان است. اما این عنصر به منظور اهدافی همچون تثبیت ولتاژ، پایداری دینامیکی و گذرا و ... نیز می تواند به کار گرفته شود. سیستم تک ماشینه ی متصل به شین بینهایت، با UPFC متصل شده به آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

در شکل ۱۶، ET ترانسفورماتور تحریک، BT ترانسفورماتور تقویت می باشد. m_E و m_B به ترتیب نسبت مدولاسیون دامنه ی مبدل های منبع ولتاژی E و B بوده و δ_E و δ_B نیز به ترتیب زاویه فاز این مبدل ها هستند. این متغیرهای چهارگانه ورودی های کنترلی UPFC هستند. برای شروع مدلسازی، معادلات UPFC را نوشته و سپس در محور d-q با کمک تبدیل پارک بازنویسی می کنیم.

$$\vec{V}_E = \frac{m_E v_{dc}}{2} e^{j\delta_E}, \quad \vec{V}_B = \frac{m_B v_{dc}}{2} e^{j\delta_B}$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3\phi_E}{4\phi_{dc}} [\cos \delta_E \sin \delta_E] \begin{bmatrix} i_{Ed} \\ i_{Eq} \end{bmatrix} + \frac{3\phi_B}{4\phi_{dc}} [\cos \delta_B \sin \delta_B] \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_t = x_{tE} \cdot \vec{I}_t + \vec{V}_{Et}$$

$$\vec{V}_{Et} = \vec{V}_{Bt} + jx_{BV} \cdot \vec{I}_B + \vec{V}_b$$

در نتیجه جریان های ترانس های تحریک و تقویت در محورهای d و q از روابط زیر به دست می آیند:

$$i_{Ed} = \frac{x_{BB}}{X_{d\Sigma}} E'_q - \frac{m_E \sin \delta_E v_{dc} x_{Bd}}{2\phi_{d\Sigma}} + \frac{x_{dE}}{X_{d\Sigma}} \left(V_b \cos \delta + \frac{m_B \sin \delta_B v_{dc}}{2} \right)$$

$$i_{Eq} = \frac{m_E \cos \delta_E v_{dc} x_{Bq}}{2\phi_{q\Sigma}} - \frac{x_{qE}}{X_{q\Sigma}} \left(V_b \sin \delta + \frac{m_B \cos \delta_B v_{dc}}{2} \right)$$

$$i_{Bd} = -\frac{x_E}{X_{d\Sigma}} E'_q + \frac{m_E \sin \delta_E v_{dc} x_{dE}}{2\phi_{d\Sigma}} - \frac{x_{dt}}{X_{d\Sigma}} \left(V_b \cos \delta + \frac{m_B \sin \delta_B v_{dc}}{2} \right)$$

$$i_{Bq} = -\frac{m_E \cos \delta_E v_{dc} x_{qE}}{2\phi_{q\Sigma}} + \frac{x_{qt}}{X_{q\Sigma}} \left(V_b \sin \delta + \frac{m_B \cos \delta_B v_{dc}}{2} \right)$$

جایی که:

$$x_{q\Sigma} = (x_q + x_{tE} + x_E) \cdot (x_B + x_{BV}) + x_E (x_q + x_{tE})$$

$$x_{qE} = x_q + x_{tE}, \quad x_{qt} = x_q + x_{tE} + x_E, \quad x_{Bq} = x_B + x_{BV} + x_q + x_{tE}$$

$x_{d\Sigma} = (x_d' + x_{tE} + x_E) \cdot (x_B + x_{BV}) + x_E(x_d' + x_{tE})$, $x_{BB} = x_B + x_{BV}$
 $x_{dE} = x_d' + x_{tE}$, $x_{dt} = x_d' + x_{tE} + x_E$, $x_{Bd} = x_B + x_{BV} + x_d' + x_{tE}$
 حال این معادلات را خطی می کنیم. نتایج زیر حاصل می شوند:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}_q' \\ \Delta \dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_v}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_r}{M} & 0 \\ -\frac{K_r}{T_{d0}'} & 0 & -\frac{K_r}{T_{d0}'} & 1 \\ -\frac{K_A K_\delta}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_r}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q' \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_{pd}}{M} \\ -\frac{K_{qd}}{T_{d0}'} \\ -\frac{K_A K_{vd}}{T_A} \end{bmatrix} \Delta v_{dc} \\
 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{pe}}{M} & -\frac{K_{p\delta e}}{M} & -\frac{K_{pb}}{M} & -\frac{K_{p\delta b}}{M} \\ -\frac{K_{qe}}{T_{d0}'} & -\frac{K_{q\delta e}}{T_{d0}'} & -\frac{K_{qb}}{T_{d0}'} & \frac{K_{q\delta b}}{T_{d0}'} \\ -\frac{K_A K_{ve}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\delta e}}{T_A} & -\frac{K_A K_{vb}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\delta b}}{T_A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta m_E \\ \Delta \delta_E \\ \Delta m_B \\ \Delta \delta_B \end{bmatrix}$$

