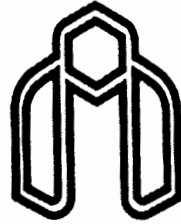


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل

طراحی و شبیه سازی کنترل کننده فازی مقاوم برای سیستم قدرت توسط جبران ساز توزیعی موازی

دانشجو:

محمد رضا صالحی زاده

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر قره ویسی

استاد مشاور:

دکتر اشکان رحیمی کیان

تابستان ۱۳۸۴

چکیده

با گسترش نیاز روز افزون صنایع به انرژی الکتریکی و با توجه به کاربردهای عمده آن و پراکندگی منابع تولید و مصرف ، شبکه های به هم پیوسته جهت انتقال و توزیع انرژی الکتریکی گسترش یافته اند. صنعت برق در سالیان اخیر با مبحث تجدید ساختار و تجزیه ساختار سنتی عمودی به واحدهای جدا از یکدیگر و خصوصی سازی مواجه است که در نتیجه این پدیده ، انرژی الکتریکی به عنوان یک کالا مطرح می شود.

کلیه عوامل فوق لزوم ایجاد یک شبکه مطمئن با کارایی بالا را طلب می کند. یکی از مهمترین مشخصه های یک سیستم با عملکرد مطلوب مبحث پایداری می باشد که برای نیل به این هدف و دیگر مشخصه های مطلوب لازم است کنترل کننده های مناسبی برای سیستم طراحی گردد. سیستم های انتقال انعطاف پذیر (FACTS)، که با ظهور صنعت نیمه هادی رشد کرده اند یکی از مهمترین تجهیزات کنترلی جهت پایدار سازی سیستمهای قدرت می باشند که در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته اند. یکی از مهمترین و کاملترین این تجهیزات کنترل کننده یکپارچه توان می باشد. این تجهیز قابلیت کنترل زاویه فاز ، امپدانس و ولتاژ خط را به صورت مستقل داراست. با توجه به مشکلات روشهای متداول در پایدار سازی سیستم قدرت نظیر پیچیدگی طرح ، مقاوم نبودن در برابر تغییرات بار و تغییرات پارامترهای سیستم قدرت و تعداد زیاد قوانین فازی ، استراتژی کنترلی فازی مقاوم بر مبنای جبران ساز توزیعی موازی به منظور طراحی و شبیه سازی بر کنترل کننده یکپارچه توان پیشنهاد گردیده است.

نتایج شبیه سازی نشان دهنده قابلیت این روش جهت رفع نقیصه های یاد شده در پایدار سازی سیستم قدرت تک ماشینه و چند ماشینه می باشد.

کلمات کلیدی :

سیستم قدرت ، پایداری ، سیستم های انتقال انعطاف پذیر، کنترل کننده یکپارچه توان ، فازی مقاوم ، جبران ساز توزیعی موازی

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

تقدیر و تشکر

در ابتدا بر خود لازم می دانم از زحمات استاد راهنمای عزیزم **دکتر علی اکبر قره ویسی** به خاطر راهنمایی های ارزنده و نیز استاد مشاورم **جناب آقای دکتر اشکان رحیمی کیان** در کلیه مراحل انجام پایان نامه تشکر و قدردانی کنم .

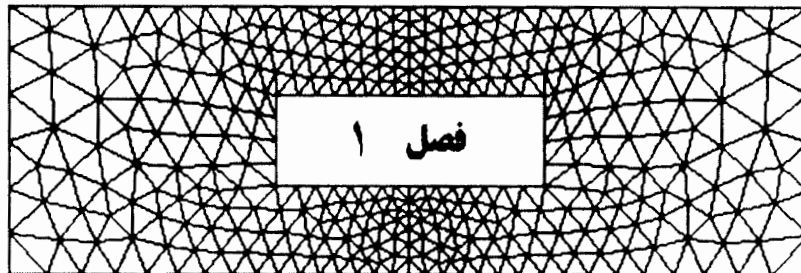
همچنین از استادان گرانقدر **جناب آقای دکتر صدر نیا و جناب آقای دکتر طوسیان شاندیز** به دلیل مطالعه پایان نامه و ارائه نظرات راهگشایشان تشکر می کنم.

در انجام این پایان نامه از نظرات **آقای دکتر مجید علمی** سود جسته ام که از ایشان نیز کمال سپاس را دارم.

صفحه	فهرست
۲-۱	۱- مقدمه
۲۶-۳	۲- معرفی ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر (Facts)
۴-۳	مقدمه
۴	۲-۱. محدودیتهای سیستم قدرت
۵	۲-۲. قابلیت کنترل سیستم قدرت
۹	۲-۳. معرفی انواع عناصر FACTS
۱۴-۱۰	۲-۴. کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)
۱۶-۱۵	۲-۵. معرفی ساختار TCSC
۱۷	۲-۵-۱. یک نمونه عملی
۱۹- ۱۸	۲-۵-۲. مدل سازی روابط حاکم بر TCSC
۲۲-۱۹	۲-۶-۱. جبران ساز استاتیکی توان راکتیو (SVC)
۲۰	۲-۶-۱. تاریخچه و ساختار
۲۲-۲۱	۲-۶-۲. مشخصات و نمودار مشخصه ولتاژ-جریان SVC
۲۶-۲۲	۲-۷-۱. جبران ساز ایستای سنکرون (STATCOM)
۲۳	۲-۷-۱. ساختار و تاریخچه
۲۴	۲-۷-۲. یک روش کنترلی برای STATCOM
۲۵	۲-۷-۳. مشخصه ولتاژ-جریان STATCOM
۲۶	۲-۷-۴. مدهای عملکرد STATCOM
۲۶	۲-۸. نتیجه گیری
۳۵-۲۷	۳- معرفی پایداری سیستمهای قدرت
۳۱-۲۷	۳-۱. پایداری و انواع مختلف آن
۲۸	۳-۱-۱. پایداری بر مبنای ورودی - خروجی (BIBO)
۲۸	۳-۱-۲. پایداری لیانفی
۲۸	۳-۲. پایداری در سیستمهای قدرت
۳۳-۳۲	۳-۳. روشهای پایدار سازی سیستمهای قدرت

۳۴-۳۳	۴-۳. مطالعات صورت گرفته جهت پایدار سازی به کمک UPFC
۳۵	۵-۳- نتیجه گیری
۵۳- ۳۶	۴- معرفی روش فازی مقاوم
۳۷	مقدمه
۳۹-۳۸	۴-۱. کنترل فازی مقاوم
۳۹	۴-۲- شرط پایداری
۴۳-۴۰	۴-۳- پایداری مقاوم
	۴-۴- مدل فازی تاگاکگی سوگنو و جبران توزیعی موازی
۴۴-۴۳	۴-۴-۱- مدل فازی تاگاکگی - سوگنو
۴۶-۴۵	۴-۴-۲- ساختار مدل فازی
۴۶- ۴۷	۴-۴-۳- غیر خطی ناحیه ای
۴۸	۴-۴-۴. تقریب محلی درفضاهای مجزاء فازی
۴۸	۴-۵- جبران توزیعی موازی
	۴-۶- اصول طراحی بر اساس LMI
۵۱-۴۹	۴-۶-۱- طراحی کنترل کننده پایدار با استفاده از روش تکرار
۵۳-۵۱	۴-۷. طراحی کنترل کننده پایدار بوسیله نامساویهای ماتریس خطی (LMI)
۸۸-۵۴	۵- اعمال روش فازی مقاوم بر کنترل کننده یکپارچه توان
۵۸-۵۵	۵-۱. مدل سازی
۵۷-۵۵	۵-۱-۱. مدل سازی کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)
۵۹-۵۸	۵-۱-۲. مدل سازی ژنراتور و خطوط
۵۹	۵-۲. شبیه سازی خطا (اغتشاش) در سیستم
۶۱-۵۹	۵-۳. الگوریتم کار و مراحل اعمال کنترل کننده
	۵-۴. حالت تک ماشین باس بینهایت
۶۲-۶۵	۵-۴-۱. بدست آوردن نقطه تعادل
۶۸-۶۵	۵-۴-۲. خطی سازی معادلات
۶۸	۵-۴-۳. طراحی فیدبک حالت برای هر دو حالت بهره برداری

۶۹-۶۸	۴-۴-۵. طراحی فازی تاکاگی - سوگنو
۷۳-۶۹	۵-۴-۵. شبیه سازی و نتیجه گیری ۵-۵. طراحی برای حالت چند ماشینه
۷۹-۷۶	۱-۵-۵. مدل سازی بخشهای مختلف سیستم قدرت
۸۱- ۷۹	۲-۵-۵. شبیه سازی معادلات دینامیکی ژنراتور ها
۸۲-۸۱	۳-۵-۵. الگوریتم تحلیل سیستم قدرت
۸۲- ۸۳	۴-۵-۵. روش تحلیل سیستم چند ماشینه
۸۷- ۸۴	۵-۵-۵. نتایج شبیه سازی
۸۸	۶-۵. نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۹	۶- نتیجه گیری
۹۲-۹۰	۷- مراجع



مقدمه

با گسترش نیاز روز افزون صنایع به انرژی الکتریکی و با توجه به کاربردهای عمده آن و پراکندگی منابع تولید و مصرف، شبکه های به هم پیوسته جهت انتقال و توزیع انرژی الکتریکی گسترش یافته اند. صنعت برق در سالیان اخیر با مبحث تجدید ساختار و تجزیه ساختار به عمودی به واحدهای جدا از یکدیگر و خصوصی سازی مواجه است که در نتیجه این پدیده، انرژی الکتریکی به عنوان یک کالا مطرح می شود.

کلیه عوامل فوق لزوم ایجاد یک شبکه مطمئن با کارایی بالا را طلب می کند. یکی از مهمترین مشخصه های یک سیستم با عملکرد مطلوب مبحث پایداری می باشد که برای نیل به این هدف و دیگر مشخصه های مطلوب لازم است کنترل کننده های مناسبی برای سیستم طراحی گردد. برای سیستم قدرت تجهیزات کنترلی متعددی را می توان در نظر گرفت که از آن جمله می توان به پایدار سازهای سیستم قدرت، ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر و گاورنر در شبکه اشاره کرد.

از این تجهیزات به منظور کمک در بهره برداری در حالت مانای سیستم و همچنین به عنوان کنترل کننده استفاده می گردد. مقالات متعددی در زمینه جایابی بهینه^۱ این تجهیزات کنترلی، انتخاب روش مناسب جهت کنترل آنها^۲ و هماهنگی^۳ این تجهیزات نوشته شده است [36-48].

پس از بیان مقدمه، در فصل دوم این پایان نامه به معرفی اجمالی ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر^۴ می پردازیم.

با توجه به کاربردهای وسیع یکی از این ادوات به نام کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) در مقایسه با دیگر تجهیزات کنترلی، در این پایان نامه از آن به عنوان کنترل کننده در سیستم قدرت استفاده شده است.

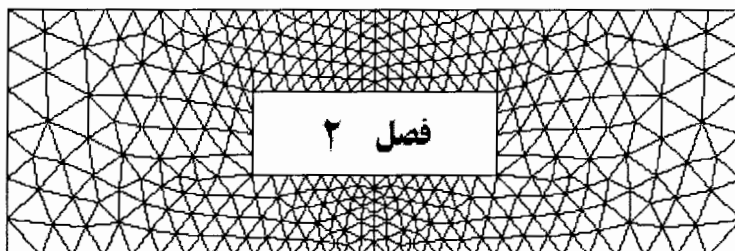
در فصل سوم مبحث پایداری را در سیستم قدرت مورد بررسی قرار می دهیم و پس از تعاریف اجمالی و بیان انواع طبقه بندی های مبحث پایداری روشهای کنترلی به کار گرفته شده جهت دستیابی به یکی از مهمترین انواع پایداری در زمینه میرا نمودن نوسانات فرکانس پایین (low frequency oscillation) بر کنترل کننده یکپارچه توان ارائه خواهد شد.

همانطور ملاحظه خواهید کرد این روشها دارای کاستی هایی از قبیل پیچیدگی روش کنترل، مقاوم و بهینه نبودن و عدم تضمین پایداری مجموعه سیستم کنترل غیر خطی (سیستم قدرت و کنترلر آن UPFC) خواهد بود از این رو روش کنترلی جدیدی به نام «کنترل کننده فازی مقاوم از طریق جبران ساز توزیعی موازی» مطرح خواهد شد.

در فصل ۴ این شمای کنترلی پیشنهادی معرفی می گردد. اعمال این روش جدید بر سیستمهای غیر خطی نمونه نشان می دهد که این روش می تواند نقیصه های متداول مطرح شده را برطرف سازد [35-21] از این رو این کنترل کننده به عنوان شمای تازه ای از روشهای کنترلی برای سیستم قدرت مطرح گردیده است.

نتایج شبیه سازی و اعمال این استراتژی نوین به کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) بر روی سیستم تک ماشین باس بینهایت و سیستم چند ماشینه که در فصل ۵ آمده است این ادعا را تایید می کند.

در فصلهای ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات جهت انجام کارهای بعدی بیان خواهند شد.



معرفی ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر (FACTS)

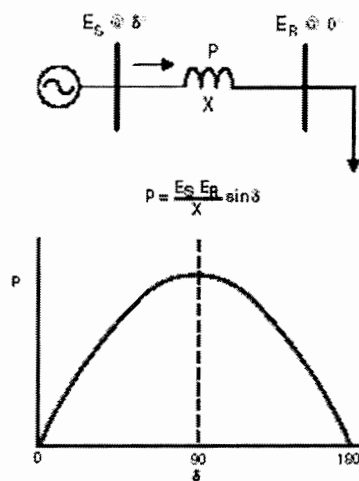
مقدمه

با پیشرفت گسترده و افزایش استفاده از انرژی الکتریکی در صنایع، نیاز به تغییرات گسترده در سیستم‌های برق بسیاری از کشورها احساس شد که دلیل عمده این امر، افزایش فوق‌العاده بار شبکه‌های برق می‌باشد. به همین دلیل مدیریت انرژی برق در بالاترین سطح تکنولوژی و مهندسی خود مورد توجه و عملاً به عنوان یک کالای تجاری و یک سرمایه اقتصادی کلان مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش بار سیستم‌های انتقال انرژی با مسائلی همچون پایداری و نیز محدودیت‌های حرارتی عبور جریان روبرو شده و برای تحویل انرژی با کیفیت مناسب، باید این مسائل را به حداقل و پایداری را در سیستم انتقال به حداکثر میزان ممکن رساند. امروزه، بیش از پیش تکنولوژی‌های پیشرفته‌تر برای بهره برداری مطمئن از سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر برای اینکه در سیستم‌های قدرت هم به کارایی مطمئن و عملی و هم به سود اقتصادی بیشتر دست یابیم لازم است که سیستم‌های کنترلی دقیق و با کارایی بالاتری در شبکه مورد استفاده قرار گیرد، تا مشکلات سیستم انتقال را به حداقل خود برساند. به عبارت دیگر، بهتر کردن عملکرد سیستم قدرت موجود با استفاده از سیستم‌های کنترل پیشرفته تر قابل انجام است.

ادواتی که بر پایه الکترونیک قدرت ساخته شده‌اند، امروزه برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ادوات که به سیستم‌های FACTS مشهور شده‌اند، امکان بهبود انتقال انرژی را با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری ممکن و نیز امکان کنترل سریع مشکلات سیستم قدرت را فراهم آورده اند [1-10].

۲-۲. قابلیت کنترل سیستم قدرت:

برای مشخص کردن نحوه پایداری سیستم‌های قدرت و مقدار تغییرات مجاز آن نمودار توان - زاویه ، (شکل ۱-۲) را در نظر بگیرید [3].



شکل (۱-۲): نمودار توان - زاویه

از این نمودار و نیز اعمال مفهوم پایداری بر روی آن مشخص می‌شود که بررسی سه نکته برای پایداری سیستم مهم است :

- ولتاژ
- زاویه
- امپدانس خط

با کنترل این سه پارامتر، بطور مستقیم می‌توان پایداری سیستم را کنترل نمود. پس از مشخص نمودن پارامترهایی که باید برای کنترل بکار گرفته شوند سوال اساسی نحوه کنترل آنهاست که پاسخ به این سوال در دو بخش قابل ارائه است.

۱.کنترل کلاسیک: مثالهایی از ادواتی که برای کنترل کلاسیک سیستمهای قدرت استفاده می‌شود عبارتند از:

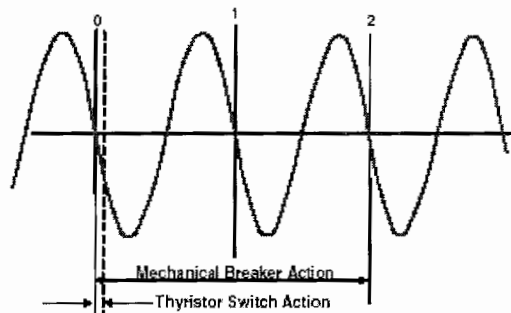
- خازنهای سری (برای کنترل امپدانس)
- سویچ کردن خازن‌ها و سلف‌های موازی (برای کنترل ولتاژ)
- ترانسفورماتور شیف‌دهنده فاز (برای کنترل زاویه)

۲. استفاده از عناصر الکترونیک قدرت: مثالهایی از کنترلرهای FACTS مورد استفاده در

سیستم‌های قدرت عبارتند از:

- جبران‌ساز استاتیک حالت سنکرون (STAT COM): کنترل ولتاژ
- جبران‌ساز استاتیک توان راکتیو (SVC): جهت کنترل ولتاژ
- کنترل‌کننده یکپارچه توان (UPFC): کنترل توان اکتیو و راکتیو

همانگونه که بیان شد کلید حل مسایل سیستم‌های قدرت آنالیز کامل سیستم می باشد که لازمه این کار مقایسه مزایا و فواید استفاده از سیستم‌های کنترل کلاسیک و سیستم‌های ادوات FACTS می باشد.



شکل (۲-۲): نمایشی از شکل موج ولتاژ در فرکانس نامی سیستم

مزیت های مطرح شده برای ادوات FACTS عبارتند از:

- ۱) مسایل اقتصادی
- ۲) مسایل کلیدزنی

شکل (۲-۲) نمایشی از شکل موج ولتاژ در فرکانس نامی سیستم است. این شکل نشان می‌دهد که سرعت سویچ کردن مکانیکی (در بریکرهای خطوط) برای سیستم‌های کنترل کلاسیک برابر چند سیکل ولتاژ در فرکانس شبکه قدرت (50-60Hz) است. این سرعت سویچ کردن می‌تواند برای رفع بعضی از مشکلات و محدودیت‌های شبکه مناسب و کافی باشد.

با توجه به این مطلب، استفاده از راه‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت و کلیدها و سویچ‌های الکترونیک قدرت، سرعت را بسیار افزایش می‌دهد. شکل (۲-۲) نشان می‌دهد که سرعت کلید در این حالت کسری از یک سیکل است. بر همین اساس مهمترین مزیت استفاده از کنترلرهای FACTS، برگشت‌پذیر بودن در یک سیکل و نیز کنترل سریع و یکنواخت و هموار (Smooth control) آنهاست که این بدلیل استفاده از عناصر الکترونیک قدرت است. به عبارت دیگر یک راه حل کنترلی وابسته به سویچینگ مکانیکی (کنترل کلاسیک) معمولاً در هر قطع و وصل یک اثر سویچینگ (قطع و وصل)، در حالتی که لازم است برای پایداری سیستم شروع به کار کنند، به سیستم اعمال می‌کند. در نتیجه ادوات مبتنی بر سیستم‌های الکترونیک قدرت می‌توانند یک گزینه کنترلی هموار، پیوسته و تکرار شونده برای سیستم‌های قدرت باشند.

در این بخش بصورت کلی به بیان برخی نکات مهم در مورد عناصر FACTS می‌پردازیم:

۱) توانایی سیستم قدرت در حفظ پایداری تا حد زیادی به میرا کردن نوسانات الکترومکانیکی بوسیله کنترلرهای موجود روی سیستم قدرت می‌باشد. مطالعات و تحقیقات قابل ملاحظه‌ای جهت افزایش میرایی و پایداری سیستم‌های قدرت بر روی کنترل‌کننده‌های تحریک ژنراتور صورت گرفته است که یکی از این کنترل‌کننده‌ها پایدارساز سیستم قدرت PSS می‌باشد این نوع پایدارسازها بر روی مدهای بین ناحیه‌ای موثر نمی‌باشند. با ظهور ادوات FACTS نوع دیگری از کنترل‌کننده‌هایی که توانایی میرا کردن مدها بین ناحیه‌ای دارند مورد استفاده قرار گرفتند.

۲) ادوات FACTS با افزایش ظرفیت خطوط انتقال و حذف محدودیت‌های خطوط باعث می‌شود که نیاز به ایجاد خطوط جدید که بسیار هم پرهزینه هستند برطرف شود. یعنی در واقع بدون احداث خطوط جدید می‌توان از ظرفیت واقعی سیستم انتقال استفاده کرد.

۳) با ظهور قطعات نیمه هادی در سطح ولتاژ و توان سیستم قدرت که قابلیت خاموش و روشن شدن زیر بار را هم دارند (از قبیل GTO و IGBT) تحول دیگری در سیستم‌های انتقال انرژی رخ داد که عمده‌ترین آنها استفاده از مبدل‌های منبع ولتاژ می‌باشد. مهمترین مشخصه این مبدل، تولید و جذب توان راکتیو بدون استفاده از عناصر مولد و یا جاذب توان راکتیو از قبیل خازن و یا راکتور می‌باشد. کلیه ادوات FACTS که با استفاده از مبدل‌های منبع ولتاژ ساخته شده‌اند به نام نسل جدید ادوات FACTS نامیده می‌شوند. علت این نامگذاری، به خاطر مشخصات برجسته این ادوات نسبت به ادواتی است که با تریستور کار می‌کنند. با استفاده عملی از کنترل‌کننده‌های الکترونیکی بسیار سریع، این تکنولوژی چند فرصت و موقعیت مفید را برای افزایش کارایی سیستم انتقال ایجاد می‌کند که عبارتند از:

فصل ۲.....معرفی ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر

الف) کنترل بیشتر توان: می توان توان بیشتری از خطوط موجود عبور داد.

ب) تامین بار توسط خطوط انتقال با نزدیکترین سطح ممکن به قيود حرارتی خطوط .

ج) توانایی بیشتر انتقال توان بین نواحی (مناطق) کنترل شده، به گونه ای که حاشیه تولید رزرو (Generation reserve margin) که نوعاً ۱۸٪ است تا حدود ۱۵٪ کاهش می یابد.

د) جلوگیری از قطع برق پشت سر هم (Cascading outage) بوسیله محدودسازی اثر خطاها و عملکرد ناموفق تجهیزات.

ه) از بین بردن نوسانات سیستم قدرت که می تواند باعث تخریب و آسیب تجهیزات و یا محدود کردن ظرفیت معمولی انتقال شود.

۴) فواید و مزایای سیستمهای الکترونیک قدرت در برابر قیمت و هزینه آنها بسیار بیشتر است.

۵) ادوات FACTS خواص زیر را در سیستم های قدرت به نمایش می گذارند:

الف) جبران سازی دینامیک توان راکتیو و کنترل ولتاژ را فراهم می آورند.

ب) نیاز به ایجاد خطوط انتقال ، خازنهای، راکتورها و سایر تجهیزات انتقال را کاهش می دهند ، که بدین وسیله :

- نگرانی های تنظیم و کنترل را کاهش می دهند.
- از لحاظ فضای اشغال شده و توجه به امور ساختمانی نیز بدلیل حجم مناسب آنها فوایدی را به همراه خواهند داشت.
- پایداری سیستم را بهبود خواهند بخشید.
- توان انتقالی اکتیو و راکتیو را کنترل می کنند.
- عوامل ایجاد کننده مسایل تشدید زیر سنکرون را تخفیف خواهند داد.

۲-۳. معرفی انواع عناصر FACTS

در این بخش بعضی از مهمترین ادوات FACTS و نیز مشخصات اجرایی آنها مورد بحث قرار می‌گیرد .

مهمترین عنصر FACTS بکار رفته در صنعت UPFC است که بصورت سری- موازی به سیستم قدرت متصل می‌گردد. سپس به بررسی TCSC می‌پردازیم که در سیستم های قدرت به صورت سری متصل می‌گردد و در نهایت به بررسی عناصر جبران ساز موازی SVC و STATCOM خواهیم پرداخت. هر کدام از این عناصر برای یک یا چند عملکرد خاص مفید تر هستند که این مطلب در جدول (۱-۲) نمایش داده شده است. به عنوان مثال از جدول (۱-۲) بدست می‌آید که بهترین عنصر برای کنترل پخش بار عنصر UPFC می‌باشد در حالی که SVC برای این کار از قابلیت بالایی برخوردار نیست..