جایی که:

$$\Delta v_{dc} = \frac{1}{K_v + s} (K_v \Delta \delta + K_A \Delta E_q' + K_{ce} \Delta m_E + K_{c\delta e} \Delta \delta_E + K_{cb} \Delta m_B + K_{c\delta b} \Delta \delta_B)$$

سیگنال کنترلی Δf_* نیز به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\Delta f_* = [\Delta v_{dc} \quad \Delta u_k]$$

که u_k سیگنال کنترلی ورودی به UPFC است که می تواند هریک از سیگنال های چهارگانه ی $\delta_B, \delta_E, m_B, m_E$ باشد.

در انتها بلوک دیاگرام هفرون-فیلیپس این سیستم رد شکل ۱۷ نشان داده شده است.

شکل ۲۹: سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت به همراه UPFC

شکل ۳۰: مدل هفرون-فیلیپس مدل تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور UPFC

در این بلوک دیاگرام، پارامترهای K_p و K_q و K_v به صورت زیر می باشند:

$$K_P = \begin{bmatrix} \frac{K_{pd}}{M} \\ K_{pu_k} \\ M \end{bmatrix}, \quad K_q = \begin{bmatrix} \frac{K_{qd}}{T'_{d0}} \\ K_{qu_k} \\ T'_{d0} \end{bmatrix}, \quad K_V = \begin{bmatrix} \frac{K_A K_{vd}}{T_A T'_{d0}} \\ K_{AK_{vu_k}} \\ T_A T'_{d0} \end{bmatrix}$$

۶-۵-۶- مدل دینامیکی سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور STATCOM [۶]

شکل ۱۸ سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت را در حضور STATCOM نشان می دهد. ترانسفورماتور کاهش دهنده است که STATCOM را به شبکه کوپل می کند. X_{SDT} نیز راکتانس ناشی از این ترانسفورماتور می باشد. اساس کار STATCOM به این صورت است که مبدل منبع ولتاژ (VSC) یک ولتاژ متناوبی را به شکل $v(t) = V \sin(\omega t - \varphi)$ در پشت ترانسفورماتور کوپلینگ ایجاد می کند. اختلاف ولتاژ بین دو سمت این ترانس شارش توان اکتیو و راکتیو را بین STATCOM و شبکه ممکن می سازد. دامنه و زاویه فاز ولتاژ فراهم شده توسط مبدل منبع ولتاژ، قابل کنترل می باشد.

$$\begin{aligned} \vec{I}_{LO} &= I_{Lod} + jI_{Loq} \\ \vec{V}_O &= cV_{DC}(\cos\varphi + j\sin\varphi) = cV_{DC} \angle \varphi \\ \frac{dV_{DC}}{dt} &= \frac{I_{DC}}{C_{DC}} = \frac{c}{C_{DC}}(I_{Lod}\cos\varphi + I_{Loq}\sin\varphi) \\ \vec{I}_{LB} &= \vec{I}_{tL} - \vec{I}_{LO} = \vec{I}_{tL} - \frac{\vec{V}_L - \vec{V}_O}{jX_{SDT}} = \vec{I}_{tL} - \frac{\vec{V}_t - jX_{SDT}\vec{I}_{tL} - \vec{V}_O}{jX_{SDT}} \\ \vec{V}_t &= jX_{tL}\vec{I}_{tL} + jX_{LB}\vec{I}_{LB} + \vec{V}_B \\ j\left(x_{tL} + x_{LB} + x_{tL}\frac{x_{LB}}{x_{SDT}}\right)\vec{I}_{tL} &= \left(1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}\right)\vec{V}_t - \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}\vec{V}_O - \vec{V}_B \end{aligned}$$