	پخش بار	کنترل ولتاژ	پایداری گذرا	پایداری دینامیکی
SVC	●	● ● ●	●	● ●
STATCOM	●	● ● ●	● ●	● ●
TCSC	● ●	●	● ● ●	● ●
UPFC	● ● ●	● ● ●	● ●	● ●

جدول (۱-۲):خواص مفید انواع ادوات FACTS

همچنین در جدول (۲-۲) نیز برخی عناصر FACTS و کاربردهای آنها نشان داده شده است

قابلیتها	نوع ادوات FACTS
کنترل ولتاژ، جبران توان راکتیو، میرایی نوسانات	SVC(Static VAR Compensator)
کنترل توان، کنترل امپدانس سری، میرایی نوسانات	TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)
کنترل توان، کنترل امپدانس سری، میرایی نوسانات	TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)
کنترل ولتاژ، جبران توان راکتیو، میرایی نوسانات، پایداری گذرا	Static Condenser(Statcom)
کنترل توان، کنترل زاویه فاز، میرایی نوسانات، پایداری گذرا	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
کنترل توان، جبران سازی توان راکتیو، کنترل ولتاژ، کنترل زاویه فاز، میرایی نوسانات، پایداری گذرا	UPFC (Unified Power Flow Control)
میرایی نوسانات، پایداری گذرا	Thyristor controlled Dynamic Brake
محدود سازی اضافه ولتاژهای دینامیکی	Thyristor controlled Dynamic Voltage Limiter

جدول (۲-۲): معرفی بعضی از عناصر FACTS و قابلیت‌های آنها

از این رو با توجه به قابلیت‌های بسزای UPFC که در جداول (۲-۲) و (۱-۲) مشاهده می‌گردد در این پایان نامه روش کنترلی فازی مقاوم بر روی آن اعمال شده است.

۲-۴. کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)

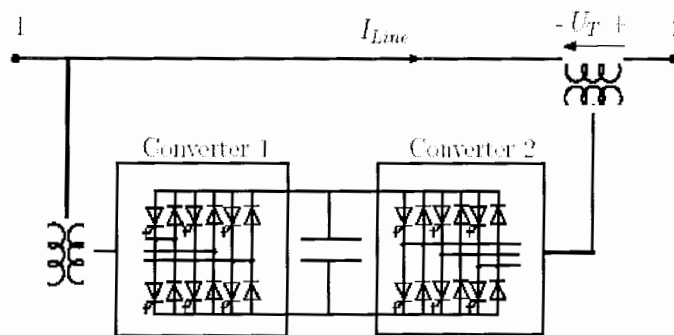
مقدمه

کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) یکی از قوی‌ترین ادوات انعطاف‌پذیر انتقال (FACTS) ac می‌باشد که توانایی کنترل امپدانس خط انتقال، زاویه فاز و توان راکتیو را دارد. [5,16] ساختار UPFC برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط Gyugi پیشنهاد شد. پس از آن توسط محققین مختلف مدل‌های ریاضی مناسب جهت شبیه‌سازی عملکرد این عنصر پیشنهاد شده است. اولین نمونه صنعتی UPFC با

قدرت $160 \text{ MVA} \pm$ در سال ۱۹۹۸ با همکاری شرکت بوک آمریکا (AEP) و Westinghouse ساخته و در یک شبکه 138 KV نصب شد.

۲-۴-۱. ساختار و نحوه عملکرد UPFC

UPFC متشکل از دو منبع ولتاژ اینورتری با سویچ GTO است که یکی از آنها توسط یک ترانس موازی و دیگری توسط یک ترانس سری به شبکه قدرت متصل می‌شود. دو اینورتر از قسمت dc توسط یک خازن که به عنوان اتصال dc بکار می‌رود بهم متصل هستند. در شکل (۲-۳)، UPFC بصورت یک شاخه سری و یک شاخه موازی قابل توصیف است که هر شاخه به شکل مستقل قابلیت تولید یا جذب توان راکتیو را دارد. این ساختار اجازه می‌دهد که توان حقیقی بتواند به راحتی و در هر دو جهت بین سرهای ac دو مبدل جاری شود. عملکرد مبدل موازی به گونه‌ای است که توان حقیقی شاخه سری را تامین و یا جذب می‌کند این قسمت از طریق یک ترانسفورماتور موازی به شبکه متصل است. در صورت لزوم این شاخه می‌تواند توان راکتیو تولید و یا جذب نماید که در این صورت جبران توان راکتیو مستقل برای خط انتقال فراهم می‌آید.



شکل (۲-۳): شمای توصیفی UPFC

مبدل سری با تزریق ولتاژی که دامنه و فاز آن کنترل شده است، عملکرد اصلی UPFC را شکل می‌دهد. عبور جریان خط انتقال از این منبع ولتاژ باعث مبادله توان اکتیو و راکتیو بین UPFC و شبکه قدرت می‌شود. توان حقیقی مبادله شده توسط مبدل موازی و از طریق خازن dc تامین می‌گردد و توان راکتیو مبادله شده مستقلاً توسط مبدل سری تولید می‌شود.

از دید کنترلی UPFC می‌تواند به صورت دو بخش (شاخه) مجزا در نظر گرفته شود. بخش موازی که شامل ترانسفورماتور موازی، اینورتر منبع ولتاژ و خازن dc همانند یک STATCOM عمل می‌کند و بخش سری شامل ترانس سری، اینورتر، منبع ولتاژ و خازن dc است که به عنوان یک SSSC رفتار می‌کند. این بدین معنی است که UPFC عملاً ترکیب دو عنصر STATCOM و SSSC است.

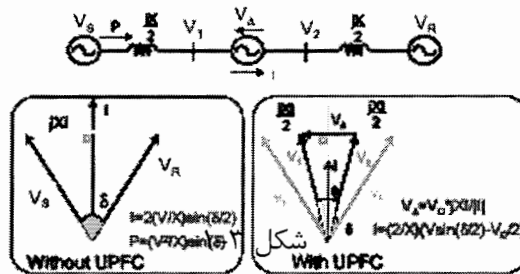
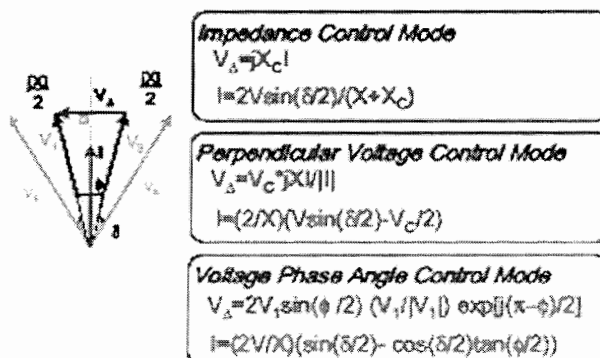


Figure 11. UPFC operation

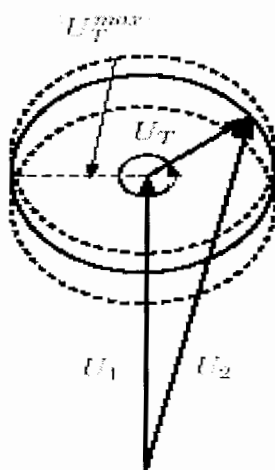
شکل (۲-۴): شمای ترکیبی UPFC

مهمترین عملکرد بخش سری UPFC آن است که یک ولتاژ با اندازه و زاویه آن قابل کنترل را تولید می‌کند و آنرا در فرکانس سیستم از طریق ترانسفورماتور سری به خط انتقال تزریق می‌کند، که مقدار زاویه این ولتاژ مستقل از جریان خط می‌تواند بین 0 تا 2π و اندازه ولتاژ می‌تواند بین 0 تا U_m تغییر نماید. اینورتر سری از ترمینال ac خود توان اکتیو و راکتیو از خط انتقال جذب و یا به آن تزریق می‌کند و در واقع با خط انتقال به تبادل توان اکتیو می‌پردازد. این ولتاژ سری به روشهای متفاوتی شناسایی می‌شود به عبارت دیگر بر اساس خواسته های زیر ولتاژ سری را تولید می‌کنیم (شکل ۲-۵). [16]



شکل (۲-۵): مدهای کنترلی جبران‌ساز سری

- (۱) **مد ولتاژ تزریقی مستقیم:** مقدار ورودی مرجع در این حالت اندازه و فاز ولتاژ سری است.
- (۲) **مد شیفت زاویه:** مقدار مرجع در این حالت اختلاف زاویه بین ولتاژ در سر ورودی و سر خروجی دستگاه است. یعنی هدف ایجاد این اختلاف زاویه است.
- (۳) **مد امیدانس خط:** ورودی مرجع در این حالت مقدار امیدانسی است که باید بصورت سری با امیدانس خط قرار گیرد.
- (۴) **مد کنترل اتوماتیک توان عبوری:** مقدار مرجع در این حالت توان اکتیو و راکتیوی است که می خواهیم از سیستم انتقال عبور کند. اینورتر موازی توان راکتیو مورد نیاز را تهیه (تولید) می کند، بنابراین توان حقیقی به آسانی از بین ترمینال های ac کنورتر سری و موازی از طریق خازن dc متصل کننده، جریان می یابد و توان راکتیو مستقلا توسط هر اینورتر تولید و یا جذب می شود. شکل (۶-۲) نمودار فازوری ولتاژ UPFC را نمایش می دهد که در آن ناحیه عملکرد یک دایره با شعاع U_m است و مرکز آن با تغییر مقدار U_1 قابل تغییر است.



شکل (۶-۲): نمودار فازوری ولتاژ UPFC

ساختار مداری، شبیه به یک کانورتر قدرت AC-DC عمل می کند به گونه ای که توان حقیقی از هر دو جهت در بین ترمینالهای AC آن منتقل شود و هر کدام از اینورترها می توانند در ترمینالهای خود توان راکتیو جذب و یا تولید کنند. بدلیل مشخصات ذاتی و یکتای UPFC در کنترل مستقل توان های اکتیو و راکتیو این تجهیز می تواند برای تولید و یا جذب توان اکتیو محلی، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مورد نظر است که

توان عبوری از خط را با تغییر مقدار اندازه ولتاژ و یا شیفت (تغییر) فاز ولتاژ سنکرون تزریقی سری، کنترل کند. این نحوه کنترل به مد کنترلی اتوماتیک ولتاژ برای اینورتر شنت و مد کنترل اتوماتیک پخش بار اینورتر سری برمی گردد. از آنجا که UPFC می تواند مورد نظر را چه در حالت کار دائم و چه در حالت شرایط دینامیکی از خط عبور دهد، مد کنترل پخش بار اتوماتیک برای میرایی نوسانات توان شبکه مورد استفاده قرار می گیرد. [43,20].

۲-۴-۲- روشهای کنترل توان در UPFC

UPFC با تغییر فازور ولتاژ تزریقی امکان کنترل عبور توان را به طرق مختلفی فراهم می آورد. با کنترل مناسب فازور ولتاژ می توان به روشهای معمول کنترل عبور توان و یا ترکیبی از آنها دست یافت که به آنها اشاره می کنیم:

۱- کنترل و یا تنظیم ولتاژ ترمینال :

UPFC می تواند کنترل یا تنظیم ولتاژ ترمینال را مانند یک ترانسفورماتور دارای تغییر دهنده تپ با پله های بسیار کوچک انجام دهد . که در این حالت ولتاژ تزریقی هم فاز (و یا در فازمتقابل) با ولتاژ خط است.

۲- جبران سازی :

UPFC می تواند جبران سری نیز انجام دهد که در این حالت ولتاژ تزریقی بر جریان عمود است.

۳- شیفت فاز (تنظیم زاویه انتقال):

شیفت فاز بوسیله UPFC در حالتی است که ولتاژ تزریقی با زاویه مورد نظر اعمال می شود و ولتاژ خط را تغییر فاز می دهد اما دامنه آن تغییر نمی یابد.

۴- کنترل عبور توان با چند روش :

UPFC می تواند همزمان به چند روش عبور توان را کنترل کند. بدین گونه که با تنظیم ولتاژ ترمینال ، جبران سری خط و تنظیم زاویه شیفت فاز انجام می شود.

مجموعه بالا را می توان در مد عملکردی UPFC خلاصه نمود . بدین ترتیب که UPFC دو مد مختلف عملکرد دارد:

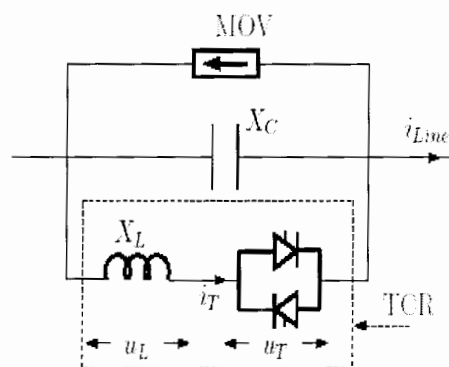
۱) مد کنترل توان راکتیو: در این حالت هدف این است که UPFC یک توان راکتیو خازنی و یا اندوکتیو به سیستم اعمال کند.

۲) مد کنترل اتوماتیک ولتاژ: در این مد هدف این است که ولتاژ خط را در یک مقدار دلخواه ثابت نگه داریم.

۲-۵- معرفی ساختار TCSC

TCSC در واقع گسترش یافته شده روش خازن گذاری سری در خط است که در این حالت خازن مورد نظر بایک راکتور قابل تنظیم توسط کلیدهای تریستوری موازی می گردد. TCSC می تواند به شکل پیوسته امپدانس خط را از مقداری بیشتر از امپدانس واقعی تا کمتر از آن تغییر دهد. به عبارت دیگر، اضافه کردن TCSC به معنای اضافه کردن یک امپدانس متغیر به مقداری بالاتر از امپدانس مثبت طبیعی خط است که پس از نصب TCSC با دریافت سیگنال کنترلی به سرعت خازن و یا اندوکتانس را کاهش و یا افزایش می دهد.

TCSC اولین عنصر سری از ادوات FACTS بود که مورد استفاده قرار گرفت. بخش اصلی کنترلی آن یک راکتور قابل کنترل توسط تریستور (TCR) است. TCR توسط عناصر الکترونیک قدرت یک کنترل سریع را برای توان راکتیو ایجاد می کند.

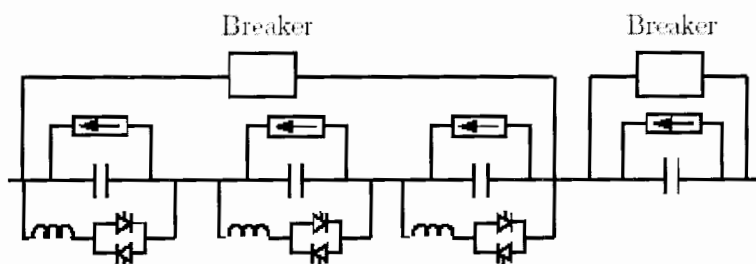


شکل (۷-۲). نمایش TCSC

مهمترین بخش قابل کنترل آن یک القاگر (سلف) ثابت است که با سویچ تریستوری دوجبهتی (bipolar) به شکل سری قرار گرفته است. بوسیله زاویه آتش تریستور مقدار موثر راکتانس اندوکتیو تغییر می یابد و باعث تبادل سریع توان راکتیو بین سیستم و TCR می گردد. بر اساس نیازهای شبکه ممکن است خاصیت های خازنی یا سلفی مورد نیاز باشد. به همین دلیل همانگونه که در شکل (۷-۲) نمایش داده شده است یک خازن با مقدار ثابت با بخش مربوط به TCR بشکل موازی قرار می گیرد. همچنین برای حفاظت در مقابل افزایش بیش از حد ولتاژ یک وریستور متال اکسید (MOV) به شکل موازی قرار داده شده است. هدف اساسی این است که امپدانس خط را هر چه سریعتر به مقدار مورد نظر تنظیم نماییم که این امر توسط تنظیم و کنترل مناسب TCSC انجام می پذیرد تا بدین

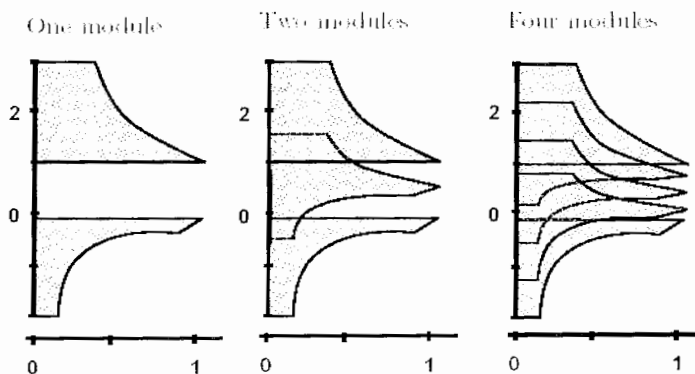
وسیله امکان افزایش توان عبوری از خط فراهم گردد. روشهای معمولی جبران سازی سری معمولا با کلیدزنی خازنها انجام می پذیرد ولی سویچینگ مکانیکی ، یک کنترل کند و غیر یکنواخت را به همراه دارد در حالی که کنترل با کلید های تریستوری یک کنترل سریع و پیوسته را برای تغییر امپدانس خط فراهم می آورد. مقدار جبران سازی بوسیله کاهش و یا افزایش پریود هدایت تریستور انجام می شود زاویه آتش کمتر از ۹۰ درجه کنترلی را بر جریان سلف اعمال نمی کند ضمن آنکه زاویه آتش بیش از ۱۸۰ درجه نیز مجاز نیست زیرا دو تریستور باید به شکل متقارن آتش شوند.

بخش قابل کنترل توسط تریستور ، معمولا شامل چند مدول از TCSC ها است که به شکل سری



شکل (۲-۸): تقسیم راکتانس TCSC به بخشهای مختلف

بهم متصل شده اند. که هر مدول به شکل مستقل کنترل می شوند. مهمترین فایده این تقسیم راکتانس TCSC به بخش های مختلف این است که راکتانس مجموع موثر TCSC می تواند به مقادیر وسیع تری یابد زیرا فاصله موجود در حالت کنترل با یک مدول در این حالت پوشانده می شود. که در شکل (۲-۹) این نکته نمایش داده شده است.



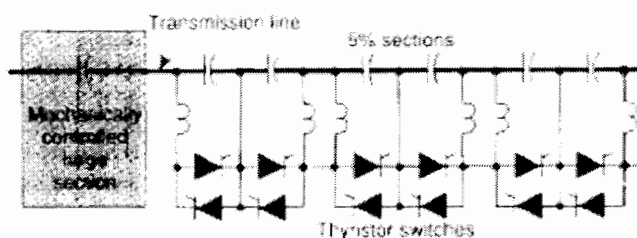
شکل (۲-۹): نمایش همپوشانی مدولها

پس TCSC با تغییر زاویه آتش می تواند مقدار راکتانس خود را به شکل سریع و یکنواخت تغییر دهد. TCSC میتواند با تنظیم توان عبوری از یک مسیر خاص باعث شود که ظرفیت عبوری از خط به حداکثر مقدار نامی خود نزدیک شود. همچنین بدلیل سرعت و قابلیت انعطاف پذیری تنظیمات آن، می تواند در بهبود حالت های گذرا و دینامیک سیستم قدرت و نیز در میرا کردن نوسانات با فرکانس پایین موثر باشد. TCSC می تواند کنترل امپدانس، کنترل توان و کنترل جریان عبوری را با فرمان راه دور و یا توسط سیستم SCADA انجام دهد.

۲-۵-۱. یک نمونه عملی [5]

در اکتبر ۱۹۹۲ شرکت WAPP نخستین TCSC سه فاز را مورد استفاده قرار داد که توسط شرکت زیمنس آلمان ساخته شده بود و بر روی یک خط با طول 300 Km و ولتاژ 230 Kv و ظرفیت 300 MVA نصب گردید این TCSC شامل سه بخش با یک خازنی سری 15Ω ، 40Ω و 55Ω بود که فقط بخش بانک خازنی 15Ω (45 MVA) توسط تریستور کنترل می شد این نصب یک گام ابتدایی و هموارکننده مسیر بود، زیرا بانک 15Ω می توانست به سرعت و به صورت یکنواخت و هموار بین $15-60\Omega$ بر اساس زاویه آتش تریستور کنترل شود. TCSC نصب شده باعث می شد که ظرفیت خط انتقال از 300 MVA به 400 MVA افزایش یابد.

TCSC پیشرفته دیگری توسط GE برای EPI طراحی و ساخته شده که هر فاز آن شامل یک صفحه (سکو) بود که از 6 مدول خازن مشابه متصل شده سری تشکیل شده بود، کدام 1.33Ω ، به



شکل (۲-۱۰): شمایی از TCSC

همراه یک سویچ تریستوری با اتصال موازی و سری با سلف های 0.2Ω (شکل ۲-۱۰) هر مدول می توانست به آسانی و به شکل هموار توسط زاویه آتش کنترل شود. زمانی که تریستور مدول خازن کاملا متصل شده است مقدار معادل خازن متصل شده موازی ($1/33\Omega$) و سلف $25/2\Omega$ برای

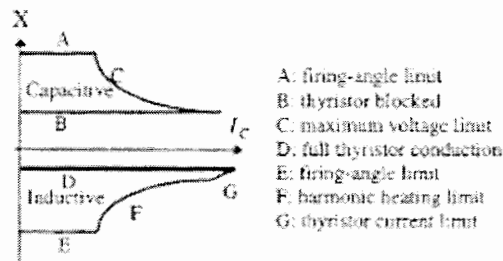
فصل ۲..... معرفی ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر

مقدار 0.24Ω می‌شود. در این TCSC مشاهده می‌شود که امپدانس کلی تقریباً بین $41/4 \Omega$ تا 16Ω قابل کنترل است. (مقدار بزرگتر زمانی بدست می‌آید که زاویه آتش مناسب، با ترکیب زوایای آتش بدست آید.) TCSC نصب شده جریان خاصی برابر $2900A$ و مقدار خاصی اضافه بار $4350A$ برای 30 min و یا $5800 A$ برای 10 sec و جریان اتصال کوتاه با مقدار متوسط 20000 را تحمل می‌نمود.

۲-۵-۲- مدل سازی و روابط حاکم بر TCSC

در مرجع [2] بیان شده است که امپدانس معادل TCSC از رابطه زیر قابل محاسبه است:

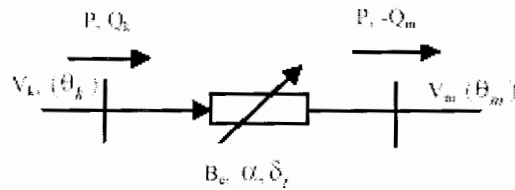
$$X_c = \frac{X_C X_L}{X_C / \pi [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] - X_L}$$



شکل (۲-۱۱): محدوده راکتانس TCSC

به ازاء مقدار خاصی از زاویه آتش ممکن است پدیده تشدید اتفاق بیفتد، که این مقدار وابسته به نسبت $r_x = X_c / X_L$ است که مقادیر مختلف r_x باعث پدید آمدن نقاط متفاوت تشدید می‌شوند. باید از این نوسانات دوری نمود تا از وقوع مشکلات مربوط به هارمونیک‌ها و نیز بوجود آمدن جریانهای داخلی بزرگ که می‌تواند به دستگاهها وسیستم آسیب عمده برساند جلوگیری شود.

برای بررسی نحوه عملکرد TCSC در مدارشکل (۲-۱۲) فرض کنید که TCSC بین باسهای K و m متصل شده اند، مدل مورد نظر برای این وسیله را بدون تلفات در نظر می‌گیریم، لذا توان اکتیو P تزریق شده به TCSC از باس k برابر توان خروجی از وسیله به سمت باس m می‌باشد.



شکل (۲-۱۲): مدل تزریقی TCSC

مدل TCSC توسط معادلات زیر بیان می شود:

۲-۵-۳- مدهای کنترلی

مدهای کنترلی توسط هر یک از معادلات زیر مشخص شود:

$$\begin{aligned}
 -V_k V_m B_c \sin(\theta_k - \theta_m) - P &= 0 \\
 -V_k^2 B_c + V_k V_m B_c \cos(\theta_k - \theta_m) - Q_k &= 0 \\
 -V_m^2 B_c + V_k V_m B_c \cos(\theta_k - \theta_m) - Q_m &= 0 \\
 \frac{1}{X_c} - \frac{(2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)}{\pi V_k} - B_c &= 0 \\
 \sqrt{P^2 + Q_k^2} - H_k &= 0 \\
 \theta_k - \theta_m - \delta_t &= 0
 \end{aligned}$$

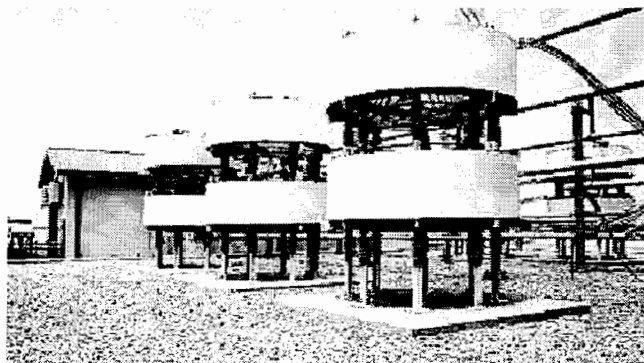
(۱) کنترل راکتانس ثابت ($X_{set} - X_e = 0$)

(۲) کنترل توان ثابت ($P_{set} - P = 0$)

(۳) کنترل جریان ثابت ($I_{set} - I = 0$)

(۴) کنترل زاویه ثابت ($\delta_{set} - \delta_t = 0$)

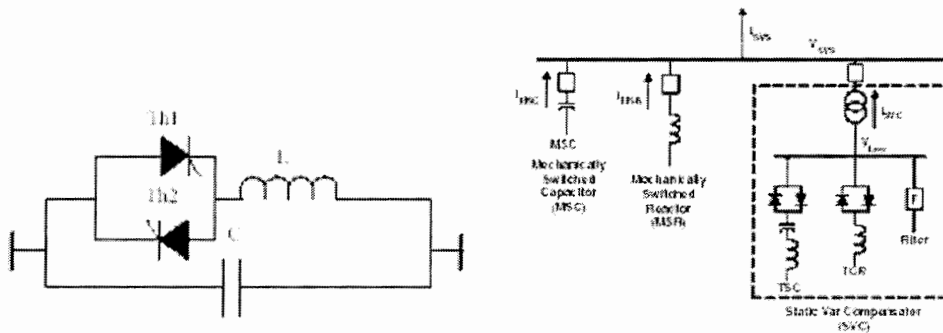
۲-۶- جبران ساز استاتیکی توان راکتیو (Static Var Compensator)



شکل (۲-۱۳) شمایی از SVC نصب شده

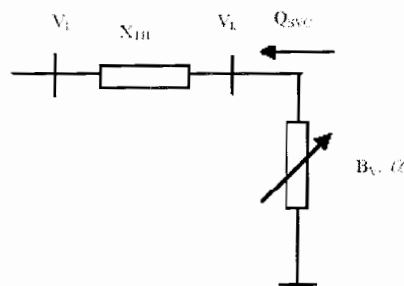
۲-۶-۱- تاریخچه و ساختار

SVC که برای اولین بار در اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفت ، یکی از ادوات جبران کننده توان راکتیو است که بصورت شنت در مدار قدرت قرار می گیرد. SVC برای رفع مشکلات حالت پایداری و محدود کردن دینامیک (تغییرات) ولتاژ و چند کاربرد دیگر مورد استفاده قرار گرفته ولی توانایی کنترل توان اکتیو را ندارد. SVC از کلیدهای ترستوری برای قطع و وصل سریع راکتورها و یا خازن‌های موازی استفاده می‌کند. اولین کاربرد SVC در کنترل ولتاژ در سال ۱۹۷۷ توسط شرکت جنرال الکتریک ارائه شد، SVC دیگری برای کنترل ولتاژ و پایداری توسط مرکز EPI (Electric Power Industry) و گروه الکتریکی وستینگ‌هاوس ارائه شد که در سال ۱۹۷۸ در سیستم روشنایی و قدرت مینیستوتا مورد استفاده قرار گرفت. همچنین شکل (۲-۱۳) یک مدل جدیدتر آن را نمایش می دهد که دارای رنج عملکرد بین 250 MVAR- خاصیت اندوکتیو تا 80 MVAR خاصیت کاپاسیتیو می باشد و در سال ۲۰۰۳ توسط شرکت ABB ساخته شده است .



شکل (۲-۱۴): اجزای مداری SVC

شکل (۲-۱۶) شمای مداری SVC



شکل (۲-۱۵): SVC در شبکه

قابلیت تنظیم بالا و سرعت زیاد SVC، آنرا به یکی ادوات قدرتمند در کنترل حالت های گذرای ولتاژ در مقایسه با ادوات جبران ساز شنت قدیمی تبدیل نموده است. SVC همچنین در میراسازی نوسانات توان، بهبود پایداری گذرا و کاهش توان تلفاتی سیستم با کنترل بهینه توان راکتیو نقش موثری را ایفا می کند. [1]

معمول ترین ساختار SVC شامل یک خازن همراه با یک راکتور قابل کنترل توسط تریستور است که شمای کلی آن در شکل (۲-۱۴) نمایش داده شده است. که همانند TCSC بخش TCR آن شامل یک راکتور و کلیدهای تریستوری دو طرفه است. همان کنترل کننده، تریستور است که با زاویه آتش بین ۹۰ تا ۱۸۰ درجه متناسب با ولتاژ خازن، عمل می کنند. روال کنترلی در حالت کار دایم شامل مشخصات جریان-ولتاژ آن است که در بخش بعدی نمایش داده شده است.

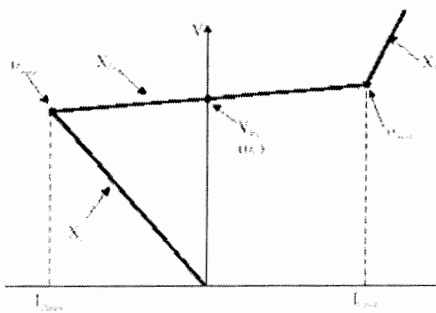
۲-۶-۲- مشخصات و نمودار مشخصه ولتاژ-جریان SVC

$$V = V_{REF} + X_{SL} I$$

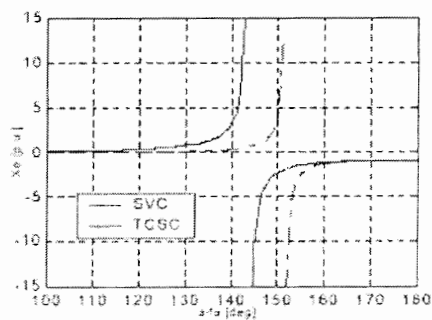
مقدار نامی برای X_{SL} که در واقع شیب نمودار مورد نظر است در حدود ۰،۰۲ تا ۰،۰۵، پیرونیته بر پایه مقایسه مبنای SVC است. این مقدار باید در مقابل تغییرات محدود ولتاژ شین، سیستم را حفاظت کند. در مواقعی که به قیود ولتاژ نزدیک می شویم SVC به یک راکتانس ثابت مبدل می شود. امیدانس معادل SVC را می توان با استفاده از فرمول زیر بدست آورد.

$$X_e = X_C \frac{\pi / f_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - 1/f_x)}$$

شکل (۲-۱۷) مقادیر مختلف امیدانس SVC را به ازاء مقادیر مختلف زاویه آتش و در حالی که نسبت X_e / X_L را برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است نمایش می دهد. SVC معمولاً از طریق یک ترانسفورماتور step down به سیستم انتقال متصل می شود.



شکل (۲-۱۸): مشخصه V-I مربوط به SVC



شکل (۲-۱۷): راکتانس معادل SVC و TCSC

شکل (۲-۱۸) نشان می دهد که تنظیم ولتاژ با شیب معلومی حول ولتاژ نامی در محدوده عملکرد SVC که توسط حداکثر جریانهای سلفی و خازنی تعیین می شود، قابل انجام است. حداکثر جریان خازنی و توان راکتیو مربوطه به طور خطی با ولتاژ سیستم کاهش می یابد زیرا پس از رسیدن به حداکثر خروجی خازنی، SVC در حکم یک خازن ثابت عمل خواهد نمود یعنی با کاهش ولتاژ سیستم، قدرت تقویت ولتاژ جبرانگرهای معمولی کنترل شده بوسیله ترستور سریعاً کاهش می یابد. معادلات زیر وضعیت یک SVC متصل به باس k و ولتاژ V_k را بیان می کند:

$$-V_{REF} - X_{SL} V_k B_e = 0$$

$$Q_{SVC} - V_k^2 B_e = 0$$

$$\pi X_C X_L B_e + \sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - X_L / X_C) = 0$$

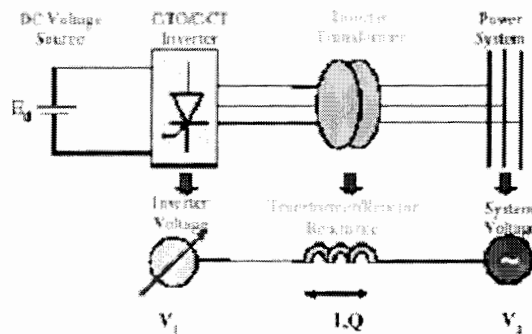
که در آن:

$$B_e = 1 / X_e$$

محدوده زاویه آتش در حالت کار پایدار بین ۹۰ تا ۱۸۰ درجه است. زاویه کمتر از ۹۰ مجاز نیست ، زیرا باعث بوجود آمدن جریان نامتقارن با مقادیر بزرگ مولفه DC می شود .

بدلیل مزایای اقتصادی زیاد ، SVCها اولین و گسترده ترین نوع از ادوات FACTS هستند که در تمام جهان مورد استفاده قرار می گیرند. این نکته وقتی اهمیت پیدا می کند که بدانیم بسیاری از این ادوات هنوز به شکل عمده مورد استفاده قرار نگرفته اند.

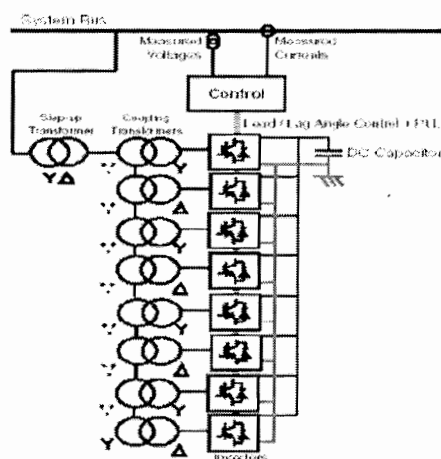
۲-۷- جبرانگر ایستای سنکرون STATCOM:



شکل (۲-۱۹): مدار STATCOM

۲-۷-۱. ساختار و تاریخچه:

STATCOM بطور موازی در خطوط انتقال قرار گرفته و می‌تواند توان راکتیو مورد نیاز (سلفی یا خازنی) را بطور دینامیکی و در حد توان خاص کانورتر تنظیم کند. کانورتر، جریانی را از خط می‌کشد که مولفه راکتیو این جریان بطور اتوماتیک برای تعادل توان راکتیو مورد نیاز خازن لینک dc و مولفه اکتیو جریان برای سطح مرجع مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. STATCOM شامل اینورتر و خازن در بخش DC خود، ترانسفورماتور کوپلینگ و یک بخش کنترل کننده است



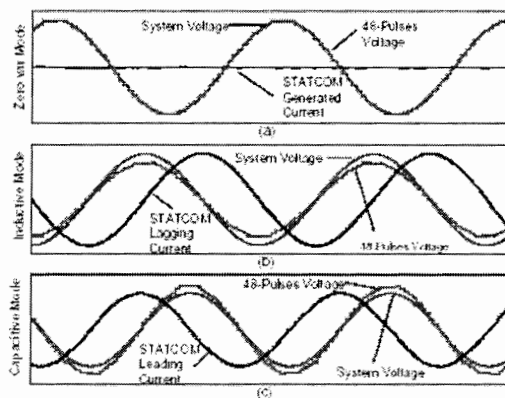
شکل (۲-۲) دیگرام ۴۸ پالس STATCOM

در STATCOM‌های معمولی اینورترها در هر پریود با یک پالس سویچ می‌شوند و ترانس برای کاهش دادن و حداقل کردن هارمونیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخش کنترلی از تجهیزاتی ساخته می‌شود که کنترل پیوسته و سریع توان راکتیو را به همراه داشته باشند. ولتاژ خروجی آن یک ولتاژ تشکیل شده از پالسهاست که به ولتاژ سینوسی بسیار نزدیک است.

تقابل و ارتباط بین ولتاژ بخش AC و ولتاژ تولید شده توسط اینورتر باعث تنظیم و کنترل توان راکتیو می‌شود. هنگامی که این دو ولتاژ سنکرون هستند و دارای یک مقدار می‌باشند توان خروجی از STATCOM صفر است. اما اگر میزان ولتاژ خروجی از آن کمتر از ولتاژ بخش AC باشد، متناسب با ولتاژ جریانی تولید می‌کند که از ولتاژ به اندازه ۹۰ درجه عقب تر است (LAG). و جبران ساز به عنوان یک بار اندوکتیو عمل خواهد نمود که در این حالت مقدار توان راکتیو، متنظر و متناسب با اندازه ولتاژ است. از سوی دیگر هنگامی که ولتاژ STATCOM به بیش از ولتاژ سیستم می‌رسد یک جریان پیش فاز (Lead) که به اندازه ۹۰ درجه از ولتاژ جلوتر است ایجاد می‌گردد و جبران ساز به عنوان یک بار

فصل ۲..... معرفی ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر

خازنی عمل خواهد نمود که در این حالت نیز توان راکتیو معادل با اندازه ولتاژ خواهد بود. که این عملکردها با استفاده از نمودارهای زیر کاملاً قابل توجیه هستند.

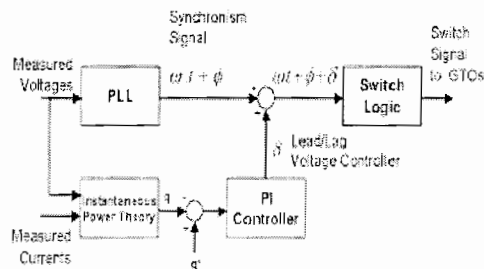


شکل (۲-۲): جریان و ولتاژ ۴۸ پالسه STATCOM

همانگونه که بیان شد میزان توان راکتیو اعمالی متناظر با ولتاژ است پس در واقع کنترل توان راکتیو با کنترل اندازه ولتاژ خازن DC صورت می پذیرد. با عقب افتادن و یا جلو افتادن ولتاژ STATCOM، خازن متصل در بخش DC شارژ و یا دشارژ می شود و در نتیجه میزان ولتاژ DC تغییر خواهد نمود و STATCOM مشخصه های مورد نیاز را نمایش خواهد داد.

۲-۷-۲- یک روش کنترلی برای STATCOM

یک روش ساده و قدرتمند در کنترل STATCOM در [14] بیان شده است. در این روش ولتاژ و جریان در نقطه ای که STATCOM متصل شده است اندازه گیری می شود. سیگنال های مربوط به این اندازه گیری، بر اساس شکل (۲۲-۱) در دو مسیر مورد استفاده قرار می گیرند. در مسیر اول: ولتاژ اندازه گیری شده به یک بلوک PLL (Phase locked loop) اعمال می شود تا فرکانس و زاویه فاز آن مشخص شود و بر اساس آنها سیگنال های لازم برای تولید ولتاژ

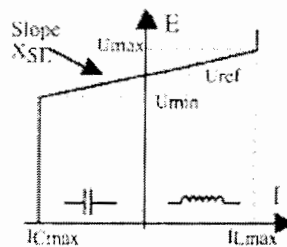


شکل (۲۲-۲): دیاگرام کنترل

سنکرون به سویچ ها اعمال گردد. در مسیر دیگر کنترلی ولتاژ به همراه جریان اندازه گیری شده به بلوک "Instantaneous Power Theory" اعمال می گردد تا توان راکتیو q محاسبه گردد. این مقدار q اندازه گیری شده با یک مقدار q مرجع مقایسه می شود و خطای بدست آمده به بخش کنترلی اعمال می گردد. این بخش کنترلر یک سیگنال تولید می کند که زاویه مورد نیاز برای تنظیم ولتاژ بخش DC را تنظیم می کند که بدین وسیله توان ورودی و یا خروجی از آن کنترل می گردد. سیگنال مربوط به پیش فازی یا پس فازی زاویه به سیگنال خروجی بخش PLL اضافه می شود و به بخش کنترل سویچ ها اعمال می گردد.

۲-۷-۳- مشخصه ولتاژ- جریان STATCOM:

همانگونه که بیان شد STATCOM می تواند جبران سازی را هم بصورت خازنی و هم بصورت سلفی انجام دهد علاوه بر این می تواند در هر سطح ولتاژ AC حتی ولتاژ صفر، جریان خازنی خروجی خود را در مقدار نامی نگه دارد. این در حالی است که در SVC با کاهش ولتاژ سیستم جریان خروجی آن کاهش می یابد که این کاهش به حداکثر ادمیتانس خازنی معادل آن بستگی دارد.



شکل (۲-۲۳): مشخصه STATCOM

شکل (۲-۲۳) مشخصه ولتاژ-جریان STATCOM را نمایش می دهد. همانگونه که از آن مشخص است، STATCOM باعث افزایش ظرفیت گذرا در هر دو ناحیه سلفی و خازنی می گردد. ظرفیت گذرای نامی سیستم به مشخصات نیمه هادی های مورد استفاده و درجه حرارت نقطه کار آنها بستگی دارد.

نکته دیگر اینکه STATCOM در جبران سازی موازی، توان راکتیوی را که تحویل می دهد برابر حاصل ضرب ولتاژ در جریان تحویلی است در حالی که در SVC توان قابل انتقال برابر حاصل تقسیم مربع ولتاژ بر روی امپدانس است [5] لذا در ولتاژ های بسیار پایین STATCOM همچنان میتواند توان راکتیو قابل ملاحظه‌ای را با استفاده از جریان های زیاد تولید نماید در حالی که در این شرایط

فصل ۲..... معرفی ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر

توان راکتیو تحویلی SVC بسیار ناچیز خواهد بود (یعنی مقدار توان راکتیو به عنوان تابعی از درجه دوم ولتاژ گام به گام کاهش خواهد یافت). به عبارت دیگر برای داشتن حاشیه پایداری معلوم، می توان ظرفیت STATCOM را بسیار کمتر از SVC انتخاب نمود.

STATCOM برای سویچ های خود نیاز به ترستورهای gate turn off دارد که در اوایل دهه ۹۰ میلادی قیمتی بیش از ترستورهای معمولی داشت. همچنین این ترستورها دارای تلفات بالاتر و جریان و ولتاژ نامی کمتری نسبت به ترستورهای معمولی هستند این عوامل باعث شده است که STATCOM قدری دیرتر از سایر ادوات FACTS مورد استفاده قرار گیرد.

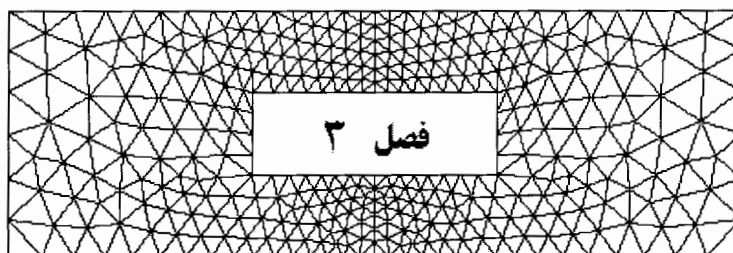
۲-۷-۴. مدهای عملکرد STATCOM

۱) **مد کنترل توان راکتیو:** در این مد ورودی مرجع تقاضای توان راکتیو و یا خازنی است و کنترل اینورتر، توان راکتیو مرجع را مطابق جریان مورد تقاضا تنظیم و اینورتر جریان مطلوب را همزمان انتقال می دهد.

۲) **مد کنترل ولتاژ اتوماتیک:** در این مد که بیشتر در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار می گیرد، جریان راکتیو اینورتر، بطور اتوماتیک ولتاژ نقطه اتصال خط انتقال را در مقدار مرجع تنظیم می کند.

۲-۸. نتیجه گیری:

در فصل دوم ادوات مهم و پرکاربرد FACTS مورد بررسی قرار گرفتند، با توجه به مشخصه های مطلوب UPFC و عملکرد مطلوب آن در قیاس با سایر کنترل کننده های هم رده، استراتژی کنترل بر روی این تجهیز اعال گردیده و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



معرفی پایداری سیستمهای قدرت

مقدمه

بعد از انقلاب صنعتی مصرف سوخت و نیاز به نیروی انسانی به طور پیوسته‌ای افزایش یافته است. اختراع موتور بخار به وسیله نیکولا تسلا در سال ۱۹۸۸ و همچنین استفاده از نور مصنوعی اهمیت رشد انرژی الکتریکی را در صنایع جهانی آشکار ساخت. بخش عمده‌ای از نیازهای جوامع صنعتی به وسیله انرژی الکتریکی تامین می‌گردد.

جوامع پیشرفته صنعتی انرژی الکتریکی را به صورت فزاینده‌ای طلب کرده و در نتیجه سیستم‌های انرژی الکتریکی بسیار پیچیده‌ای جهت برآورده ساختن این رشد نیاز و مطالبات ساخته شده است از طرفی به علت دور بودن منابع تولید از مراکز مصرف و مسائلی از قبیل آلودگی محیط زیست و غیره ایجاد یک شبکه به هم پیوسته که در آن خطوط انتقال متصل کننده بارها به یک سیستم بزرگ می‌باشد، ضروری به نظر می‌رسد.

گسترده‌گی شبکه تامین انرژی الکتریکی مسائل و مشکلات مهندسی زیادی را به وجود آورده است. برنامه‌ریزی، بهره برداری و کنترل این سیستم‌ها با توجه به پدیده تجدید ساختار (restructuring) که مدتی است در صنعت برق آغاز شده و به شدت رو به توسعه می‌باشد؛ بسیار پیچیده و ضروری به نظر می‌رسد.

از طرفی دیگر پایداری مهمترین مشخصه یک سیستم است و عملاً سیستمی که پایدار نباشد کاربرد عملی ندارد بنابراین بررسی پایداری سیستم های قدرت و اعمال روشهای کنترلی پیشرفته جهت پایدار سازی امری اجتناب ناپذیر خواهد بود. در این فصل نخست به تعریف پایداری و بررسی انواع مختلف آن می‌پردازیم و سپس به طور خلاصه مطالبی پیرامون انواع پایداری در سیستم قدرت بیان خواهد شد و در نهایت به بررسی روشهای مختلف پایداری سازی سیستمهای قدرت خواهیم پرداخت.

۳-۱. پایداری و انواع مختلف آن

پایداری از مهمترین مشخصات و ملزومات در سیستمهای دینامیکی است. پایداری تعاریف مختلفی دارد که پایداری بر مبنای ورودی- خروجی و پایداری لیاپانوفی از جمله آنها هستند.

۳-۱-۱. پایداری بر مبنای ورودی - خروجی (BIBO)

بر مبنای این تعریف ، سیستمی پایدار است که به ازای هر ورودی محدود ، خروجی محدود نتیجه بدهد.

تعریف فوق یک تعریف تئوریک است بدین معنا که چنانچه خروجی یک سیستم به ازای هر ورودی محدود در هیچ لحظه ای بینهایت نشود سیستم پایدار است. در مسائل فیزیکی وقتی می گوئیم سیستم ناپایدار است که خروجی سیستم از یک حد قابل قبول خارج شود به طوری که بازگشت به حالت اولیه بدون دخالت انسان امکان پذیر نباشد.

هر چند ژنراتورها و توربینها دارای تجهیزات حفاظتی بسیار پیشرفته ای هستند که خروجی آنها نمی تواند از مقدار مشخصی تجاوز کند ولی « از دید یک مهندس کنترل که مسوول پایداری یک شبکه قدرت است ، سیستم وقتی ناپایدار است که سیستمهای کنترلی از عهده اغتشاش بر نیایند و برای سلامت سیستم ، سیستمهای حفاظتی وارد عمل شوند».

۳-۱-۲. پایداری لیاپانوفی

روش لیاپانوف بر این اصل استوار است که اگر سیستمی حالت تعادل پایداری لیاپانوفی داشته باشد ، انرژی ذخیره شده سیستم در داخل حوزه جذب با افزایش زمان کاهش یافته تا اینکه سر انجام به حداقل مقدار خود در حالت تعادل برسد [49].

۳-۲. پایداری در سیستمهای قدرت

پدیده ها و پایداری در سیستمهای قدرت از دو جهت ، شدت اغتشاش و مدت زمانی که در شبکه باقی می ماند (ثابت زمانی) تقسیم بندی شده اند.

در تقسیم بندی اول پایداری در یک سیستم قدرت به مانا ، دینامیکی و گذرا تقسیم می شوند. هر چند مرز روشنی بین این تقسیم بندی ها وجود ندارد ولی در کتابها و مقالات مختلف ، پایداری شبکه تحت اغتشاشات بسیار کوچک را پایداری مانا ، پایداری شبکه تحت اغتشاشات بسیار شدید را پایداری گذرا و

فصل سوم معرفی پایداری سیستم های قدرت

پایداری شبکه تحت اغتشاشاتی که توسط کنترل کننده های نیروگاهها ، مثل کنترل کننده ولتاژ و گاورنر ، بر طرف می شوند را پایداری دینامیکی می گویند. در تقسیم بندی دوم ، پدیده های یک شبکه قدرت را بسته به مدت زمانی که در شبکه باقی می ماند به صورت زیر تقسیم می نمایند :

الف. پدیده های موجی

این پدیده ها به اتفاقاتی مثل رعد و برق، کلید زنی ، یا هر تغییر دیگر در خطوط انتقال از یک نقطه به نقطه ای دیگر (مانند انتقال اثر کلید زنی در یک نقطه از شبکه به سر ژنراتور) مربوطند. سرعت این امواج بسیار زیاد و محدوده زمانی آنها در حد میکرو ثانیه است.

ب. پدیده های الکترومغناطیسی

وقتی اثر یک اتفاق به سر ژنراتور می رسد ، تا بر سیم پیچ استاتور و فلوی فاصله هوایی روی روتور و گشتاور الکتریکی اثر بگذارد، زمانی طول می کشد. این زمان از مدت پدیده های موجی بیشتر است و در فاصله میلی ثانیه تا ثانیه می باشد.

ج. پدیده های الکترومکانیکی

ایجاد تغییرات روی گشتاور الکتریکی باعث تغییر دور روتور و سپس از طریق گاورنر باعث تغییر در گشتاور مکانیکی می شود. مثلاً در یک نیروگاه بخار در اثر زیاد شدن بار مصرف کننده و تغییر دور روتور و سپس با باز شدن بیشتر دریچه بخار ورودی به توربین فشار بالا گشتاور توربین زیاد می شود تا بار اضافی را جبران نماید. این تغییرات آهسته تر از دو پدیده قبلی و در محدوده زمانی یک تا چند ثانیه است. پدیده های نوسانات فرکانس پایین و تشدید زیر سنکرون در این دسته قرار می گیرند. زمان این پدیده ها یک تا چند ثانیه است.

د. پدیده های ترمودینامیکی

تغییر در گشتاور مکانیکی باید منجر به تغییر در نقطه کار سیستم تامین کننده انرژی (مانند بویلر) گردد. این تغییر معمولاً بسیار آرام و در حد چند دقیقه است. تقسیم بندی دوم بر حسب ثابت زمانی به صورت دیگری انجام شده است:

الف. دینامیک کوتاه مدت

این دسته شامل پدیده هایی است که از صفر تا چند ثانیه در سیستم قدرت باقی می ماند و در مقایسه با تقسیم بندی قبلی تمام پدیده های موجی، الکترومغناطیسی و الکترومکانیکی را شامل می شود. بررسی صورت گرفته در این پایان نامه بر روی همین پدیده بوده است.