و با نوشتن جریان $\vec{I}_{tL}$ در محور d-q داریم:

$$\begin{aligned} j\left(x_{tL} + x_{LB} + x_{tL}\frac{x_{LB}}{x_{SDT}}\right)(I_{tLd} + jI_{tLq}) \\ = \left(1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}\right)[x_q I_{tLq} + j(E'_q - x'_d I_{tLd})] - \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}(cV_{dc}\cos\varphi \\ + jcV_{dc}\sin\varphi) - (V_B\cos\delta + jV_B\sin\delta) \end{aligned}$$

که از این روابط مولفه های d و q جریان I_{tL} به صورت زیر به دست می آیند:

$$I_{tLd} = \frac{E'_q - V_B\cos\delta - \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}cV_{dc}\sin\varphi}{x_{tL} + x_{LB} + x_{tL}\frac{x_{LB}}{x_{SDT}} + \left(1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}\right)x'_d}$$

$$I_{tLq} = \frac{V_B \sin \delta + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}} c V_{dc} \cos \varphi}{x_{tL} + x_{LB} + x_{tL} \frac{x_{LB}}{x_{SDT}} + \left(1 + \frac{x_{LB}}{x_{SDT}}\right) x_q}$$

و با نوشتن ترکیب معادلات بالا با معادلات غیرخطی سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت و سپس خطی سازی آن مدل خطی هفرون-فیلیپس به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{v}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_r}{M} & 0 & -\frac{K_{pDC}}{M} \\ \frac{K_r}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_r}{T'_{d0}} & 1 & -\frac{K_{qDC}}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_\delta}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_r}{T_A} & 1 & -\frac{K_A K_{vDC}}{T_A} \\ \frac{K_v}{K_q} & 0 & \frac{K_v}{K_q} & 0 & \frac{K_q}{K_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta v_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_{pc}}{M} & -\frac{K_{p\varphi}}{M} \\ -\frac{K_{qc}}{T'_{d0}} & -\frac{K_{q\varphi}}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_{vc}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\varphi}}{T_A} \\ \frac{K_{dc}}{K_{d\varphi}} & \frac{K_{d\varphi}}{K_{d\varphi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta c \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}$$

بلوک دیاگرام این مدل در شکل ۱۹ نشان داده شده است

شکل ۳۱: مدل هفرون-فیلیپس مدل تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور STATCOM

شکل ۳۲: سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور STATCOM

۶-۶-۶-۶-۶ مدل دینامیکی سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور SSSC [۷]

به دلیل شباهت بسیار این SSSC با STATCOM، روابط سیستم در حضور این عنصر تا حدود زیادی شبیه مدل سیستم با STATCOM متصل شده آن است. شکل ۲۰ یک سیستم تک ماشین ی متصل به شین بینهایت را در حضور SSSC نشان می دهد.

شکل ۳۳: سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور SSSC

$$\vec{I}_{ts} = I_{tsd} + j I_{tsq} = I_{TS} \angle \varphi$$

$$\vec{V}_{INV} = cV_{DC}(\cos\varphi + j\sin\varphi) = cV_{DC} \angle \vartheta, \quad \vartheta = \varphi \pm 90^\circ$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{I_{DC}}{C_{DC}} = \frac{c}{C_{DC}}(I_{tsd}\cos\vartheta + I_{tsq}\sin\vartheta)$$

و با ترکیب معادلات با معادلات غیرخطی سیستم تک ماشین و سپس خطی سازی آن ها معادلات خطی هفرون-فیلیپس زیر حاصل می شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{v}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot & \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_\psi}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_\gamma}{M} & 0 & -\frac{K_{pDC}}{M} \\ \frac{K_\gamma}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_\gamma}{T'_{d0}} & 1 & -\frac{K_{qDC}}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_\psi}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_\gamma}{T_A} & 1 & -\frac{K_A K_{vDC}}{T_A} \\ K_\gamma & 0 & K_\gamma & 0 & K_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta v_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{pu} \\ -K_{qu} \\ -K_{vu} \\ K_{dm} \end{bmatrix} \cdot [\Delta u]$$

$$K_{vu} = \left[\frac{K_A K_{vm}}{T_A} \right], \quad K_{qu} = \left[\frac{K_{qm}}{T'_{d0}} \right], \quad K_{pu} = \left[\frac{K_{pm}}{M} \right], \quad [\Delta u] = [\Delta m]$$

و در انتها نیز بلوک دیاگرام این سیستم در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

۶-۶-۷- مدل دینامیکی سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور IPFC [۸]

در این بخش نیز مانند بخش های گذشته ابتدا معادلات غیرخطی سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت را نوشته و سپس آن را برای مطالعات دینامیکی خطی می کنیم. لازم به ذکر است که مدل خطی شده ی هفرون-فیلیپس استخراج شده تنها برای مطالعات دینامیکی اعتبار دارد. این مدل نیز مشابه مدل یکپارچه ای است که برای SVC, TCSC, PST, UPFC ارائه شد.