ب. دینامیک بلند مدت

در این قسمت فرض می شود که پس از قرار گرفتن سیستم در یک اغتشاش شدید پدیده های کوتاه مدت مثل نوسانات فرکانس از بین رفته است و در نتیجه فرکانس در کل سیستم یکنواخت است. در این حالت به علت عدم تعادل بین تولید و مصرف پدیده هایی مانند عکس العمل دینامیکی دیگهای بخار واحدهای بخاری، عملکرد سیستم حفاظتی نیروگاهها ، عکس العمل تپ چنجر در ترانسفورماتورها و تاثیرات فرکانس غیر نامی بر بارها اتفاق می افتند که بایستی بررسی گردند. این پدیده ها تا چند دقیقه پس از اغتشاش شدید اتفاق می افتد.

ج. دینامیک میان مدت

مرز دقیقی بین تقسیم بندی های مختلف وجود ندارد آنچه که دینامیک میان مدت تعریف می شود فاصله بین دینامیک کوتاه مدت و بلند مدت است. یعنی پدیده هایی در فاصله زمانی چندین ثانیه تا چندین دقیقه. این پدیده ها عمدتاً شامل نوسانات توان بین واحدها تا رسیدن به یک فرکانس ثابت اند. مرز بین دینامیک کوتاه مدت و میان مدت تقریباً روشن است. ولی مرز بین دینامیک بلند مدت و میان مدت مبهم است. لذا در بعضی مطالعات فقط به دو دسته دینامیک کوتاه مدت و بلند مدت اکتفا می گردد. آنچه در چندین ثانیه اول اغتشاش رخ می دهد یعنی پدیده های موجی، الکترومغناطیسی ، فرکانس پایین و تشدید زیر سنکرون ، را جزء دینامیک کوتاه مدت می شمرند و آنچه بعداً اتفاق می افتد در دینامیک بلند مدت دسته بندی می کنند.

بر اساس نوع پارامترها و فاکتورهای سیستم که در پایداری و عملکرد آن موثر هستند سه نوع پایداری قابل طرح است:

۱. پایداری زاویه روتور یا پایداری سنکرون

معمولاً در شرایط عادی کار یک سیستم مجموع توان مصرفی بارها و تلفات شبکه با توان تولیدی ژنراتورها برابر می باشد. با توجه به تغییرات سیستم همواره تعادلی بین توان مصرفی و توان اعمالی توسط توربینها به ژنراتور وجود ندارد. اگر این میزان عدم تعادل از حد مشخصی تجاوز کند باعث می شود توان اکتیو ژنراتورها کاهش یا افزایش یابد. که در این حالت ممکن است تغییراتی در سرعت و زاویه ماشین ایجاد شود. پایداری روتور یا پایداری سنکرون به معنای توانایی ماشین های سنکرون در حفظ حالت سنکرونیزم پس از وقوع خطا در سیستم است. اگر خطا در محل ژنراتور و به صورت اساسی و غیر گذرا باشد مثلاً وقوع خطای فاز به زمین در نزدیکی ژنراتور، ممکن است ژنراتور از کار بیفتد و از مدار خارج شود ، زیرا در زمان وقوع خطا توان شتاب دهنده به محور ژنراتور اعمال شده و آن را از

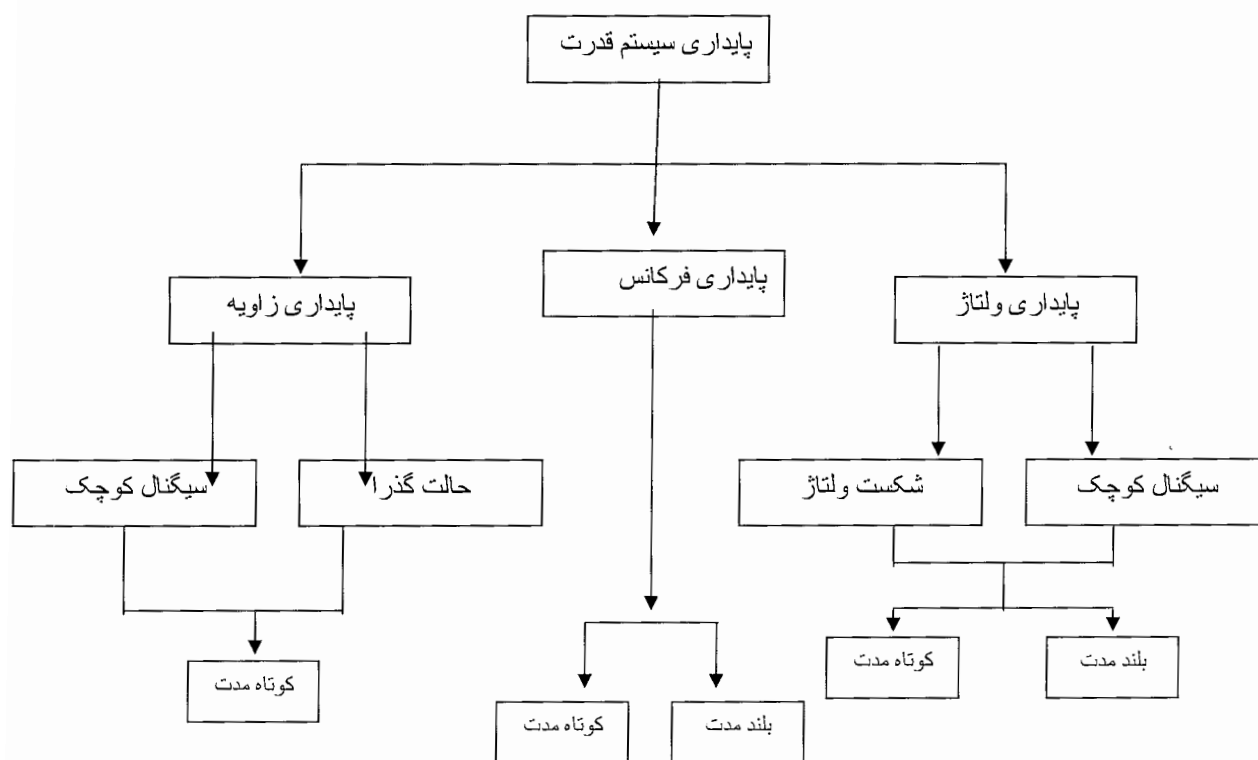
حالت سنکرون با شبکه خارج می کند. در این حالت جریان زیادی از سیم پیچی های ژنراتور می گذرد که می تواند برای آن بسیار مخرب باشد. این پایداری در دو مد پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا مطرح می گردد.

۲. پایداری فرکانس

این پایداری در هنگام عدم تعادل توان مطرح می گردد.

۳. پایداری ولتاژ

این پایداری در اثر عدم وجود تعادل در توان راکتیو به وقوع می پیوندد. لازم است که همواره تعادل میان توان راکتیو در تمام نقاط شبکه موجود باشد. بحث عدم پایداری در این حالت بدین معنا است که توان راکتیو تزریق شده در یک گره کمتر از میزان مورد نیاز است به همین علت اندازه ولتاژ در گره مورد نظر به کمتر از میزان نامی می رسد اگر در این حالت عدم تعادل خیلی زیاد شود و ولتاژ کل سیستم از حد قابل قبول خارج شود در این حالت ناپایداری در ولتاژ به وقوع پیوسته است. ادامه این امر می تواند باعث شکست ولتاژ گردد که مشکلات عدیده ای را می تواند برای سیستم قدرت ایجاد کند.



شکل (۳-۱) : دسته بندی انواع پایداری ها

۳-۳. روشهای پایدار سازی سیستمهای قدرت

از سال ۱۹۶۰ نوسانات فرکانس پایین (low frequency oscillation) در هنگام اتصال صنایع بزرگ به سیستمهای برق در این سیستمها دیده شده است. در این حالت اگر هیچ عنصر و یا ساختاری برای حذف این نوسانات موجود نباشد، ممکن است پایداری و سنکرونیزم در این سیستم ها از دست رفته و خاموشی های منطقه ای و مقطعی و یا سراسری ایجاد گردد. سیستم های قدرت به عنوان سیستم های بزرگ غیر خطی که خواص غیر خطی زیادی از خود نشان می دهند مطرح هستند که ممکن است تحت نوسانات کوچک و یا بزرگ الکترومکانیکی قرار گیرند. از سوی دیگر به دلیل وجود سرمایه گذاری های بسیار زیاد در بخش برق و یا بخش هایی که از انرژی برق استفاده می کنند قطعی های مکرر و نیز ناپایداری های موجود آمده در سیستم می تواند باعث ایجاد ضررهای زیادی به بخش های مختلف گردد. به همین دلیل لازم است وسایل و سیستم های کنترلی در سیستم قدرت ایجاد گردد که ضمن حذف نوسانات بوجود آمده در سیستم قدرت پایداری و قابلیت اطمینان آنرا افزایش داده و امکان استفاده بیشتر و بهتر از سیستم های قدرت را بوجود آورد.

بحث این پایدار سازها و لزوم آنها از سالهای ۱۹۲۰ و پس از گزارش اولین ناپایداری های بوجود آمده در سیستم های قدرت حالت جدی به خود گرفت که منجر به ایجاد و گسترش پایدار سازهای سیستم قدرت (PSSها) و سپس ادوات پیشرفته تر ، همچون ادوات FACTS، گردید.

پایدارسازهای سیستم قدرت PSS ها با اعمال فید بک ها و سیگنال های کنترلی مناسب باعث حفظ پایداری این سیستم ها می گردند. به عبارت دیگر، در راستای مقابله با نوسانات فرکانس پایین یکی از روشهای کارآمد و معمول استفاده از یک سیگنال اضافی در سیستم تحریک ژنراتور است. وظیفه تولید و اعمال این سیگنال اضافی را پایدار ساز سیستم قدرت (PSS) به عهده دارد. PSS به شرطی کار رضایت بخش خود را انجام خواهد داد که درست تنظیم شده باشد. برای تنظیم درست آن لازم است مدل خطی سیستم بررسی و تحلیل شود. یک پایدار ساز، گشتاور مثبت جهت میراسازی نوسانات سیستم قدرت در جهت موافق با فاز سیگنال های سرعت اعمال می کند تا در اثر آن اثر گشتاور های منفی نوسانات (ایجاد کننده نوسانات) خنثی گردد.

یک پایدار ساز زمانی می تواند اثر قابل توجهی در سیستم قدرت و حذف نوسانات آن داشته باشد که پارامترهای آن به شکل مناسبی طراحی و تنظیم شده باشند. یکی از مشکلات این قبیل پایدار سازها ثابت بودن ضرایب آنها و پارامترهای معین کننده عملکرد آنهاست. به همین دلیل پایدار ساز فقط در محدوده مشخصی قادر به اعمال سیگنال کنترلی کارا است و در سایر حالات عملکرد سیستم، ممکن است سیگنال های تولیدی توسط آن چندان کارایی مناسبی در حذف نوسانات سیستم نداشته باشند. به همین دلیل تلاشهایی برای افزایش کارایی پایدار سازها در شرایط مختلف عملکرد سیستم های

فصل سوم معرفی پایداری سیستم های قدرت

قدرت انجام شده است. از سوی دیگر طراحی پایدار سازهای کلاسیک نیازمند داشتن یک مدل از سیستم مورد نظر است که خصوصا در شبکه های بزرگ وجود این مدل عملا بسیار مشکل است. به همین دلیل استفاده از روشهای جدید تر مورد توجه واقع شده است.

همانگونه که پیشتر اشاره گردید بعد از پدید آمدن PSS ها تکنولوژی جدید تری به نام FACTS ظهور کرد. مقالات متعددی در زمینه اعمال روشهای کنترلی مختلف به منظور دستیابی به پایداری سیستم قدرت ارائه شده که استفاده از این ادوات جایابی آنها، اعمال روش کنترلی مناسب به منظور دستیابی به اهداف عملکرد مطلوب و نیز بهبود عملکرد سیستم در حالت مانا، هماهنگی این تجهیزات با یکدیگر و نیز با PSS در شبکه قدرت زمینه های تحقیقاتی گسترده ای را فراهم آورده است. UPFC بنابه دلایل اشاره شده در فصل قبل به منظور شبیه سازی در یک شبکه قدرت و اعمال کنترل فازی مقاوم در این پایان نامه انتخاب شده است از این رو در بخش بعد تنها به بررسی پژوهش های صورت گرفته در این زمینه خواهیم پرداخت.

۳-۴. مطالعات صورت گرفته جهت پایدار سازی به کمک UPFC

در مقاله مرجع [52] که توسط Mishra و همکارانش در سال ۲۰۰۰ در مجله IEE ثبت شده است روش کنترلی تاکاگی - سوگنو بر UPFC برای سیستم چند ماشینه اعمال گردیده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که این روش کنترلی کارا بوده به گونه ای که نوسانات بین ناحیه ای و نوسانات درون ناحیه ای پس از یک اتصال کوتاه سه فاز به خوبی میرا شده و سیستم به حالت اولیه باز گشته است. همانطور که می دانیم می توان به مسائل کنترلی از دو دیدگاه تنظیم (Regulation) و تعقیب (following) نگاه کرد و در مورد مطالعه شده برای میراسازی نوسانات فرکانس پایین مسئله تنظیم مد نظر می باشد. تنظیم پارامترهای کنترلر تاکاگی - سوگنو با کمک سعی و خطا صورت گرفته است اما مقاوم بودن و بهینگی شماتیک کنترل پیشنهادی بحث نشده است. و نوسانات با کمک این استراتژی کنترلی در حدود ۴ ثانیه میرا گردیده است. از آنجا که روش تاکاگی - سوگنو روشی بر اساس مدل می باشد از این رو برای اعمال کنترلر لازم است معادلات به فرم فضای حالت نوشته شود که این کار با قرار دادن مدل تزریقی UPFC ترکیب آن با سایر معادلات سیستم بدست آمده است. در کلیه تحقیقات صورت گرفته از مدل تزریقی برای کنترلر یکپارچه توان استفاده شده است و ما نیز در این پایان نامه از همین مدل استفاده کرده ایم. شمای کلی این مدل در فصل بعد تشریح شده است.

در مقاله بعدی که توسط Januszowski و همکارانش در پروسیدینگ شماره ۲۰۰۴۰۵۴ IEE در سال ۲۰۰۴ به چاپ رسیده است، روش لیاپانف مستقیم (Direct Lyapunov) بر UPFC اعمال گردیده است [50]. در این مقاله از مدل غیر خطی استفاده شده است و نتایج شبیه سازی برای

میرانمودن نوسانات پس از رفع خطا بر روی یک شبکه سه ماشینه انجام شده است به گونه ای که نوسانات در حدود ۳ ثانیه رفع شده است با اعمال هر دو کنترل شنت و سری نوسانات توان و نوسانات ولتاژ میرا گردیده است. روش کنترل پیچیده بوده و شرایط پایداری و مقاوم بودن و بهینگی بررسی نشده است.

در تحقیق صورت گرفته توسط آقای دکتر Kothari و همکاران که در کنفرانس IEEE سال ۲۰۰۴ ارائه گردیده [53] طراحی برای UPFC در حضور PSS انجام شده است و واکنشهای صورت گرفته بین این دو وسیله کنترلی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثرات پارامترهای کنترلی UPFC نیز مورد مطالعه قرار گرفته و در میان همه آنها کنترل از طریق اندیس مدولاسیون پیشنهاد شده است. نوسانات ولتاژ در حدود ۹ ثانیه و نوسانات توان در حدود ۱۰ ثانیه میرا شده است. این تفاوت زمان در این مقاله و مقالات قبلی به دلیل در نظر گرفتن Pss و لزوم هماهنگی UPFC با آن بوده است. روش کنترل پیشنهادی بهینه بوده اما مقاوم بودن آن بررسی نشده است. کارهای مشابهی نیز توسط آقای دکتر CAI از دانشگاه Duisburg-Essen آلمان صورت گرفته اما در آنجا نیز بنا به گفته مولف روش کنترل نسبت به تغییرات پارامترهای سیستم حساس می باشد [54].

در سایر مقالات و مراجع روشهای کنترلی دیگری بر روی UPFC اعمال شده است که از آن جمله می توان به کنترل فازی، کنترل پس فاز و پیش فاز خطی با بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک و روش یادگیری تقویتی اشاره نمود. که از نقاط ضعف این روشها در مجموع می توان به نکات زیر اشاره نمود:

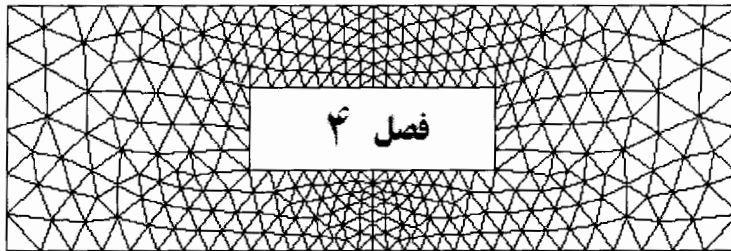
- ✓ پیچیدگی این روشها
- ✓ حساسیت نسبت به تغییر نقطه کار
- ✓ بهینه نبودن در اکثر موارد
- ✓ عدم بررسی پایداری و شرایط آن

۳-۵. نتیجه گیری

با توجه به لزوم طراحی کنترلر مناسب جهت میرا سازی نوسانات فرکانس پایین و انتخاب UPFC با توجه به قابلیت های گسترده لازم به نظر می رسد که نقاط ضعف چهارگانه روش های مرسوم و تحقیق شده رفع شود تا عملکرد کنترلی UPFC بهبود یابد.

روش کنترل فازی مقاوم از طریق جبران ساز توزیعی موازی توسط Tanaka ابداع شده است و دارای مشخصات عملکرد مناسب در سیستم های غیر خطی و نیز رفع نقیصه های چهارگانه فوق می باشد.

بنابراین اعمال این کنترل کننده بر روی UPFC به منظور میرا سازی نوسانات فرکانس پایین که موضوع این پایان نامه می باشد پیشنهاد گردیده است. در فصل ۴ به صورت اجمالی آشنایی با این روش کنترلی جدید بیان خواهد شد و در فصل ۵ مراحل اعمال و نتایج شبیه سازی تشریح خواهند شد.



معرفی روش فازی مقاوم

مقدمه

مسئله پایداری سیستمهای کنترل فازی ، بطور گسترده در چهار چوب پایداری غیر خطی مطرح میشوند. منطق فازی در واقع یک روش مستقیم و ساده برای تجزیه ، تحلیل، مدلسازی و طراحی کنترل کننده در زمینه های مختلف است. موضوع اصلی این بخش ایجاد یک روش سیستماتیک برای پایداری و طراحی سیستمهای کنترل فازی غیر خطی است. از طرفی طراحیهای

LMI (Linear Matrix Inequality) نیز برای سرعت میرایی (decay Rate) با استفاده از مفهوم جبران توزیعی موازی

(PDC: Parallel Distributed Compensation) مطرح شده اند [21-33]. روشهای تحلیل و طراحی که در اینجا معرفی میشوند مستقیم و ساده هستند ، گرچه، دیگر طراحی های کنترل کننده های غیرخطی ، درکل مشکل هستند و این موضوع همانگونه که در فصل قبل اشاره گردید یکی از دلایل انتخاب روش PDC Fuzzy است .

پس از این مرحله مدل فازی تاکاگی - سوگنو(مدل فازی T-S) را شرح میدهم ، و سپس شرایط پایداری جدیدی را با آرام کردن شرایط پایداری قبلی بدست می آوریم. پس از آن به پایداری سیستمهای فازی می پردازیم.

در این جا CFS و DFS بترتیب بیانگر سیستمهای کنترل فازی پیوسته و گسسته هستند .

فصل چهارم..... معرفی روش فازی مقاوم

$S > 0$ به این معنی است که S یک ماتریس معین مثبت است، یعنی $S > T$ یعنی $S - T > 0$ و $W = 0$ یعنی W یک ماتریس صفر است که همه المانهای آن صفرند.

برای روشنی مطلب، در چندین مورد ویژه از اختصارات زیر استفاده کرده ایم :

$$i < j \quad s.t. \quad h_i \cap h_j \neq \phi,$$

$$i \leq j \quad s.t. \quad h_i \cap h_j \neq \phi.$$

برای مثال ، شرط زیر را در نظر بگیرید:

$$i < j \leq r \quad s.t. \quad h_i \cap h_j \neq \phi,$$

مفهوم این شرط آن است که باید برای تمامی $i < j$ هایی که $h_i \cap h_j \neq \phi$ (برای همه $z(t)$ ها، $h_i(z(t)) \cdot h_j(z(t)) = 0$) برقرار باشد. یعنی وزن i امی قانون محاسبه شده از توابع عضویت در مراحل مقدماتی و r تعداد قوانین اگر - آنگاه است . توجه داشته باشید که $h_i \cap h_j \neq \phi$ است اگر و فقط اگر i امین و j امین قانون هیچگونه اشتراکی نداشته باشند.

۴-۱. کنترل فازی مقاوم (Robust)

در این بخش ، به کنترل فازی مقاوم می پردازیم. در کل اگر طرح پایدار پذیر باشد، تعداد محدودی کنترل کننده پایدار وجود دارد . انتخاب یک کنترل کننده ویژه از بین این گروه از کنترل کننده های موجود، اغلب با مشخصات معینی از عملکرد کنترل ، صورت می گیرد. تکنیکهای مبتنی بر LMI نه تنها پایداری بلکه ، برای مثال ، سرعت خوب پاسخ ، جلوگیری از اشباع محرک و محدودیت خطای خروجی را نیز تضمین میکنند. پایداری در کاربردهای کنترل عملی که اغلب همراه عدم قطعیت است ، مثلا در طراحی محرکها و سنسورها در یک سیستم کنترل ، مطرح میشود. در اینجا یک کلاس از سیستمهای فازی تاکاگی- سوگنوی نامشخص را تعریف میکنیم . همچنین در این فصل یک روش برای طراحی کنترل کننده فازی ارائه میدهم بطوریکه بلوکهای نامعین را خارج از کلاس پایداری کنترل کننده های PDC ، ماکزیمم کند.

۴-۱-۱. مدل فازی نامعین (Uncertain Fuzzy Model)

در اینجا روی کنترل فازی مقاوم در سیستمهای CFS تمرکز میکنیم . برای دنبال کردن پایداری سیستمهای کنترل فازی ، اولین و لازم ترین مرحله در نظر گرفتن یک کلاس از سیستمهای فازی با عدم قطعیت است . برای این منظور ، ما بلوکهای نامشخص را به مدل فازی تاکاگی- سوگنو تبدیل میکنیم تا به مدل فازی نامشخص زیر برسیم،

plant Rule i

IF $z_1(t)$ *is* M_{i1} *and..and* $z_p(t)$ *is* M_{ip}

THEN $\dot{x}(t) = (A_i + D_{ai}\Delta_{ai}(t)E_{ai})x(t) + (B_i + D_{bi}\Delta_{bi}(t)E_{bi})u(t), \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (1-4)$

بلوکهای نامشخص ، در روابط زیر برای همه i ها صدق میکنند.

$$\|\Delta_{ai}(t)\| \leq \frac{1}{\gamma_{ai}}, \quad (2-4)$$

$$\Delta_{ai}(t) = \Delta_{ai}^T(t), \quad (3-4)$$

$$\|\Delta_{bi}(t)\| \leq \frac{1}{\gamma_{bi}}, \quad (4-4)$$

$$\Delta_{bi}(t) = \Delta_{bi}^T(t), \quad (5-4)$$

مدل فازی به اینصورت نمایش می یابد:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{ (A_i + D_{ai} \Delta_{ai}(t) E_{ai}) x(t) + (B_i + D_{bi} \Delta_{bi}(t) E_{bi}) u(t) \}. \quad (6-4)$$

مدل فازی (1-4) عدم قطعیتها را در بر دارند. پایداری Robust برای مدل فازی با شرایط نامشخص اولیه در [۲۶] و [۲۷] آمده است.

۲-۴- شرط پایداری (Stability Condition)

در این بخش یک شرط پایداری را برای مدل فازی دارای عدم قطعیت (1-4) یا (6-4) نشان می‌دهیم. با جایگزین کردن کنترل کننده PDC در رابطه (6-4):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) \cdot \left\{ A_i - B_i F_j + \begin{bmatrix} D_{ai} & D_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{ai} & 0 \\ 0 & \Delta_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ai} \\ -E_{bi} F_j \end{bmatrix} \right\} x(t) \\ &= \sum_{i=1}^r h_i^2(z(t)) \left\{ A_i - B_i F_j + \begin{bmatrix} D_{ai} & D_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{ai} & 0 \\ 0 & \Delta_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ai} \\ -E_{bi} F_i \end{bmatrix} \right\} x(t) + \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} h_i(z(t)) h_j(z(t)) \\ &\cdot \left\{ A_i - B_i F_j + A_j - B_j F_i + \begin{bmatrix} D_{ai} & D_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{ai} & 0 \\ 0 & \Delta_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ai} \\ -E_{bi} F_j \end{bmatrix} \right\} + \\ &\left[\begin{bmatrix} D_{ai} & D_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{ai} & 0 \\ 0 & \Delta_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ai} \\ -E_{bi} F_i \end{bmatrix} \right. \\ &\left. + \begin{bmatrix} D_{aj} & D_{bj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{aj} & 0 \\ 0 & \Delta_{bj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{aj} \\ -E_{bi} F_i \end{bmatrix} \right] x(t). \quad (7-4) \end{aligned}$$

به قضیه زیر میرسیم، که در واقع این قضیه شرایط پایداری مقاوم را برای مدل فازی (1-4) یا (۴-۶)، با کنترل کننده فازی PDC می‌دهد.

قضیه ۱- سیستم فازی (۴-۱) یا (۴-۶)، با کنترل کننده PDC پایدار میشود، اگر یک ماتریس مثبت معین P و یک ماتریس متعارفی مثبت نیمه معین Q_0 وجود داشته باشد، بطوریکه شرایط زیر را برآورده کند:

$$S_{ii} + (s-1)Q_1 < 0, \quad (8-4) \text{ where } s > 1,$$

$$T_{ij} - 2Q_2 < 0, \quad i < j \text{ s.t. } h_i \cap h_j \neq \phi, \quad (9-4)$$

$$S_{ii} = \begin{bmatrix} (A_i - B_i F_i)^T P + P(A_i - B_i F_i) & PD_{ai} & PD_{bi} & E_{ai}^T & -F_i^T E_{bi}^T \\ D_{ai}^T P & -I & 0 & 0 & 0 \\ D_{bi}^T P & 0 & -I & 0 & 0 \\ E_{ai} & 0 & 0 & -\gamma_{ai}^2 I & 0 \\ -E_{bi} F_i & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{bi}^2 I \end{bmatrix},$$

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} (A_i - B_i F_j)^T P \\ + P(A_i - B_i F_j) \\ + (A_j - B_j F_i)^T P \\ + P(A_j - B_j F_i) \end{pmatrix} & PD_{ai} & PD_{bi} & PD_{aj} & PD_{bj} & E_{ai}^T & -F_j^T E_{bi}^T & E_{aj}^T & -F_i^T E_{bj}^T \\ D_{ai}^T P & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{bi}^T P & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{aj}^T P & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{bj}^T P & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_{ai} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{ai}^2 I & 0 & 0 & 0 \\ -E_{bi} F_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{bi}^2 I & 0 & 0 \\ E_{aj} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{aj}^2 I & 0 \\ -E_{bj} F_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{bj}^2 I \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \text{block-diag}(Q_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0),$$

فصل چهارم..... معرفی روش فازی مقاوم

$$Q_2 = \text{block-diag}(Q_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0).$$

اثبات آن با انتخاب یک کاندیدا از توابع لیاپانف بصورت $x(t)^T p x(t)$ و بدنبال آن مشتق گیری و سپس جایگذاری بدست می آید. وقتی $Q_2 = 0, Q_1 = 0$ شود، یعنی، $Q_0 = 0$ ، شرایط پایداری مقاوم آرام شده بصورت زیر کاهش می یابد.

$$P > 0, \quad S_{ii} < 0, \quad T_{ij} < 0, \quad i < j \quad \text{s.t.} \quad h_i \cap h_j \neq \emptyset$$

۳-۴- پایداری مقاوم

قضیه ۲- بهره برگشتی (فیدبک) F_i که مدل فازی (۴-۱) را پایدار کند و نرمهای بلوکهای نامعین را ماکزیمم سازد، با حل LMI های زیر بدست می آید، $\alpha_i, \beta_i > 0$ پارامترهای طراحی هستند.

$$\underset{\gamma_{ai}, \gamma_{bi}, X, M_1, \dots, M_r, Y_0}{\text{minimize}} \quad \sum_{i=1}^r \{ \alpha_i \gamma_{ai}^2 + \beta_i \gamma_{bi}^2 \}$$

subject to

$$X > 0, Y_0 \geq 0, \quad \hat{S}_{ii} + (s-1)Y_1 < 0, \quad (10-4)$$

$$\hat{T}_{ij} - 2Y_2 < 0, \quad i < j \quad \text{s.t.} \quad h_i \cap h_j \neq \emptyset \quad (11-4)$$

where $s > 1$,

$$\hat{S}_{ii} = \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{c} XA_i^T + A_i X \\ -B_i M_i - M_i^T B_i^T \end{array} \right) & * & * & * & * \\ D_{ai}^T & -I & 0 & 0 & 0 \\ D_{bi}^T & 0 & -I & 0 & 0 \\ E_{ai} X & 0 & 0 & -\gamma_{ai}^2 I & 0 \\ -E_{bi} M_i & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{bi}^2 I \end{bmatrix}$$

$$\hat{T}_{ij} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} XA_i^T + A_iX \\ -B_iM_j - M_j^T B_i^T \\ +XA_j^T + A_jX \\ -B_jM_i - M_i^T B_j^T \end{pmatrix} & D_{ai} & D_{bi} & D_{aj} & D_{bj} & XE_{ai}^T & -M_j^T E_{bi}^T & XE_{aj}^T & -M_i^T E_{bj}^T \\ D_{ai}^T & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{bi}^T & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{aj}^T & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{bj}^T & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_{ai}X & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{ai}^2 I & 0 & 0 & 0 \\ -E_{bi}M_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{bi}^2 I & 0 & 0 \\ E_{aj}X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{aj}^2 I & 0 \\ -E_{bj}M_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{bi}^2 I \end{bmatrix}$$

$$Y_1 = \text{block-diag}(Y_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0),$$

$$Y_2 = \text{block-diag}(Y_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0).$$

$$Y_0 = XQ_0X$$

$$\hat{T}_{ij} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} XA_i^T + A_iX \\ -B_iM_j - M_j^T B_i^T \\ +XA_j^T + A_jX \\ -B_jM_i - M_i^T B_j^T \end{pmatrix} & D_{ai} & D_{bi} & D_{aj} & D_{bj} & XE_{ai}^T & -M_j^T E_{bi}^T & XE_{aj}^T & -M_i^T E_{bj}^T \\ D_{ai}^T & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{bi}^T & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{aj}^T & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{bj}^T & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_{ai}X & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{ai}^2 I & 0 & 0 & 0 \\ -E_{bi}M_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{bi}^2 I & 0 & 0 \\ E_{aj}X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{aj}^2 I & 0 \\ -E_{bj}M_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{bi}^2 I \end{bmatrix}$$

$$Y_1 = \text{block - diag}(Y_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0),$$

$$Y_2 = \text{block - diag}(Y_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0).$$

$$Y_0 = XQ_0X$$

علامت ستاره المانها (ماتریسها)ی ترانهاده را در موقعیتهای مربعی نشان میدهد.

۴-۴. مدل فازی تاکاگی - سوگنو وجبران توزیع موازی

این قسمت را با روشهای طراحی مدل فازی تاکاگی- سوگنو (مدل فازی T-S) و ساختار آن آغاز میکنیم . سپس یک مدل اساسی برای طراحی کنترل کننده فازی با استفاده از مفهوم PDC را شرح میدهم . بعلاوه در این بخش نشان داده میشود که تحلیل پایداری و مسائل طراحی کنترل میتوانند به یک نامساوی ماتریس خطی (LMI) کاهش یابند . اصل بر مفهوم اساسی تحلیل تکنیکهای پایداری با استفاده از LMI هاست .

۴-۴-۱. مدل فازی تاکاگی - سوگنو

مدل فازی تاکاگی - سوگنو (T-S) توسط مجموعه ای از قوانین اگر- آنگاه فازی توصیف میشود که روابط ورودی - خروجی خطی محلی یک سیستم غیر خطی را نشان میدهد . خواهیم دید بسیاری از سیستمهای دینامیک غیر خطی میتوانند با مدل فازی تاکاگی - سوگنو نمایش یابند . قانون i ام مدل فازی T-S بصورت زیر است:

< Plant Rule i >

IF $z_1(t)$ is M_{i1} And..And $z_p(t)$ is M_{ip}

$$\text{THEN} \begin{cases} sx(t) = A_i x(t) + B_i u(t), & i = 1, 2, \dots, r \\ y(t) = C_i x(t), \end{cases} \quad (12-4)$$

که $sx(t) = \dot{x}(t)$ برای سیستمهای CFS و $sx(t) = x(t+1)$ برای سیستمهای DFS میباشد .

M_{ij} مجموعه فازی و r تعداد قوانین اگر - آنگاه فازی است. $x(t) \in R^n$ بردار حالت، $u(t) \in R^m$ بردار ورودی، $y(t) \in R^q$ بردار خروجی، $A_i \in R^{n \times n}$ و $B_i \in R^{n \times m}$. $z_1(t), \dots, z_p(t)$ متغیرهای از پیش فرض شده اند. در اینجا فرض میشود متغیرهای مفروض، مستقل از متغیرهای ورودی $u(t)$ هستند. امانتیجه تحلیل پایداری انجام شده، قابل تعمیم به متغیرهای مفروض وابسته به ورودی $u(t)$ است. هر معادله پیوسته خطی، که با $A_i x(t) + B_i u(t)$ نمایش داده شود، یک زیرسیستم نامیده میشود. بصورت زیر خواهد بود، $(x(t), u(t))$ خروجی نهایی سیستمهای فازی در همه زمانها، برای هر جفت

$$sx(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)] \quad (13-4)$$

$$z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_p(t)]$$

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) \quad (14-4)$$

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t)), \quad (15-4)$$

$M_{ij}(z_j(t))$ درجه عضویت $z_j(t)$ در M_{ij} است.

توجه کنید که برای همه t ها، وقتی داشته باشیم:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0, \\ w_i(z(t)) \geq 0, \quad i=1,2,\dots,r, \end{cases} \quad (16-4)$$

آنگاه داریم،

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1 \\ h_i(z(t)) \geq 0 \quad i=1,2,\dots,r \end{cases} \quad (17-4)$$

۲-۴-۴. ساختار مدل فازی

شکل ۴-۱-۴ طریقه طراحی کنترل کننده فازی را نشان میدهد. بمنظور طراحی یک کنترل کننده فازی برای یک سیستم غیر خطی، به یک مدل فازی تاکاگی- سوگنو نیاز داریم . در این بخش به ساختن چنین مدل فازی می پردازیم .

در کل دوروش برای ساخت مدل‌های فازی وجود دارد:

۱- شناسایی با استفاده از داده ورودی- خروجی (مدلسازی فازی)

۲- نتیجه گیری از معادلات سیستم غیر خطی مفروض.

مقاله بسیار با ارزشی در زمینه مدلسازی سیستم‌های فازی با استفاده از روش داده ورودی - خروجی توسط تاکاگی - سوگنو و بدنبال آن توسط کانگ ارائه شده است [23] . این روش اساساً شامل دو قسمت است:

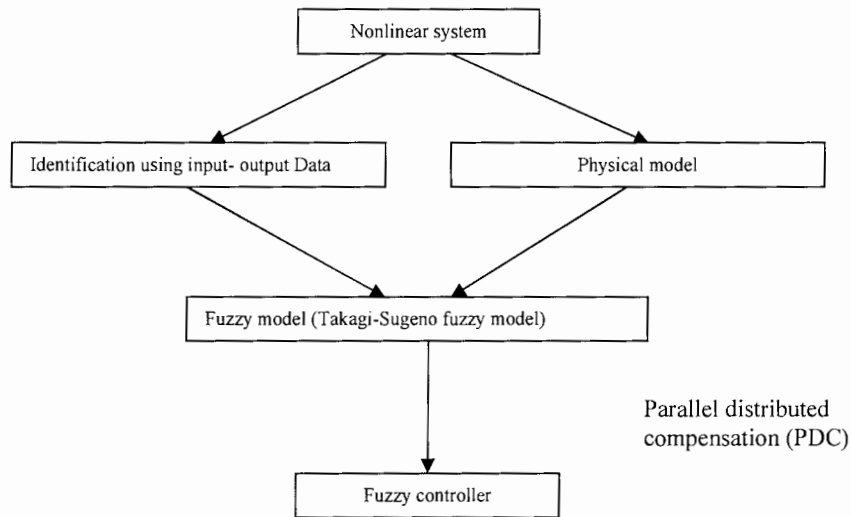
۱- شناسایی ساختار و شناسایی پارامتر .

۲- مدل سازی بر اساس معادلات

شناسایی با استفاده از مدل فازی ، در طرح‌هایی مناسب است که نمایش آنها با مدل‌های تحلیلی یا مدل‌های فیزیکی، مشکل بوده و یا امکان پذیر نباشد .

مدل‌های دینامیک غیرخطی برای سیستم‌های مکانیکی ، بطور تئوری، مثلاً با استفاده از روش راگرانژ ، روش نیوتن - اویلر بدست می آید .

در برخی موارد، روش دوم که مدل‌های دینامیک غیرخطی را به مدل فازی تبدیل میکند ، مناسبتر است . در این بخش روی روش دوم تمرکز میکنیم . این روش، از تقریب محلی غیر خطی ناحیه ای یا ترکیبی از آنها برای ساخت مدل‌های فازی استفاده میکند.



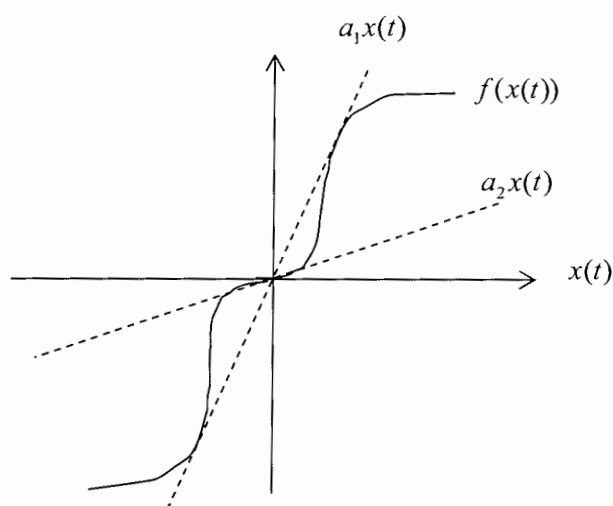
شکل (۱-۴): طراحی بر اساس مدل فازی

۴-۴-۳- غیر خطی ناحیه ای

غیر خطی ناحیه ای بر ایده زیر بنا شده است :

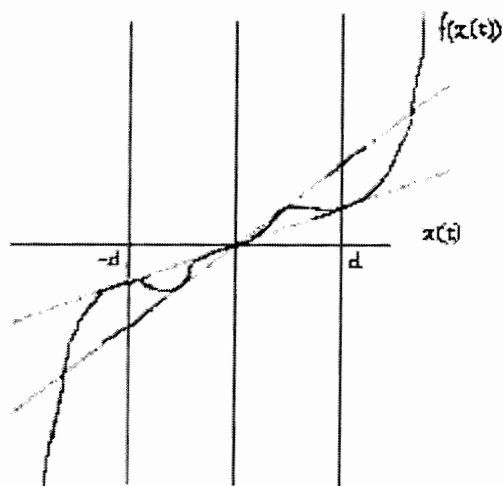
سیستم غیر خطی ساده $\dot{x}(t) = f(x(t))$ را که در آن $f(0) = 0$ ، را در نظر بگیرید . هدف یافتن ناحیه سراسری (*global sector*) است که $\dot{x}(t) = f(x(t)) \in [a_1 \ a_2]x(t)$ باشد .

شکل (۲-۴) ، روش غیر خطی ناحیه ای گلوبال را شرح میدهد . این روش ، یک ساختار مدل فازی دقیق را تضمین میکند .گاهی یافتن نواحی سراسری برای سیستمهای غیرخطی ، مشکل است . در اینگونه موارد میتوان غیرخطی را بصورت جزء محلی در نظر گرفت ، بدلیل این که متغیرهای سیستمهای فیزیکی اغلب محدودند .



شکل (۲-۴) : غیر خطی ناحیه ای کلی (sector nonlinearity)

شکل (۳-۴)، غیر خطی ناحیه ای محلی را شرح میدهد، دو خط نواحی محلی بین $-d < x(t) < d$ را نشان میدهند. مدل فازي، دقیقاً سیستم غیر خطی را در ناحیه محلی که $-d < x(t) < d$ است، نشان میدهد.



شکل (۳-۴) : غیر خطی ناحیه ای محلی

۴-۴-۴. تقریب محلی در فضاهای مجزاء فازی

راه دیگر بدست آوردن مدل‌های فازی T-S، اصطلاحاً تقریب محلی در فضاهای مجزای فازی گفته میشود. اساس این روش، تقریب جملات غیر خطی با جملات خطی تفکیک شده است. مثلاً برای مدل فازی پاندول معکوس دارای ۱۶ قانون بود، اما در مثال ۴ برای آن یک مدل ۲ قانونی با استفاده از روش تقریب محلی بدست می آوریم.

تعداد قوانین مدل، مستقیماً بستگی به تحلیل و طراحی شرایط LMI دارد به این دلیل که تعداد قوانین برای کل سیستم کنترل، ترکیب قوانین مدل و قوانین کنترل است.

نکته - همانطور که گفتیم تکنیک تقریب محلی به کاهش تعداد قوانین مدل فازی منجر میشود. اما طراحی قوانین کنترل مدل فازی بطور تقریبی، ممکن است پایداری سیستم‌های کنترل غیرخطی اصلی را تحت هر شرط کنترلی، تضمین نکنند.

۴-۵- جبران توزیعی موازی

جبران توزیعی موازی (PDC)، توسط کانگ و سوگنو آغاز شد. اما در این روش طراحی، پایداری سیستم‌های کنترل مطرح نمیشوند. جبران سازی توزیعی موازی، روشی برای طراحی یک کنترل کننده فازی با استفاده از یک مدل فازی T-S است، پس قبل از استفاده از این روش لازم است که موضوع کنترل (سیستم غیرخطی) با یک مدل فازی T-S بیان شود. یاد آور میشویم که بسیاری از سیستم‌های واقعی نظیر سیستم‌های مکانیکی و سیستم‌های آشوب با مدل فازی T-S قابل بیان هستند. هر قانون کنترل در روش (PDC) از قانون مربوط به مدل فازی T-S بدست می آید.

برای مدل‌های فازی ۴-۱ و ۲-۴ کنترل کننده فازی زیر را با (PDC) می سازیم:

قانون کنترلی i ام:

IF $z_1(t)$ is M_{i1} and...and $z_p(t)$ is M_{ip} ,

THEN $u(t) = -F_i x(t)$, $i = 1, 2, \dots, r$

قوانین کنترل فازی بدست آمده، یک کنترل کننده خطی دارند، اما کنترل کننده های دیگری نیز میتوان استفاده کرد ، مثلا کنترل کننده های فیدبک خروجی و کنترل کننده های فیدبک خروجی دینامیکی بجای کنترل کننده های فیدبک حالت .
در کل ، کنترل کننده فازی بصورت زیر نشان داده میشود :

$$u(t) = -\frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))F_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t))F_i x(t). \quad (18-4)$$

طراحی کنترل کننده فازی یعنی ، معین کردن بهره های فیدبک محلی F_i .
(PDC) یک روش ساده و طبیعی، برای بکار گیری سیستمهای کنترل غیر خطی را میدهد.
بهره های فیدبک محلی باید با استفاده از شرایط طراحی جهانی معین میشوند و لازمه آن این است که عملکرد کنترل پذیری و پایداری جهانی تضمین شود.

۴-۶- اصول طراحی بر اساس LMI

۴-۶-۱- طراحی کنترل کننده پایدار با استفاده از روش تکرار

کنترل کننده فازی (PDC) چنین است،

$$u(t) = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t))F_i x(t). \quad (19-4)$$

کنترل کننده (19-2) در کل غیر خطی است.

با جایگذاری (19-2) در رابطه (2-2) داریم:

$$x(t+1) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))\{A_i - B_i F_j\}x(t). \quad (20-4)$$

با استفاده از قضیه ۱، شرط کافی زیر را برای پایداری (مرتبه دوم) داریم،

فصل چهارم..... معرفی روش فازی مقاوم

قضیه ۳- تعادل سیستم فازی (4-20) پایدار مجانبی جهانی است، اگر یک ماتریس مثبت معین متعارفی P وجود داشته باشد، بطوریکه،

$$\{A_i - B_i F_j\}^T p \{A_i - B_i F_j\} - p < 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, r. \quad \forall t, h_i(z(t)).h_j(z(t)) \neq 0$$

رابطه (4-20) را میتوان بصورت زیر نیز نوشت :

$$x(t+1) = \left[\sum_{i=1}^r h_i(z(t))h_i(z(t))\{A_i - B_i F_i\}x(t) + 2 \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} h_i(z(t))h_j(z(t))G_{ij}x(t) \right], \quad (21-4)$$

که در آن، $G_{ij} = \frac{\{A_i - B_i F_j\} + \{A_j - B_j F_i\}}{2}, i < j \quad s.t. h_i \cap h_j \neq \emptyset$ ، است.

و از آنجا به شرط کافی زیر میرسیم، که به مراتب از شرایط قضیه ۲ آسانتر است.

قضیه ۴- نقطه تعادل سیستم کنترل فازی پایدار مجانبی جهانی است اگر یک ماتریس متعارفی مثبت معین p وجود داشته باشد بطوریکه دو شرط زیر برآورده شوند :

$$\{A_i - B_i F_j\}^T p \{A_i - B_i F_j\} - p < 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (22-4)$$

$$G_{ij}^T p G_{ij} - p < 0, \quad i < j \leq r \quad s.t. h_i \cap h_j \neq \emptyset. \quad (23-4)$$

مسئله طراحی کنترل، همان یافتن F_i هاست بگونه ای که روابط (4-22) و (4-23) در قضیه ۳ برقرار شوند. در این بخش ما ابتدا برای هر قانون یک کنترل کننده طراحی کرده و چک میکنیم که آیا شرایط پایداری برقرارند یا خیر؟ با استفاده از تکنیک LMI مسئله تحلیل پایداری را حل میکنیم اگر شرایط پایداری برقرار نبود، دوباره این راه را تکرار میکنیم.

فصل چهارم..... معرفی روش فازی مقاوم

ماتریس B متعارفی را در نظر بگیرید ، که $B_i = B(i=1,2,\dots,r)$ ، بنابراین قضیه ۳ به قضیه زیر کاهش می یابد :

قضیه ۴ - وقتی $B_i = B(i=1,2,\dots,r)$ باشد ، نقطه تعادل سیستم کنترل فازی (20-2) پایدار مجانبی گلوبال است ، اگر ماتریس معین مثبت متعارفی p وجود داشته باشد بطوریکه :

$$\{A_i - B_i F_i\}^T p \{A_i - B_i F_i\} - p < 0, \quad i=1,2,\dots,r \quad (24-4)$$

با داشتن یک B متعارفی اگر ما F_i ها را بگونه ای بیابیم که $A_i - B F_i = G$ ، باشد ،
 (G یک ماتریس هرویتز است) سیستم (20-4) یک سیستم خطی خواهد بود ، $x(t+1) = Gx(t)$.
 این نتیجه ، یک خطی سازی جهانی است .

۴-۷. طراحی کنترل کننده پایدار بوسیله نامساویهای ماتریس خطی (LMI)

یک کلاس از مسائل بهینه سازی عددی ، نامساوی ماتریس خطی (LMI) نامیده میشود . این مسائل بهینه سازی میتوانند در چند زمان حل شوند و از اینرو از جنبه تئوری قابل تکرار هستند. غیر از موارد ویژه ای ، این مسائل قابل حل بصورت تحلیلی نیستند بلکه باید ضرورتاً بصورت عددی حل شوند.
 تعریف ۱- یک LMI یک نامساوی ماتریسی است بصورت ،

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^m x_i F_i > 0, \quad (25-4)$$

که $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ متغیر و ماتریسهای متقارن $F_i = F_i^T \in R^{n \times n}, i=0, \dots, m$ داده شده اند.

سمبل > 0 ، در نامساوی بالا ، به این معنی است که $F(x)$ مثبت معین است. LMI های چند

گانه $F^{(i)} > 0, i=1, \dots, p$ میتوانند بصورت یک LMI قطری تنها $\text{diag}(F^{(1)}, \dots, F^{(p)}) > 0$ بیان شوند.

اغلب اوقات LMI ها ماتریسی هستند ، برای مثال نامساوی لیاپانف

$$A^T P A - P < 0, \quad (26-4)$$

که $A \in R^{n \times n}$ داده شده و $P = P^T$ متغیر است. در این موارد LMI را نمیتوان بصورت صریح بفرم $F(x) > 0$ نوشت .

LMI مسائل

یک LMI ی $F(x) > 0$ داده شده ، مسئله LMI ، یافتن x^{feas} است بطوریکه $F(x^{feas}) > 0$ باشد یا اینکه ثابت کنیم LMI ناممکن است . مثلا شرط پایداری همزمان لیاپایف در قضیه ۱ دقیقا یک مسئله LMI است : $A_i \in R^{n \times n}, i=1,2,\dots,r$ مفروض هستند ، و باید P را بگونه ای بیابیم که LMI ی ، $P > 0, A_i^T P A_i - P < 0, i = 1,2,\dots,r$ را برآورده سازد یا اینکه ثابت کنیم چنین

P ایی وجود ندارد . مسائل LMI هم بصورت تئوری و هم تجربی قابل اجرا هستند.

روش طراحی گفته شده دربخش قبل شامل یک روش تکرار است، برای هر قانون ، یک کنترل کننده بر اساس عملکرد محلی طراحی میشود . سپس یک تحلیل پایداری بر اساس LMI انجام میشود که آیا شرایط پایداری برقرار هستند؟ در موقعیکه شرایط پایداری برقرار نباشند برای هر قانون ، مجددا کنترل کننده طراحی میشود .

در اینجا ما فقط خلاصه ای از روشهای LMI در مسائل طراحی کنترل را شرح میدهم .

مورد ساده ای را در نظر بگیرید که $r=1$ باشد به این معنی که فقط و فقط یک قانون IF - THEN وجود دارد.