شکل ۳۴: سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور کنترل کننده ی توان بین خطوط (IPFC)

شکل ۱۹ سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت را در حضور IPFC نشان می دهد. ولتاژهای V_{se1} و V_{se2} برابرند با:

$$\vec{V}_{se1} = \frac{v_{dc}}{\gamma} m_1 e^{j\theta_1}, \quad \vec{V}_{se2} = \frac{v_{dc}}{\gamma} m_r e^{j\theta_r}$$

جایی که ولتاژ v_{dc} ولتاژ دوسر خازن لینک dc (C_{dc})، m_1 و m_2 نسبت مدولاسیون دامنه ی مبدل های منبع ولتاژ و θ_1 و θ_r نیز زاویه فاز آن ها هستند که ورودی دو مبدل منبع ولتاژ هستند. با بردن روابط به محور d-q، ولتاژ دوسر خازن DC برابر است با:

$$v_{dc} = \frac{3\gamma_1}{4\gamma_{dc}} (i_{1d} \cos \theta_1 + i_{1q} \sin \theta_1) + \frac{3\gamma_r}{4\gamma_{dc}} (i_{rd} \cos \theta_r + i_{rq} \sin \theta_r)$$

جایی که $i_{rd}, i_{rq}, i_{1d}, i_{1q}$ به ترتیب جریان های خطوط ۱ و ۲ در محور d و جریان های خطوط ۱ و ۲ در محور q است. حال از روی شکل معادلات شبکه را می نویسیم:

$$\vec{V}_t = jx_t \vec{I}_t + \vec{V}_1$$

$$\vec{V}_1 = jx_{t1} \vec{I}_1 + \vec{V}_{se1} + jx_{L1} \vec{I}_1 + \vec{V}_b = jx_{t2} \vec{I}_r + \vec{V}_{se2} + jx_{L2} \vec{I}_r + \vec{V}_b$$

حال از معادلات (۵۳) و (۵۴) جریان های I_1 و I_2 را بدر محور d-q به دست می آوریم:

$$i_{1d} = x_{11d} E'_q + \frac{1}{\gamma} (x_{1rd} - x_{11d}) v_{dc} m_r \sin \theta_r - \frac{1}{\gamma} x_{1rd} v_{dc} m_1 \sin \theta_1 - x_{11d} v_b \cos \delta$$

$$i_{1q} = x_{11q} E'_q + \frac{1}{\gamma} (x_{1rd} - x_{11d}) v_{dc} m_r \sin \theta_r - \frac{1}{\gamma} x_{1rd} v_{dc} m_1 \sin \theta_1 - x_{11d} v_b \cos \delta$$

$$i_{rd} = \frac{1}{\gamma} (x_{11d} + x_{1rd}) v_{dc} m_r \cos \theta_r - \frac{1}{\gamma} x_{1rd} v_{dc} m_1 \cos \theta_1 + x_{11d} v_b \sin \delta$$

$$i_{rq} = \frac{1}{\gamma} (x_{11d} + x_{1rd}) v_{dc} m_r \cos \theta_r - \frac{1}{\gamma} x_{1rd} v_{dc} m_1 \cos \theta_1 - x_{11d} v_b \sin \delta$$

جایی که:

$$\begin{aligned} x_{11d} &= \frac{x_{tL2}}{x_{\Sigma 1}}, \quad x_{1rd} = \frac{x'_{dt} + x_{tL2}}{x_{\Sigma 1}}, \quad x_{11q} = \frac{x_{tL1}}{x_{\Sigma 1}} \\ x_{1rd} &= -\frac{x'_{dt}}{x_{\Sigma 1}}, \quad x_{11d} = \frac{x_{tL2}}{x_{\Sigma 2}}, \quad x_{1rd} = -\frac{x'_{qt} + x_{tL2}}{x_{\Sigma 2}} \\ x_{11q} &= \frac{x_{tL1}}{x_{\Sigma 2}}, \quad x_{1rd} = \frac{-x'_{qt}}{x_{\Sigma 2}} \\ x_{tL1} &= x_{t1} + x_{L1}, \quad x_{tL2} = x_{t2} + x_{L2} \\ x'_{dt} &= x'_d + x_t, \quad x'_{qt} = x_q + x_t \\ x_{\Sigma 1} &= (x'_{dt} \cdot x_{tL2}) + (x'_{dt} + x_{tL2})(x_{tL1}), \\ x_{\Sigma 2} &= (x'_{qt} \cdot x_{tL2}) + (x'_{qt} + x_{tL2})(x_{tL1}) \end{aligned}$$