سیستم نامتغیر با زمان خطی چنین میشود:

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t). \quad (27-4)$$

برای یک بهره کنترل معلوم F با استفاده از تئوری پایداری استاندارد برای سیستمهای نامتغیر با زمان خطی یا قضیه 2 ، سیستم (27-2) پایدار است اگر $P > 0$ ی وجود داشته باشد بقسمی که:

$$\{A - BF\}^T P \{A - BF\} - P < 0. \quad (28-4)$$

مسئله طراحی کنترل یافتن یک بهره فیدبک حالت F است بطوریکه سیستم حلقه بسته پایدار باشد. اگر چنین F ی وجود داشته باشد ، سیستم را پایدار مرتبه دوم گویند.

با ضرب کردن طرف راست و چپ نامساوی (28-4) و تغییر متغیر $X = P^{-1}$ رابطه بصورت زیر بازنویسی میشود:

$$X \{A - BF\}^T X^{-1} \{A - BF\} X - X < 0.$$

و تعریف میکنیم $M = FX$ ، بطوریکه برای $X > 0$ داشته باشیم: $F = MX^{-1}$ و جایگذاری در رابطه

$$X - \{AX - BM\}^T X^{-1} \{AX - BM\} > 0.$$

بالا داریم،

این نامساوی غیر خطی بفرم LMI نوشته میشود ، نتیجه شده چنین است:

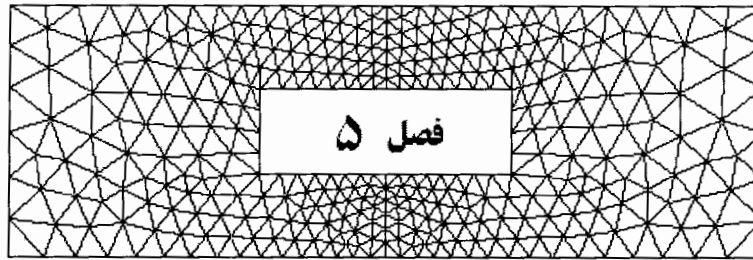
$$\begin{bmatrix} X & (AX - BM)^T \\ (AX - BM) & X \end{bmatrix} > 0 \quad (29-4)$$

بنابراین سیستم (27-4) پایدار از مرتبه دوم است اگر $X > 0$ و M وجود داشته باشند بقسمی که LMI (29-4) برقرار باشند، بهره فیدبک حالت $F = MX^{-1}$ است. براحتی میتوان روش طراحی کنترل براساس LMI را به بیش از یک قانون از مدل‌های فازی تاکاگی - سوگنو تعمیم داد. برای مثال پایداری مرتبه دوم مدل‌های فازی تاکاگی - سوگنو با استفاده از فیدبک حالت خطی میتواند بصورت مسئله LMI زیر بیان شود:

$$\begin{bmatrix} X & (A_i X - B_i M)^T \\ (A_i X - B_i M) & X \end{bmatrix} > 0, i = 1, 2, \dots, r,$$

$$X > 0$$

ما در این پایان نامه سیستم غیر خطی را با دو حالت حدی تقریب زده ایم و چون سیستم از لحاظ پایداری شکلی نداشت کنترل PDC را بدین گونه طراحی نموده ایم و نیازی به اعمال مساله LMI و تلاش در جهت پایدار سازی آن به صورت گلوبال نبود. در فصل بعد الگوریتم اعمالی و روش پیشنهادی را بر دو سیستم تک ماشینه و چند ماشینه اعمال خواهیم نمود.



اعمال روش فازی مقاوم بر کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)

مقدمه

همانگونه که در فصلهای پیش بیان گردید با توجه به مشخصات مطلوب کنترل کننده یکپارچه توان و عملکرد مناسب کنترلر فازی مقاوم [21-31] و از طرفی مشکلات روشهای رایج در کنترل نوسانات توان در این پایان نامه روش کنترل فازی مقاوم به منظور پایدار سازی پیشنهاد شده است . روش فازی مقاوم بر اساس مدل بوده و لازم است اجزاء سیستم به طور دقیقی مدل سازی شوند که با توجه به این موضوع در این پایان نامه مدل تزریقی برای کنترل کننده یکپارچه توان به کار رفته است. در این بخش ابتدا مدل تزریقی [46] کنترل کننده یکپارچه بررسی می گردد و سپس به مدل سازی اجزاء مختلف سیستم از جمله خطوط و ترانسفورماتورها خواهیم پرداخت . با توجه به اینکه شبیه سازی توسط سیمولینک نرم افزار Matlab صورت گرفته است بلوک مدل کننده خطا در سیستم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پس از آن الگوریتم پیشنهادی جهت اعمال کنترل کننده فازی مقاوم بر Upfc بر اساس آنچه در فصل چهارم به آن اشاره شده است، تشریح

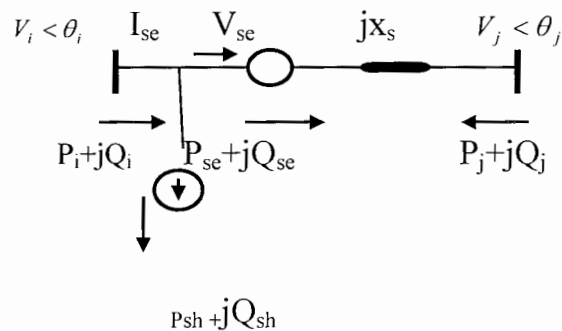
خواهد شد و سپس در دو مرحله اعمال کنترل کننده را بر سیستم تک ماشین باس بینهایت و سیستم چند ماشینه و کارایی عملکرد این استراتژی کنترلی اعمالی را نشان خواهیم داد.

۵-۱. مدل سازی

۵-۱-۱. مدل سازی کنترلر یکپارچه توان (UPFC)

پیشرفت تکنولوژی الکترونیک قدرت در طول دو دهه گذشته ، سبب کاربرد گسترده آن در تمام سطوح ولتاژی از فشارقوی در انتقال تا ولتاژهای پایین در مصرف کننده های کوچک شده است. ادوات قابل کنترل سری (CSD) از جمله وسایل ساخته شده توسط عناصر الکترونیک قدرت هستند که در سیستم قدرت مورد استفاده قرار می گیرند.

شکل (۵-۱) مدار معادل CSD را که بین شین های i و j قرار دارد ، نشان می دهد [47].



شکل (۵-۱) : مدار معادل ادوات قابل کنترل سری

با توجه شکل (۵-۱) داریم :

$$P_i = P_{se} + P_{sh} \quad , \quad Q_i = Q_{se} + Q_{sh} \quad (۵-۱)$$

که :

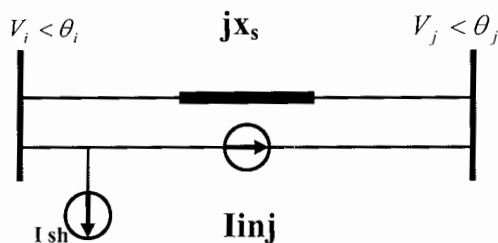
- P_i : کل توان حقیقی تزریقی از شین i -ام توسط CSD
- Q_i : کل توان موهومی تزریقی از شین i -ام توسط CSD
- P_{se} : توان حقیقی تزریقی سری از شین i -ام توسط CSD
- Q_{se} : توان موهومی تزریقی سری از شین i -ام توسط CSD
- P_{sh} : توان حقیقی تزریقی موازی از شین i -ام توسط CSD
- Q_{sh} : توان موهومی تزریقی موازی از شین i -ام توسط CSD

همانگونه که در مدار معادل شکل (۵-۱) دیده می شود CSD باعث اعمال یک ولتاژ سری قابل کنترل V_{se} به سیستم می گردد. قابل توجه است که در CSD این منبع ولتاژ سری بیشترین اثر را در پایدار سازی سیستم قدرت دارد [۴۶ و ۴۷].

در UPFC اندازه و فاز ولتاژ سری قابل کنترل است. بنابراین می توان فرض نمود که منبع ولتاژی بصورت سری بین شین های i و j از سیستم قدرت وجود دارد. این شاخه به صورت یک منبع ولتاژ ایده آل و یک راکتانس سری با آن مدل می گردد. این راکتانس سری در UPFC همان راکتانس نشی ترانسفورمر (jX_s) بکار رفته در این تجهیز می باشد.

ضمناً با استفاده از قضیه تونن می توان منبع جریان I_{inj} را به جای منبع V_{se} در نظر گرفت که در

اینصورت مدل تزریقی شکل (۵-۲) بدست می آید. در این شکل $I_{inj} = -j \frac{V_{se}}{X_s} = -j b_s V_{se}$ می باشد



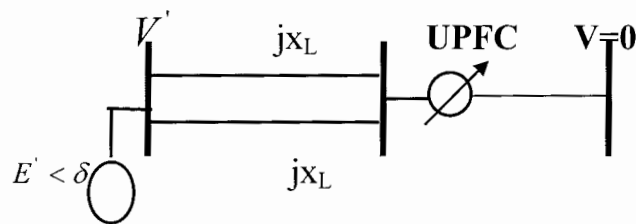
شکل (۵-۲) : مدار تزریقی با جایگزینی I_{inj} به جای V_{se}

در UPFC مقادیر منابع جریان سری I_{inj} و موازی I_{sh} به ترتیب متناسب با توانهای تزریقی سری و موازی هستند. با صرفنظر از تلفات این ادوات داریم:

$$\begin{aligned}
 P_i &= b_s V_i V_j (u_1 \sin \theta_{ij} + u_2 \cos \theta_{ij}), P_j = -P_i \\
 Q_i &= u_1 b_s V_i^2, Q_j = -b_s V_i V_j (u_1 \cos \theta_{ij} - u_2 \sin \theta_{ij}) \\
 u_1 &= r \cos \gamma, u_2 = r \sin \gamma \\
 r &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2}, \gamma = \arctan\left(\frac{u_2}{u_1}\right)
 \end{aligned}
 \tag{۲-۵}$$

u_1, u_2 : ورودیهای کنترل

در این پایان نامه با استفاده از روش فازی مقاوم سیگنالهای کنترلی تولید شده و توانهای اعمالی توسط ادوات UPFC به سیستم قدرت طوری تنظیم می‌شوند که سبب بهبود پایداری سیستم می‌گردند.



شکل (۳-۵): سیستم قدرت تحت مطالعه

با توجه به مقالات جدیدی که در زمینه استفاده از ادوات انتقال قدرت انعطاف پذیر نوشته شده است [۳۹-۴۴] ملاحظه می‌گردد که قابلیت UPFC در $\gamma = 90^\circ$ درجه حداکثر می‌باشد که با توجه به این موضوع در این پایان نامه این فرض در نظر گرفته شده است. در نتیجه این فرض $u_1 = 0$ می‌گردد و کنترل از طریق بردار u_2 صورت می‌پذیرد.

۵-۱-۲. مدل سازی ژنراتور و خطوط

برای شبیه سازی ژنراتور از معادلات آن در فضای حالت استفاده نموده ایم. برای این منظور از مدل ژنراتور با دو متغیر حالت استفاده می کنیم. به این ترتیب که زاویه رتور و سرعت سنکرون $X = [\delta, \omega - \omega_s]^T$ را به عنوان متغیر های حالت در نظر می گیریم. بر این اساس برای معادلات داریم [48]:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_s \\ \dot{\omega} = \frac{\{P_m - P_e(\delta) - D(\omega - \omega_s)\}}{M} \end{cases} \quad (۳-۵)$$

$$P_e(\delta) = \frac{E'V\sin\delta}{X_L}$$

همانگونه که مشخص است ملاحظه می شود در نوشتن معادلات حالت لازم است توان الکتریکی، مکانیکی، ممان اینرسی و سایر مولفه های مرتبط با سیستم را در نظر گرفت. در معادله بالا:

P_e : توان الکتریکی که مقدار آن از رابطه بالا بدست خواهد آمد.

P_m : توان مکانیکی اعمالی به ژنراتور است و با توجه به اینکه توربین های چرخاننده ژنراتور عملاً تغییر سرعتی ندارند، توان مکانیکی ورودی به ژنراتور همواره مقداری ثابت و برابر یک پریونیت می باشد.

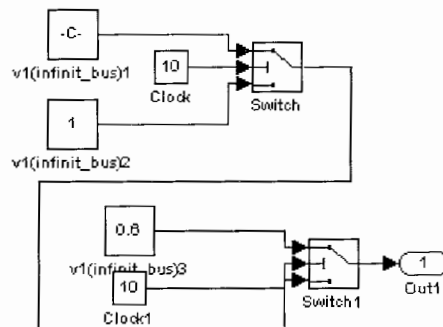
M : ثابت اینرسی رتور ژنراتور

D : ضریب میرایی سیستم

همچنین برای مدل سازی خطوط انتقال با توجه به اینکه در این تجهیز اثر سلفی بسیار غالب بر اثر مقاومتی است، لذا هر کدام از خطوط به عنوان یک راکتانس با مقدار معلوم در نظر گرفته و به سیستم اعمال می کنیم. از طرفی دیگر این فرض برای مطالعات دینامیکی مناسب تر می باشد زیرا با

صرفه نظر کردن از مقاومت خطوط و در نظر گرفتن تنها راکتانس سلفی ، کنترلر برای حالت ضعیف تری از سیستم طراحی خواهد شد و در نتیجه ، در عمل و در حضور مقاومت خط بهتر عمل خواهد کرد.

۵-۲. شبیه سازی خطا(اغتشاش) در سیستم



شکل ۵-۴: مدل سازی خطا

در سمولینک

همانگونه که بیان شد، هدف از این شبیه سازی بررسی سیستم در مواقع وقوع اغتشاش در آن است لذا ، برای ایجاد اغتشاش در سیستم فرض می کنیم که در نقطه ای نزدیک باس بینهایت اتصال کوتاه سه فاز متقارن گذرا ایجاد شده است. برای شبیه سازی این اتصالی در نرم افزار MATLAB از کلید شکل (۴-۵) استفاده شده است که در آن ولتاژ برای مدت مشخصی برابر صفر می شود. بدین معنی که اتصالی اتفاق افتاده است و سپس با رفع اتصالی کلید به وضعیت اولیه خود برگشته و ولتاژ دوباره به مقدار قبل از وقوع خطا برمی گردد؛ در ضمن این کار نوسانات توان و زاویه بار کاملاً مشهود می باشد از این رو جهت تنظیم آن باید از استراتژی کنترلی مناسبی استفاده شود. روشهای متداول برای این منظور در فصلهای پیشین مطرح گردید و باتوجه به دلایل مطرح شده UPFC به عنوان کنترل کننده به همراه استراتژی فازی روباست به عنوان یک گزینه پیشنهادی مطرح گردید.

۵-۳. الگوریتم کار و مراحل اعمال کنترل کننده

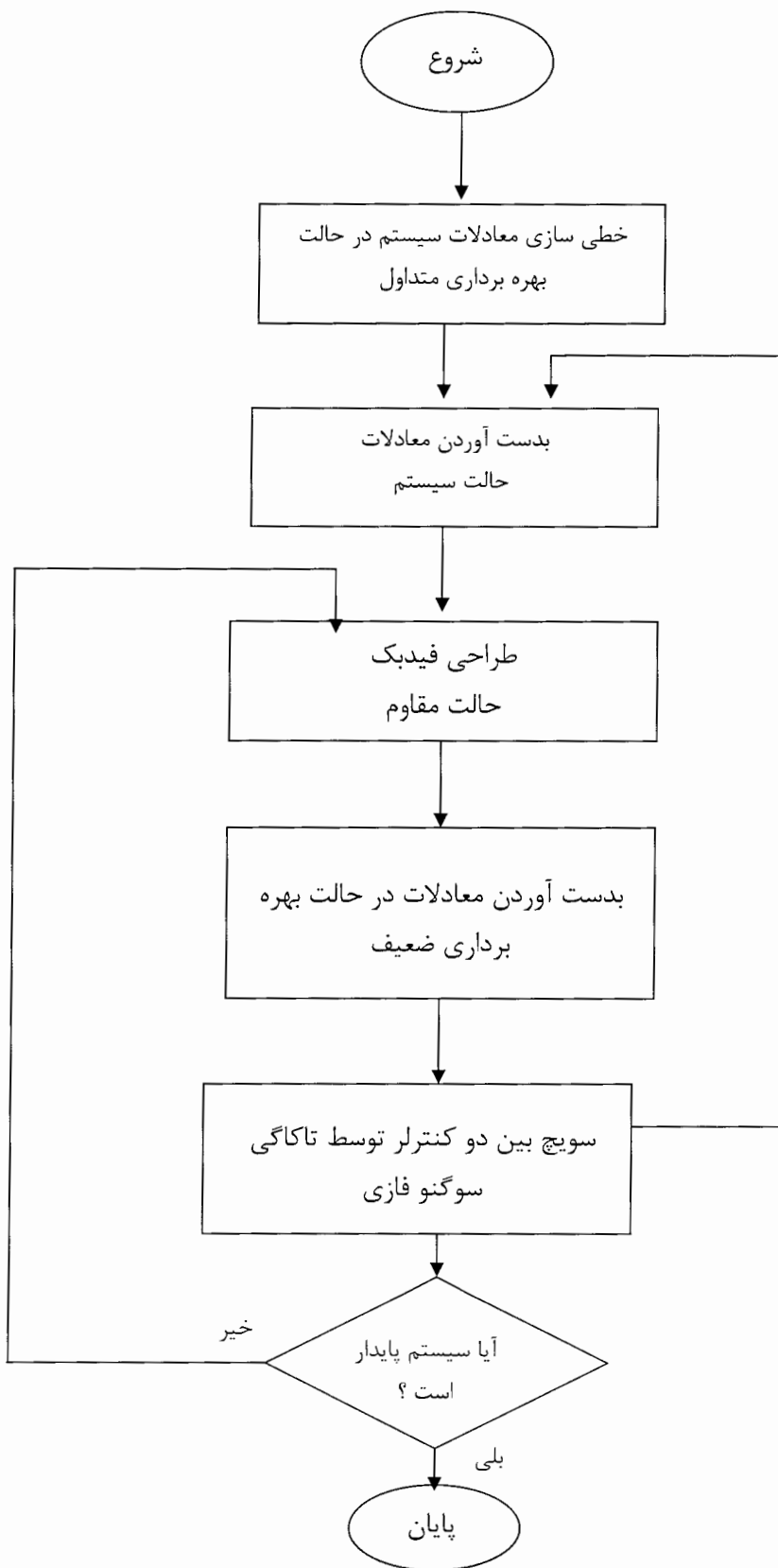
مراحل اعمال کنترل فازی مقاوم بدین صورت است که ابتدا سیستم غیر خطی شبیه سازی می گردد و سپس همانطور که اشاره گردید خطای اتصال کوتاه سه فاز که مدل شده بر روی سیستم اعمال

می شود پس از مدتی این خطا برداشته شده و مشاهده می کنیم که نوسانات توان و زاویه بار ادامه خواهد داشت سپس با اعمال کنترلر فازی مقاوم سیستم را پایدار خواهیم کرد. همانگونه که اشاره گردید این کنترلر خواهد توانست ایراد های چهارگانه کنترلر های مرسوم را برطرف کند.

مراحل طراحی کنترلر به صورت زیر بوده است :

- ۱- خطی سازی معادلات سیستم در حالت عادی و بهره برداری متداول
- ۲- بدست آوردن معادلات حالت سیستم
- ۳- طراحی فیدبک حالت روبات برای سیستم
- ۴- به دست آوردن معادلات در حالت بهره برداری از سیستم ضعیف
- ۵- اجرای مراحل ۲ و ۳
- ۶- طراحی فازی به روش تاکاگی - سوگنو و سویچ بین این دو کنترلر روبات

الگوریتم زیر مراحل طراحی را نشان می دهد :



شکل (۵-۵): الگوریتم مراحل کار و طراحی

۴-۵. حالت تک ماشین باس بینهایت

پارامترهای سیستم مورد مطالعه که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است در جدول (۱-۵) نشان داده شده است.

راکتانس سری UPFC	ولتاژ باس بینهایت	پارامترهای کنترلی UPFC		راکتانس خط دو مداره ۲-۱	توان انتقالی از طریق باس بینهایت
J .006	$V=1<0$	$\gamma = 90^\circ$	R=.01	J .1	.8+j .6

جدول (۱-۵) : پارامترهای سیستم مورد مطالعه

پارامترهای ژنراتور نیز در جدول (۲-۵) ملاحظه می گردد:

Kd	Xq	Xd	E _{max}	E _{min}	L'ads	Ladu	Rfd	Lfd	H
100	1.66	1.77	.7	-6.4	.1	.15	.0006	.165	377

جدول (۲-۵) : پارامترهای ژنراتور

۴-۵.۱. بدست آوردن نقطه تعادل

برای بدست آوردن نقطه تعادل مدل تزریقی که برای نخستین بار توسط آقای نوروزیان و اندرسون [46] از دانشگاه لوند سوئد پیشنهاد گردیده است در نظر می گیریم. با توجه به شعاعی بودن شبکه از روش پس رو به منظور پخش بار استفاده شده است که روند کلی و محاسبات مربوطه از روابط (۴-۵) تا (۱۱-۵) بدست می آید:

$$V_3=1<0$$

$$V_2=V_3+J*.006*\left(\frac{S_D+S_{s3}}{V_3}\right) \quad (4-5)$$

$$S_{s3} = -b_s * V_2 * V_3 * u * \cos(\theta_2 - \theta_3) + j * b_s * V_2 * V_3 * u * \sin(\theta_2 - \theta_3)$$

$$b_s = \frac{1}{X_s} = 166.7$$

$$S_D + S_{S3} = .8 + j * .6 + [-166.7 * u * V2 * (\cos(\theta_2) - j * \sin(\theta_2))]$$

$$I_{23} = \left(\frac{S}{V_3}\right)^* = -166.7 * u * V2 * (\cos(\theta_2) + j * \sin(\theta_2)) + .8 - j * .6$$

$$V_2 = 1 + j * .006 * [(\cos(\theta_2) + j * \sin(\theta_2)) * (-166.7 * u * V2) + .8 - j * .6]$$

(۵-۵)

$$V_2 * \cos(\theta_2) = 1 + V2 * u * \sin(\theta_2)$$

$$V2 * \sin(\theta_2) = -u * V_2 * \cos(\theta_2)$$

یادآوری:

$$\begin{aligned} A_1 * \sin(\theta) + B_1 * \cos(\theta) &= C_1 \\ A_2 * \sin(\theta) + B_2 * \cos(\theta) &= C_2 \end{aligned}$$

از دستگاه معادلات روابط زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned} (C_1 * B_2 - B_1 * C_2)^2 + (C_2 * A_1 - C_1 * A_2)^2 &= (A_1 * B_2 - A_2 * B_1)^2 \\ \theta &= \sin^{-1} \left(\frac{C1 * B2 - B1 * C2}{A1 * B2 - A2 * B1} \right) \end{aligned}$$

(۶-۵)

با اعمال روابط (۵-۵) به دستگاه معادلات، مقدار V_2^2 بر حسب پارامتر u بدست می آید و با توجه به

اینکه $r = .01$ انتخاب شده است مقدار $V_2 = 1^{p.u}$ بدست می آید پس از آن با کمک رابطه دوم (۵-۵)

(۶)، مقدار زاویه باس (۲) را بدست می آوریم که در این حالت خواهیم داشت:

$$\theta = -.5729$$

حال برای بدست آوردن ولتاژ باس (۱) خواهیم داشت:

$$S_{12} = S_{S2} + S_{S3} + S_D$$

$$I_1 = \left(\frac{S_{12}}{V_2}\right)^*$$

$$V_1 = V_2 + j * I_1$$

با کمک رابطه (۶-۵) مقدار اندازه و زاویه ولتاژ باسبار یک را بدست می آوریم :

$$V_1 = 1.0613 \angle 3.75^\circ$$

همانطور که گفته شد در اینجا از روش فازی مقاوم استفاده می کنیم یعنی سیستم غیر خطی را با استفاده از روش تقریب محلی با دو حالت بهره برداری تقریب می زنیم. در حالت بهره برداری دیگر که شبکه ضعیف شده را مد نظر قرار داده ایم فرض می کنیم یک خط بین باس ۱ و ۲ قطع شود و با فرض آن پخش بار مجددا صورت می گیرد. نتایج پخش بار برای هر دو حالت بهره برداری در جدول زیر مشاهده می گردد:

ولتاژ	مد بهره برداری	بهره برداری از شبکه با عملکرد نرمال	بهره برداری از شبکه تضعیف شده
V1		1.0613 \angle 3.75°	1.128 \angle 7.58°
V2		1 \angle - .5729°	1 \angle .5729°
V3		1 \angle 0°	1 \angle 0°

جدول (۳-۵) : نتایج پخش بار سیستم تک ماشینه

در مرحله بعد باید خطی سازی صورت گیرد. همانطور که از مراجع موجود یافت می گردد برای مطالعات نوسانات فرکانس پایین مدل دو حالتی کفایت می کند از این رو و با توجه به معادلات ماشین سنکرون باید i_d و P_e محاسبه و خطی شوند و سپس با جایگزاری در معادلات ماشین مدل خطی بدست آید.

برای خطی سازی مراحل هشت گانه زیر باید انجام شود :

۱- محاسبه V_2 خطی شده

۲- محاسبه V_1 از رابطه $V_1 = V_2 + j * X_L * I_1$

۳- بدست آوردن $\tan(\theta_1)$ از رابطه $V_1 = V_2 + j * X_L * I_1$ و خطی سازی آن حول نقطه کار

۴- محاسبه δ از رابطه : $\overline{OA} = \overline{V_1} + j.X_q.\overline{I}$

۵- خطی سازی I_d

۶- محاسبه $\sin(\delta)$ و $\sin(2\delta)$ به صورت خطی

۷- محاسبه P_e برای ماشین قطب برجسته از رابطه :

فصل ۵ اعمال روش فازی مقاوم...

$$P_e = \frac{V_1 \cdot E}{X_d} \sin(\delta) + 1/2 * V_1^2 \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2\delta) \quad (7-5)$$

۸- جایگزاری P_e و I_d در معادله اصلی

۵-۴-۲. خطی سازی معادلات

با در نظر گرفتن معادلات (5-4) و (5-5) و توان خروجی سیستم به باس بینهایت برابر P_e خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} x &= V_2 \cdot \cos(\theta_2) \\ y &= V_2 \cdot \sin(\theta_2) \end{aligned}$$

لذا:

$$\begin{aligned} x &= 1 + u \cdot y \\ y &= -u \cdot x \end{aligned}$$

در نتیجه با در نظر گرفتن $V_2 = \frac{1}{u^2 + 1} - j \frac{u}{u^2 + 1}$ و خطی کردن سیستم حول نقطه کار خواهیم داشت:

$$V_2 = \frac{-2u}{u^2 + 1} \cdot \Delta u - j \frac{1 - u^2}{(u^2 + 1)^2} \cdot \Delta u = (-0.02 - j) \cdot \Delta u \quad (8-5)$$

با محاسبه I_1 خواهیم داشت:

$$I_1 = \frac{j166.7u^2}{1 + ju} + [0.8 - j \cdot 0.6] \cdot \left[\frac{u^2 + 1}{1 + ju} \right]$$

و از آنجا V_1 و در نتیجه زاویه آن به شرح زیر محاسبه می گردد:

$$V_1 = \frac{1}{u^2 + 1} - j \frac{u}{u^2 + 1} + \frac{-16.67u^2(1 - ju)}{1 + u^2} + [0.06 + j \cdot 0.08] \cdot (1 - ju) \quad (9-5)$$

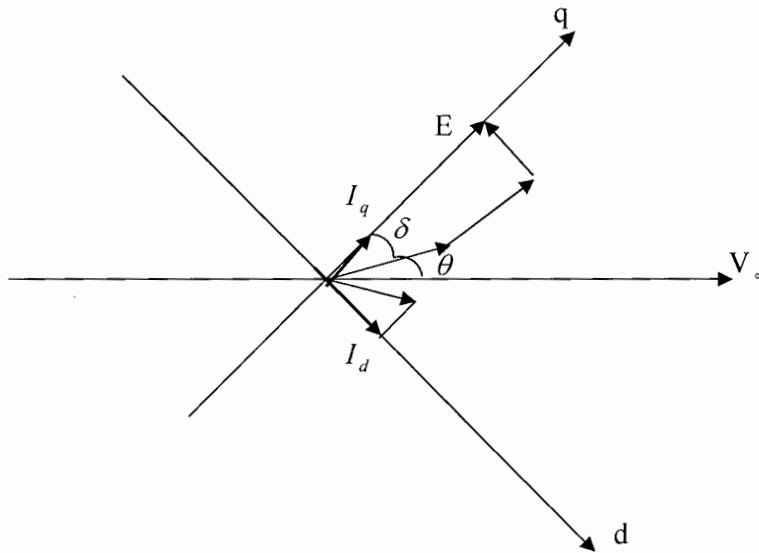
و در نتیجه:

$$\tan(\theta_1) = \frac{16.61u^3 + .08u^2 - 1.06u + .08}{.08u^3 - 16.61u^2 + .08u + 1.06}$$

در این مرحله δ را محاسبه می کنیم:

$$\vec{OA} = \vec{V}_1 + j.X_q.I = 1.0613\angle 3.75^\circ + j1.66 \left(\frac{1.0613\angle 3.75^\circ - 1\angle -0.5729^\circ}{j.1} \right) = 2.423\angle 34.2278^\circ$$

$$\delta + \theta = 34.2278 \Rightarrow \delta = 30.4778^\circ$$



شکل (۵-۶): دیاگرام برداری محور d و q ماشین سنکرون

در این مرحله جریان محور d و توان را به صورت خطی بدست می آوریم:

$$\sin(\delta) = \cos(\delta) |_{*} . \Delta\delta = .862\Delta\delta$$

$$\sin(2\delta) = 2 \cos(2\delta) |_{*} . \Delta\delta = .97\Delta\delta$$

$$\vec{OA} = \left[\frac{1}{u^2 + 1} - \frac{16.67u^2}{1 + u^2} + .06 + .08u - \frac{276.72u^2}{1 + u^2} + 1.66 * .6 + 1.66 * .6 * u \right] +$$

$$j \left[-\frac{u}{u^2 + 1} + \frac{16.67 * u^3}{1 + u^2} - .06 * u + .08 + \frac{276.72u^3}{1 + u^2} + 1.33 - u(1.66)(.6) \right]$$

اگر بخواهیم I_d را خطی کنیم به صورت زیر عمل می نماییم:

$$I_d = I_1 \sin(\delta + \theta + |\varphi_{I_1}|) \quad (۱۰-۵)$$

پس I_d به صورت زیر در می آید:

$$I_d = \left[\frac{dI_1}{du} \sin(\theta + \delta + |\varphi_{I_1}|) + I_1 \frac{d(\theta + \delta + |\varphi_{I_1}|)}{du} \cdot \cos(\theta + \delta + |\varphi_{I_1}|) \right] \cdot \Delta u \quad (11-5)$$

حال با محاسبه هر دو جزئی که I_d را تشکیل داده اند و خطی سازی آنها I_d را به صورت خطی بدست خواهیم آورد. با انجام این محاسبات I_d به فرم زیر بدست خواهد آمد:

$$I_d = -1.6374\Delta u + .1\Delta\delta$$

از طرفی با در نظر گرفتن ژنراتور به صورت قطب برجسته مقدار P_e به شکل زیر بدست خواهد آمد. لازم به توضیح است که مقدار حاصل با خطی سازی هر دو جزء $\frac{V_1 E}{X_d} \sin(\delta)$ و $\frac{1}{2} V_1^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta)$ جمع کردن آنها با یکدیگر بدست آمده است.

$$P_e = 2.2024\Delta u - .1\Delta\delta$$

با قرار دادن مقادیر فوق در معادلات غیر خطی ماشین خواهیم داشت :

$$\begin{bmatrix} \delta^\circ \\ \Delta\omega_r^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 314.1593 \\ -0.1 & -100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \Delta\omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.292 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1326 \end{bmatrix} T_m$$

قطبهای سیستم ۳۱۵۲ و ۹۹،۶۸- می باشد. از این رو باید فید بک حالتی طراحی گردد که قطب نزدیک به مبدا را در فاصله دورتری بیندازد.

محاسبات فوق را برای سیستم در حالتی که خط ۱-۲ یک مداره گردد و بار نیز به مقدار ۲. اضافه شود تکرار می کنیم. این حالت سخت ترین حالت بهره برداری است چراکه یک خط قطع شده و با نیز افزایش یافته است همانگونه که از فصل ۴ به یاد داریم می توان سیستم غیر خطی را بین این دو حالت مدل نمود.

معادلات حالت برای سیستم در وضعیت دوم در زیر نشان داده شده است:

$$\begin{bmatrix} \delta^\circ \\ \Delta\omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 314.1593 \\ -0.02 & -100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \Delta\omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.532 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.256 \end{bmatrix} T_m$$

محاسبات مربوطه برای بدست آوردن مد های سیستم نشان می دهد که مد ها در این حالت در ۰.۶- و در ۹۹،۹۴- قرار گرفته اند که باید برای این حالت نیز یک فیدبک حالت طراحی نماییم تا قطبی را که نزدیک به محور است در فاصله دورتری قرار دهد.

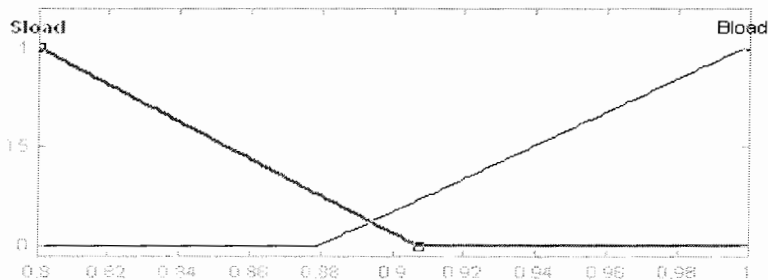
۵-۴-۳. طراحی فیدبک حالت برای هر دو حالت بهره برداری

فیدبک حالت $U=-K.X$ را به گونه ای طراحی می کنیم که قطبهای سیستم را به ۲- و ۳- انتقال یابد.

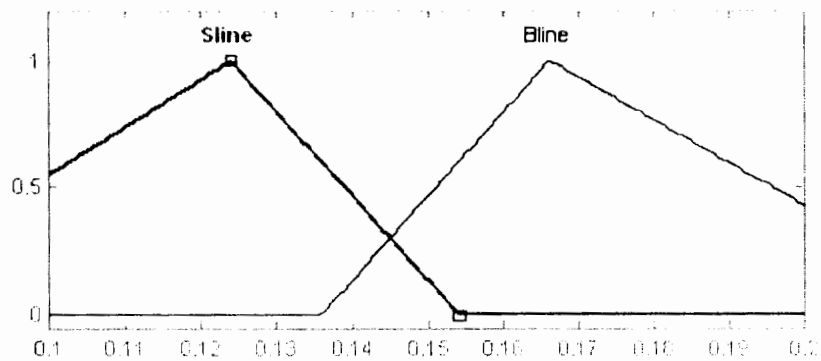
در این حالت بردار k برای حالت دوم به صورت $k=[.017 \quad 180.6]$ و در حالت اول این بردار به صورت $k=[.28 \quad 325.34]$ در می آید. لازم به توضیح است که دستور مورد استفاده در MATLAB دستور ACKER بوده است.

۵-۴-۴. طراحی فازی تاکاگی - سوگنو

با توجه به اینکه فیدبک های حالت طراحی شده قطبهای سیستم را در محل مناسب قرار می دهد حال به کمک قوانین فازی مناسب به روش تاکاگی- سوگنو بین این دو کنترل کننده سوئیچ می کنیم. مجموعه های فازی که بدین منظور به کار رفته اند در شکل (۷-۵) و (۸-۵) مشاهده می گردند:



شکل (۷-۵): نمایش توابع عضویت برای مجموعه فازی بار



شکل (۵-۸): نمایش توابع عضویت برای مجموعه فازی رلوکتانس خط

قواعد فازی زیر بیانگر ارتباط مجموعه های فوق و کنترلر های فیدبک حالت می باشد. اگر بردار k طراحی شده برای حالت نرمال و حالت شبکه ضعیف را به ترتیب k_1 و k_2 بنامیم خواهیم داشت:

Rule 1: if Sload and Sline then k_1

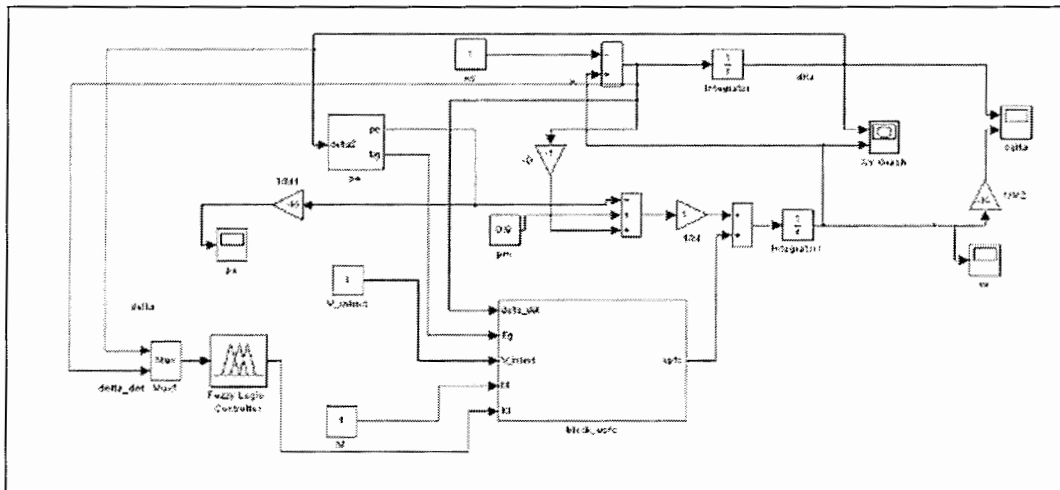
Rule 2: if Bload and Bline then k_2

Rule 3: if Sload and Bline then $(k_1+k_2)/2$

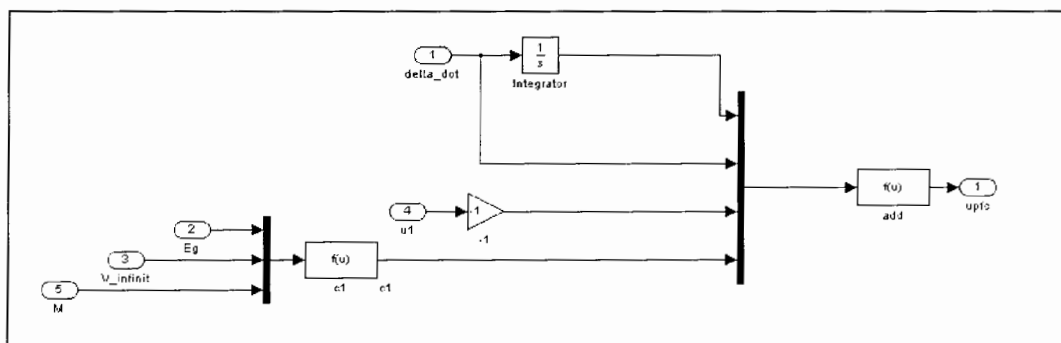
Rule 4: if Bload and Sline then $(k_1+k_2)/2$

۵-۴-۵. شبیه سازی و نتیجه گیری

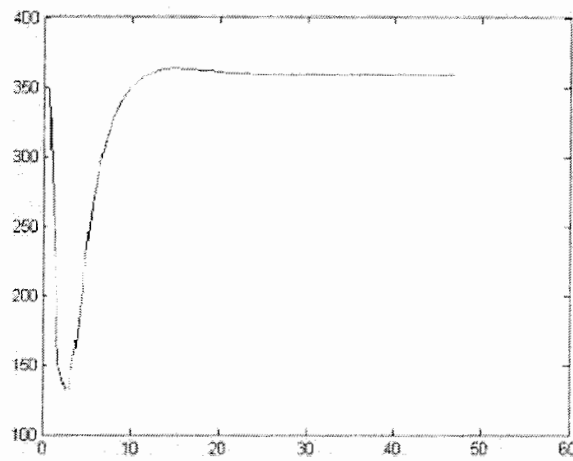
سیستم تک ماشینه شبیه سازی شده و کنترلر یکپارچه توان که در آن به کار گرفته شده است در اشکال (۵-۹) تا (۵-۱۰) مشاهده می گردد همچنین فرض می گردد که خطا به مدت ۳. برطرف می شود. بدون در نظر گرفتن کنترل این نوسانات همچنان ادامه خواهد داشت اما با اعمال کنترل فازی مقاوم ملاحظه می گردد که این نوسانات به سرعت میرا می گردد. نتایج شبیه سازی در اشکال (۵-۱۱) تا (۵-۱۶) مشاهده می گردد. لازم به ذکر است که در کلیه شبیه سازی ها محور افقی بیانگر زمان بر حسب ثانیه و محور عمودی برای منحنی های توان، سرعت زاویه ای و زاویه روتور به ترتیب بر حسب مگا وات، رادیان بر ثانیه و رادیان می باشد.



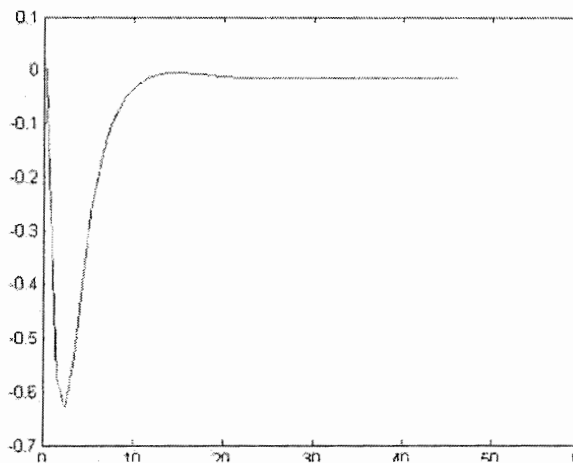
شکل (۵-۹): سیستم تک ماشینیه شبیه سازی شده



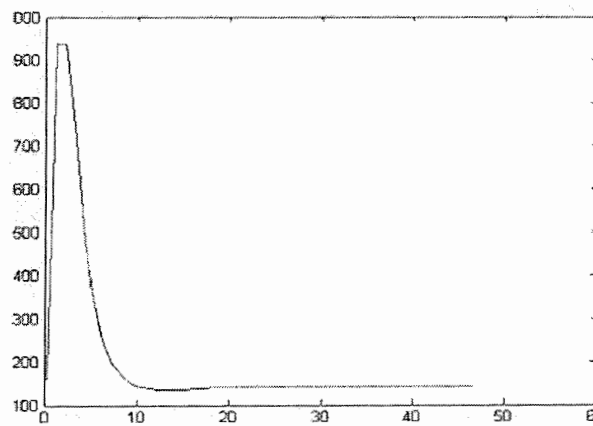
شکل (۵-۱۰): مدل کنترلر یکپارچه توان



شکل(۵-۱۱): نمایش تغییرات سرعت زاویه ای به کمک کنترلر فازی مقاوم

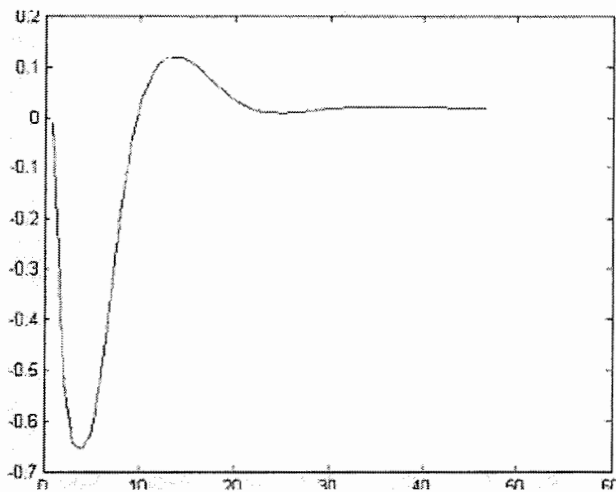


شکل(۵-۱۲): نمایش تغییرات زاویه روتور به کمک کنترل کننده فازی مقاوم

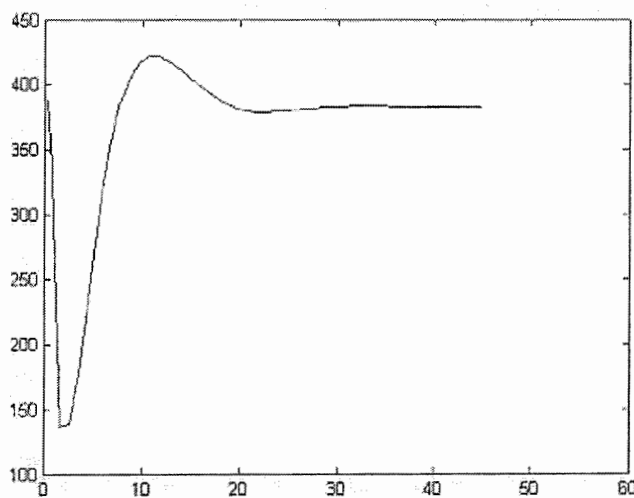


شکل(۵-۱۳): نمایش تغییرات توان تزریقی از شین بینهایت در حضور کنترلر فازی مقاوم

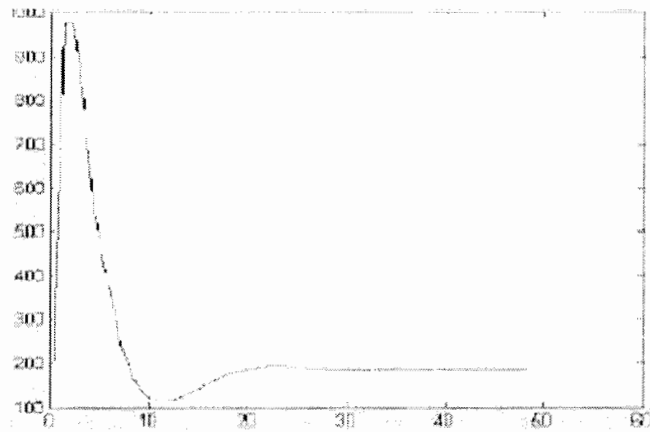
در مرحله بعد جهت تست مقاوم بودن و کارایی کنترلر، توان را به مقدار ۱۰ درصد افزایش می دهیم و فرض می کنیم خط ۱-۲ دارای دو ترانسفورماتور مجهز به تپ چنجر می باشد به گونه ای که راکتانس این خط به ۱،۸ رسیده است حال با این تغییر در ساختار سیستم و کنترلر طراحی شده ؛ بار دیگر فرض می کنیم خطا صورت گرفته باشد و در مدت زمان ۳ ثانیه برطرف شود در این صورت نتایج شبیه سازی را در اشکال (۵-۱۴) تا (۵-۱۶) ملاحظه می شود.



شکل (۵-۱۴): نمایش تغییرات زاویه روتور به کمک کنترل کننده فازی مقاوم



شکل (۵-۱۵): نمایش تغییرات سرعت زاویه ای به کمک کنترلر فازی مقاوم

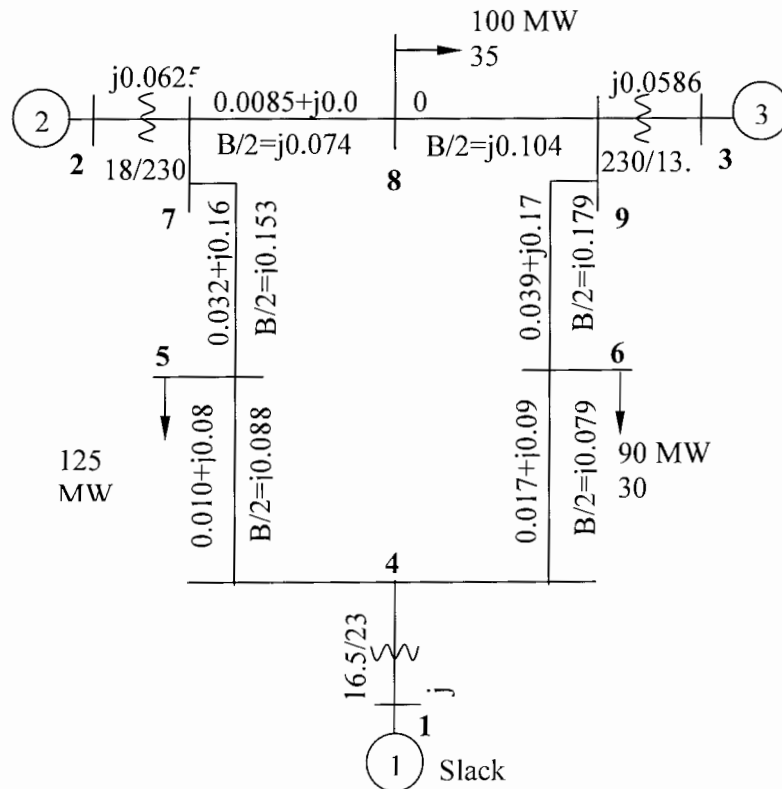


شکل (۵-۱۶): نمایش تغییرات توان تزریقی از شین بینهایت در حضور کنترلر فازی مقاوم

ملاحظه می گردد که در این حالت نیز کنترل کننده ، مناسب عمل می کند و هر چند پارامتر سیستم تغییر یافته است اما هدف کنترل که میرا نمودن نوسانات است محقق می گردد.

۵-۵. طراحی برای حالت چند ماشینه

در این بخش ابتدا به توصیف سیستم مورد مطالعه می پردازیم. به منظور شبیه سازی از سیستم قدرت سه ماشینه که در شکل ۳ نشان داده شده است استفاده می کنیم. این سیستم که در کتاب برگن ارایه شده است سیستمی است که بطور مکرر در مقالات برای مباحث پایداری مورد استفاده قرار گرفته است و پارامترهای آن از مرجع [48] در جداول (۴-۵) و (۶-۵) آورده شده است. در بخش های مختلف، ژنراتور ۱ که بزرگترین ژنراتور موجود در سیستم است به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و پارامترهای ۲ ژنراتور دیگر نسبت به آن بیان شده است.