حال باید ابتدا معادلات غیرخطی سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت را نوشته و سپس آن را خطی می کنیم. برای پرهیز از تکرار، معادلات غیر خطی سیستم تک ماشینه را مجدداً نمی نویسیم. معادلات خطی شده ای سیستم در حضور IPFC به صورت زیر می باشند:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{v}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\omega} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_v}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_r}{M} & 0 \\ -\frac{K_f}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_r}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_\phi}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_f}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \\ \frac{1}{K_v} & 0 & \frac{1}{K_v} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta v_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\omega} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{pm1}}{M} & -\frac{K_{p\theta1}}{M} & -\frac{K_{pm2}}{M} \\ -\frac{K_{qm1}}{T'_{d0}} & -\frac{K_{q\theta1}}{T'_{d0}} & -\frac{K_{qm2}}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_{vm1}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\theta1}}{T_A} & -\frac{K_A K_{vm2}}{T_A} \\ K_{cm1} & K_{p\theta1} & K_{pm2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta m_r \\ \Delta \delta_r \end{bmatrix}$$

جایی که به عنوان مثال Δm_1 انحراف از مدولاسیون دامنه m_1 ولتاژ تزریقی V_{se1} و $\Delta \theta_1$ انحراف از زاویه فاز θ_1 این ولتاژ بوده و برای ولتاژ V_{se2} نیز به همین ترتیب. همچنین داریم:

$$\begin{aligned} K_p &= [K_{pm1} \ K_{p\theta1} \ K_{pm2} \ K_{p\theta2}] \\ K_q &= [K_{qm1} \ K_{q\theta1} \ K_{qm2} \ K_{q\theta2}] \\ K_v &= [K_{vm1} \ K_{v\theta1} \ K_{vm2} \ K_{v\theta2}] \\ K_c &= [K_{cm1} \ K_{c\theta1} \ K_{cm2} \ K_{c\theta2}] \end{aligned}$$

در انتها نیز شکل بلوک دیاگرام مدل خطی شده ی هفرون-فیلیپس در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

شکل ۳۵: مدل هفرون-فیلیپس مدل تک ماشین متصل به شین بینهایت در حضور IPFC

مراجع فصل ششم

- [1] K.R. Padiyar, "Facts Controllers in Power Transmission and Distribution",
Anshan Publishers, 1st edition, Kent., UK, 2009,
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_AC_transmission_system , Retrieved at 02 Jan 2016.
- [3] W. G. Heffron, R. A. Phillips, 'Effect of a modem amplidyne voltage regulator on under excited operation of large turbine generator', *AIEE Trans.*, 1952,71
- [4] H. F. Wang, F.J. Swift, "A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillations Part I: Single-machine Infinite-bus Power Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, pp. 941-946, 1997.
- [5] H. F. Wang, "A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillations—Part III: Unified Power Flow Controller", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 3, pp. 978-983, 2000.
- [6] H. F. Wang, "Phillips-Heffron model of power systems installed with STATCOM and applications", *IEEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 146, No. 5, pp. 521-527
- [7] H. F. Wang, "Design of a SSSC damping controller to improve power system oscillation stability", *In Proceedings of the IEEE Africon*, Cape Town, 1999.
- [8] A. M. Parimi, N. C. Sahoo, I. Elamvazuthi, N. Saad, "Dynamic Modeling of Interline Power Flow Controller for Small Signal Stability", *In Proceedings of the IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010)*, Kuala Lumpur, 2010

پروژه های پیشنهادی فصل ششم

۱. مطلوب است محاسبه ی میدان و پتانسیل در یک ترانزیستور، تریتور، IGBT و GTO.
۲. هدایت الکتریکی در جامدات (فلزات و غیرفلزات) و در گازها و در مایعات را مدل سازی و شبیه سازی نمایید.