شکل (۵-۱۷) : نمایش سیستم مورد مطالعه

(پارامترها در ۱۰۰ مگا ولت آمپر)

Generator No.	1	2	3
Rated MVA	247.5	192.0	128.0
kV	16.5	18.0	13.8
H(sec)	23.64	6.4	3.01
Power Factor	1.0	0.85	0.85
Type	Hydro	Steam	Steam
Speed	180r/min	3600r/min	3600r/min
x_d	0.1460	0.8958	1.3125
x'_d	0.0608	0.1198	0.1813
x_q	0.0969	0.8645	1.2578
x'_q	0.0969	0.1969	0.25
x_l (leakage)	0.0336	0.0521	0.0742
T_{do}	8.96	6.00	5.89
T'_{qo}	0	0.535	0.600
Stored energy at rated speed	2364MW.s	640MW.s	301MW.s

جدول (۴-۵): پارامترهای ژنراتور
(همه مقادیر در ۱۰۰ مگاوات آمپر بیان شده اند)

	Bus no.	Impedance		Admittance	
		R	X	G	B
Generators*					
No. 1	1-4	0	0.1184	0	-8.4459
No. 2	2-7	0	0.1823	0	-5.4855
No. 3	3-9	0	0.2399	0	-4.1684
Transmission lines					
	4-5	0.0100	0.0850	1.3652	-11.6041
	4-6	0.0170	0.0920	1.9422	-10.5107
	5-7	0.0320	0.1610	1.1876	-5.9751
	6-9	0.0390	0.1700	1.2820	-5.5882
	7-8	0.0085	0.0720	1.6171	-13.6980
	8-9	0.0119	0.1008	1.1551	-9.7843
Shunt admittances†					
Load A	5-0			1.2610	-0.2634
Load B	6-0			0.8777	-0.0346
Load C	8-0			0.9690	-0.1601
	4-0				0.1670
	7-0				0.2275
	9-0				0.2835

جدول (۵-۶): پارامترهای خطوط، ترانس ها و بارها

در این فصل ابتدا مراحل شبیه سازی سیستم قدرت را توصیف نموده و سپس نتایج حاصل از اعمال ادوات FACTS با سیستم کنترل فازی مقاوم را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۵-۵-۱. مدل سازی بخش های مختلف سیستم قدرت:

در این بخش به معرفی مدل ها و معادلات مورد استفاده برای شبیه سازی بخش های مختلف سیستم قدرت می پردازیم و در هر بخش بلوک های سیمولینک مورد استفاده برای آن بخش نیز ذکر خواهد شد.

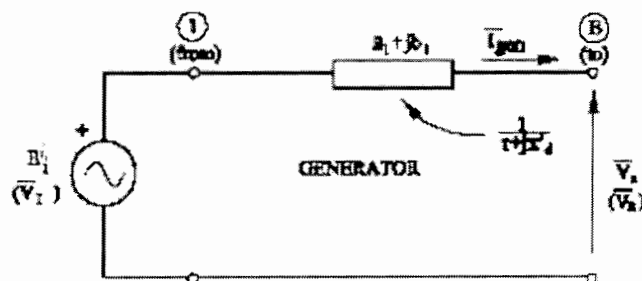
الف. مدل ژنراتور:

در محاسبات پخش بار مورد نیاز برای انجام شبیه سازی از مدل نشان داده در شکل (۱) استفاده می کنیم که در این حالت $E'_{q,i}$ در کنار ادمیتانس Y_i نشان دهنده رفتار ژنراتور هستند. در این مدل r مقاومت استاتور و x'_d راکتانس گذرای محور است:

$$Y_i = \frac{1}{r + jx'_d} = G_i + jB_i$$

و در صورت در نظر نگرفتن مقاومت استاتور و تلفات آن:

$$Y_i = jB_i = \frac{-j}{x'_d}$$



شکل (۵-۱۸): شمایی از ژنراتور به همراه راکتانس داخلی

در روش مورد استفاده در این پایان نامه ، برای قرار دادن مدل های شبیه سازی ژنراتورها لازم است علاوه بر شین های موجود در سیستم، برای هر ژنراتور یک شین داخلی در نظر گرفت که در نتیجه شین های سیستم به تعداد ژنراتورهای موجود در آن افزایش خواهد یافت.

همچنین برای معادلات دینامیک ژنراتور از دو مدل مختلف 3-state و 2state استفاده شده است . بدین صورت که ژنراتورهای ۱ و ۲ بصورت دو حالت و بدون سیستم های تحریک و پایدارساز در نظر گرفته شده اند در حالی که ژنراتور ۳ از مدل ۳حالتی استفاده می کند. معادلات مورد نظر به شکل زیر هستند:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i(t) &= \omega_i(t) \\ \dot{\omega}_i(t) &= -\frac{D_i}{M_i}\omega_i(t) + \frac{1}{M_i}(P_{m,i} - P_{e,i}(t)) \\ E'_{q,i}(t) &= \frac{1}{T'_{do,i}}(E_{fd,i} - E'_{q,i}(t) + (x_{d,i} - x'_{d,i})I_{d,i}(t)) \end{aligned}$$

در معادلات فوق بر اساس نیاز مساله می توان پارامترهای دیگر را با توجه به ماتریس ادمیتانس سیستم بر اساس روابط زیر بدست آورد:

$$P_{e,i} = \sum_{j=1}^n E'_{q,i}(t).E'_{q,j}(t).\beta_{i,j}(t)$$

$$I_{d,i} = \sum_{j=1}^n E'_{q,j}(t)\alpha_{i,j}(t)$$

$$I_{q,i} = \sum_{j=1}^n E'_{q,j}(t)\beta_{i,j}(t)$$

$$Q_{e,i} = \sum_{j=1}^n E'_{q,i}(t).E'_{q,j}(t).\alpha_{i,j}(t)$$

$$\beta_{i,j}(t) = [B_{i,j}(t).\sin(\delta_i(t) - \delta_j(t)) + G_{i,j}(t).\cos(\delta_i(t) - \delta_j(t))]$$

$$\alpha_{i,j}(t) = [B_{i,j}(t).\cos(\delta_i(t) - \delta_j(t)) - G_{i,j}(t).\sin(\delta_i(t) - \delta_j(t))]$$

که در روابط فوق δ نمایش دهنده زاویه رتور و انحراف آن از محور d است. ω سرعت رتور و $E'q$ و Ed مولفه های ولتاژ در راستای محور های d و q هستند..

همچنین سایر پارامترها عبارتند از:

$P_{m,i}$: توان مکانیکی اعمال شده به ژنراتور

$P_{g,i}$: توان تولیدی الکتریکی هر ژنراتور

D : ضریب دمپینگ که در شبیه سازی های ما برابر صفر در نظر گرفته شده است.

M : بیان کننده میزان لختی و اینرسی بخش های گردنده هر ژنراتور

E_{fd} : ولتاژ ورودی از سیستم تحریک

ب) مدل سازی بارها:

بارها از عوامل مهم نشان دهنده وضعیت سیستم هستند، بدین معنی که وجود تعادل بین تولید- مصرف وابسته به میزان و سطح بار موجود در شبکه است. در این پروژه بارها به شکل امپدانس هایی در ماتریس ادمیتانس سیستم وارد شده اند و مقدار ادمیتانس معادل آنها در هر گام شبیه سازی توسط رابطه زیر مشخص می گردند:

$$Y_{load} = \frac{P_L - jQ_L}{V^2}$$

که در آن:

P_L, Q_L : توانهای اکتیو و راکتیو بار مورد نظر

V : ولتاژ شینی که بار به آن متصل شده است

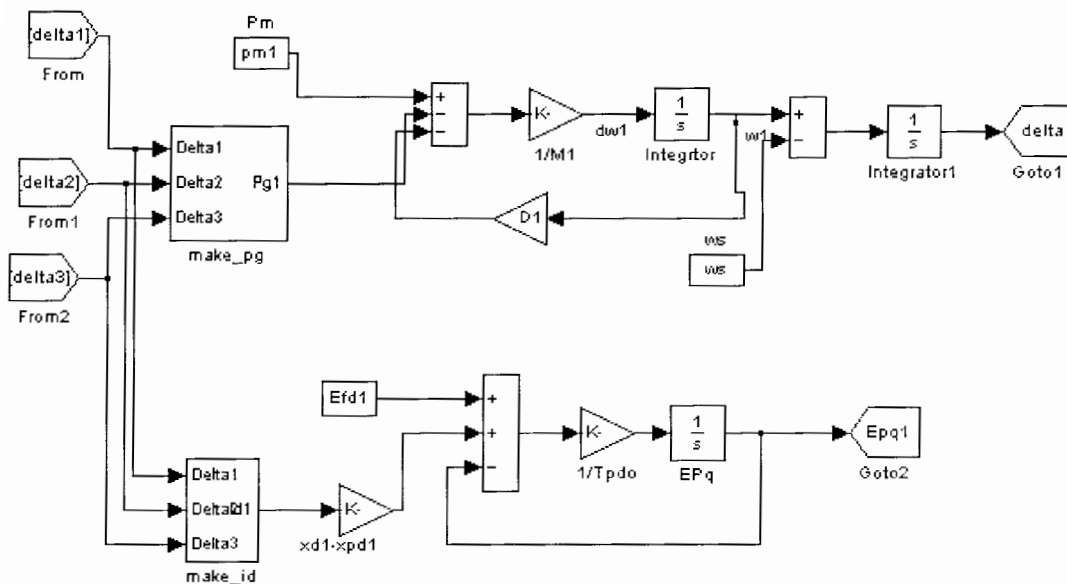
در انجام این پروژه بارها به شکل امپدانس ثابت در نظر گرفته شده اند. در این حالت، پس از پخش بار اولیه و بدست آوردن ولتاژ شینی که بار بدان متصل است، بر اساس توان بار، ادمیتانس معادل آن محاسبه می گردد که این ادمیتانس در ادامه کار و حتی با تغییرات در ولتاژ شین یا سایر پارامترهای سیستم تغییر نمی کند. در واقع در این حالت ماتریس ادمیتانس سیستم از لحاظ بارهای موثر در آن هیچگونه تغییری نمی کند.

ج) مدل سازی خطوط و ترانس ها:

در این پروژه خطوط انتقال با استفاده از یک امپدانس که بیان کننده میزان مقاومت و راکتانس آن است نمایش داده می شوند. همچنین ترانسها موجود در سیستم بدون تلفات و فقط با استفاده از یک اندوکتانس نمایش داده می شوند.

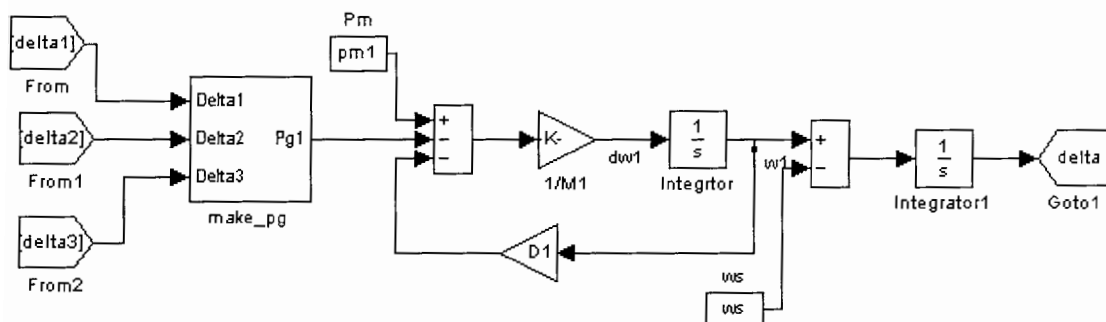
۵-۵-۲. شبیه سازی معادلات دینامیک ژنراتور ها:

برای ژنراتور ۳ که توسط معادلات سه حالت بیان شده است توسط بلوک ها زیر شبیه سازی شده اند.



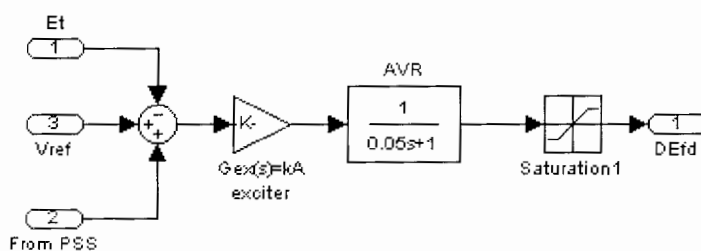
شکل (۵-۱۹) : شبیه سازی ژنراتور ۳

اما ژنراتورهای ۱ و ۲ فاقد معادلات مرتبط با E هستند و به شکل دو حالت شبیه سازی شده اند و در واقع فرض بر آن است که ولتاژ تولیدی ژنراتور تحت تاثیر تغییرات سیستم قدرت قرار نمی گیرد و در این حالت بلوک دیگرامهای آنها به شکل زیر کاهش می یابد.



شکل (۵-۲۰): مدل کاهش یافته ژنراتورهای ۱ و ۲

همانگونه که بیان شد، ژنراتور ۳ به شکل مستقل دارای یک سیستم تحریک است که بر اساس شرایط مختلف و وضعیت عملکرد سیستم، ولتاژ تحریک مناسب را برای ژنراتور فراهم می آورد. در این پروژه سیستم تحریک برای ژنراتور ۳ با استفاده از بلوک های زیر شبیه سازی شده اند:



شکل (۵-۲۱): مدل سازی سیستم تحریک ژنراتور ۳

که در آن پارامترهای بکار رفته عبارتند از:
 E_{fd} : ولتاژ تحریک اعمال شده به سیستم.

K_A, τ_A : ضریب تقویت و ثابت زمانی رگراتور خطی مورد استفاده.

حدود بالا و پایین ولتاژ اعمال شده که با توجه به محدودیت های سیستم های مورد استفاده و جلوگیری از اشباع بخش های آهنی تعیین می گردد.

۵-۳. الگوریتم تحلیل سیستم قدرت:

مقدمه:

الگوریتم مورد استفاده بگونه ای است که می توان بر روی هر کدام از باس های سیستم خطایی را ایجاد نمود و نتایج مربوط به تغییرات ولتاژ زاویه و سرعت زاویه ای را ملاحظه نمود. پیش از توضیح دادن الگوریتم و نمودار فلو چارتی مرتبط با آن روش تحلیل سیستم های چند ماشینه را مورد بحث قرار می دهیم.

۵-۴. روش تحلیل سیستم های چند ماشینه:

فرض می کنیم که می خواهیم یک سیستم N شینه را مورد بررسی که دارای M ژنراتور سنکرون است و UPFC یا هر کدامیک از ادوات FACTS هم در خط بین شین های او قرار می گیرند. در این روش همه بارها پس از تبدیل به امپدانس معادل در درون ماتریس ادمیتانس قرار خواهند گرفت. پس از ورود ادمیتانس های ناشی از بارها و وجود عناصر FACTS، معادلات گره سیستم بصورت فرمول (نوشته خواهند شد. که در آنها فقط در باسهای داخلی ژنراتور، بدلیل تزریق جریان به سیستم از این باسها، مقادیری برای جریانها در سطرهای ماتریس جریان وارد می شود و سایر سطرهای این ماتریس برابر صفر خواهند بود. در این حالت داریم:

$$\begin{bmatrix} Y_{N*N} & Y_{N*M} \\ Y_{M*N} & Y_{M*M} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$$

که در آن V بردار N بعدی از ولتاژهای شین های اصلی سیستم است و E یک بردار M بعدی از ولتاژهای شین های داخلی ژنراتورهای سنکرون می باشند. I نیز یک بردار M بعدی از جریانهای شین ها می باشد. در نتیجه ماتریس ادمیتانس سیستم یک ماتریس (N+M)*(N+M) است.

در ماتریس Y فوق، ماتریس $Y(N*N)$ ، ماتریس ادمیتانس شین های اصلی است که این همان ماتریس مورد استفاده در پخش بارهای معمولی سیستم است که با امپدانس های مربوط به ژنراتور و بارها (و در صورت وجود، ادوات FACTS) ترکیب شده است. همچنین ماتریس $Y(N*M)$ ، ماتریس ادمیتانس های بین ژنراتورها و سیستم است که در واقع ماتریس ادمیتانس های بین ژنراتور و نزدیک ترین شین به آن است. در نهایت ماتریس $Y(M*M)$ ، ماتریس قطری از ادمیتانس های ژنراتورها است. مقادیر E ، ولتاژهای داخلی ژنراتورها در هر لحظه از زمان بر اساس تغییرات بوجود آمده در سیستم و نیز ولتاژهای شین ها تغییر خواهد نمود. مراحل تحلیل سیستم را می توان به شکل زیر خلاصه نمود:

(۱) انجام پخش بار بر روی سیستم مورد مطالعه:

این مرحله برای مشخص کردن شرایط عملکرد سیستم و نیز نقطه کار آن قبل از وقوع هرگونه اغتشاش در سیستم است. هدف از این مرحله به شکل خاص، معلوم نمودن پارامترهای زیر است:

- ولتاژهای شین های اصلی
- توان های الکتریکی ژنراتورها
- زوایای رتور هر کدام از ژنراتورها
- ولتاژ تحریک اعمالی به هر ژنراتور

در این مرحله پس از معلوم شدن پارامترهای فوق، بر اساس آنها فرض هایی را ایجاد می کنیم، مثل:

$$P_{M,i} = P_{e,i} \text{ : توان مکانیکی}$$

$$\omega_n = \omega_{syn} \text{ : سرعت رتور}$$

(۲) محاسبه ولتاژهای داخلی ژنراتورها:

با استفاده از رابطه زیر و مقادیر بدست آمده برای ولتاژ شین ها از پخش بار، ولتاژهای داخلی محاسبه خواهند شد:

$$E_n = |E_n| < \delta_n = V_n + jX_{th,n} * I_n$$

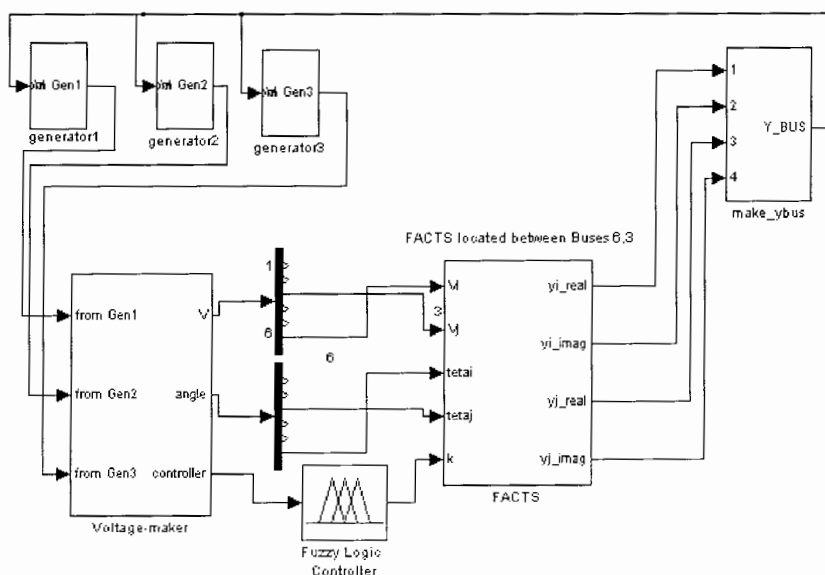
۳) شروع شبیه سازی

$t=0$: شروع مراحل تکرار:

الف) تعیین Y ، ماتریس ادمیتانس، کل سیستم و محاسبه $Y(N*N)$, $Y(N*M)$, $Y(M*M)$ که در هر گام شبیه سازی ممکن است بدلیل تغییر شرایط کار سیستم و یا اعمال توان های متفاوت از سوی ادوات FACTS مقادیر آن تغییر کند.

ب) اگر در محدوده زمانی وقوع خطا هستیم، در شینی که اتصال کوتاه رخ داده است، ولتاژ آنرا برابر صفر در نظر می گیریم.

ج) با استفاده از روشهای تکراری همچون گوس سیدل و یا حل معادلات ماتریسی ولتاژ همه شین ها را بدست آورده و همچنین میزان ولتاژهای شین های داخلی و سایر پارامترها را هم معین می کنیم.
 د) با استفاده از قوانین کنترلی ادوات FACTS و شرایط فعلی سیستم، میزان توانهای اعمال شده توسط این ادوات را معین نموده و با توجه به ولتاژهای محاسبه شده در بخش قبل، مقدار امپدانی معادل جدید آنها را ایجاد و محاسبه می نماییم.



شکل (۵-۲۲): نمایش سیستم شبیه سازی شده به هوراه بلوک

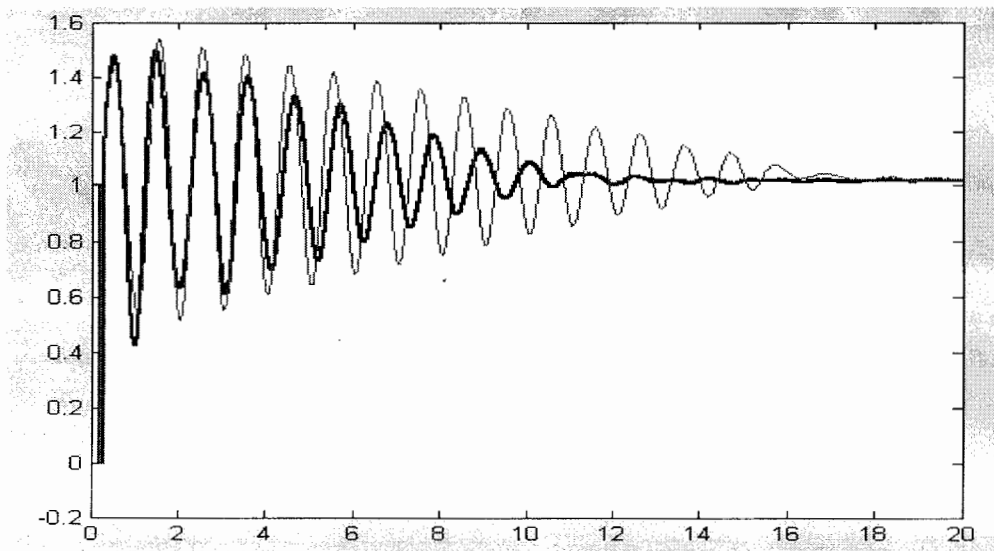
UPFC

ه) در صورتی که زمان شبیه سازی پایان یافته باشد، از تکرارها خارج می شویم در غیر اینصورت مقدار $t = t + \Delta t$ قرار داده شده و تکرارها ادامه می یابد.

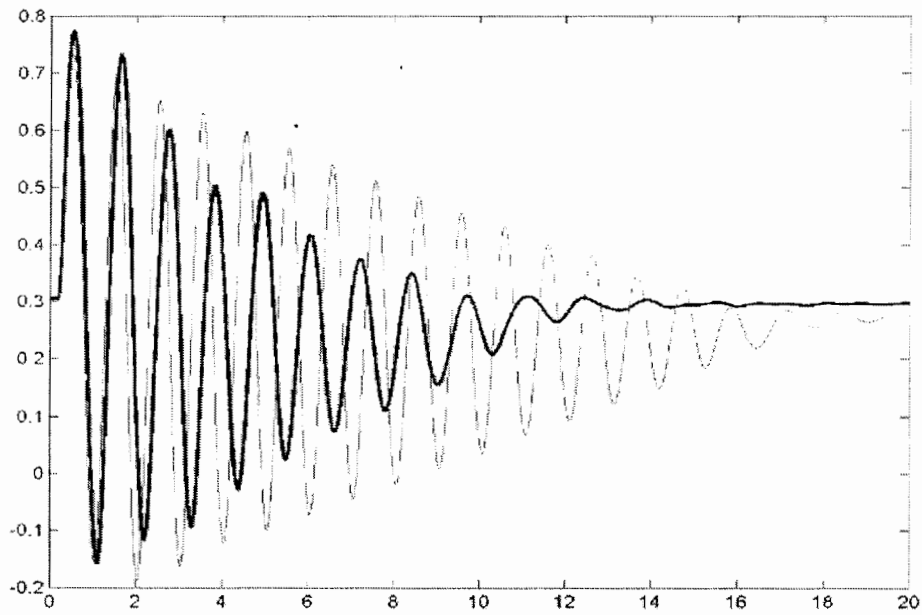
۵-۵-۵. نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی برای سیستم قدرت چند ماشینه در شکل (۵-۱۷) مشاهده می گردد. همانطور که بیان شد با توجه به نتایج مقاله مرجع [40] بهترین محل برای قرار گرفتن UPFC بین خط ۳ و ۶ می باشد با توجه به این موضوع ما این تجهیز را بین این دو باس بار قرار داده و فرض کردیم کلیه واحدها فاقد پایدار ساز سیستم قدرت می باشد.

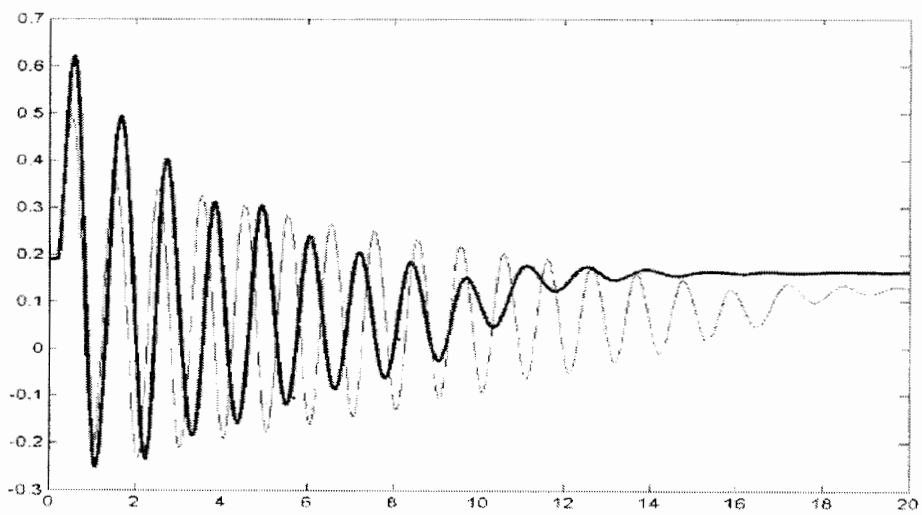
در این شبیه سازی فرض شده است که یک خطا در نزدیکی شین ۷ رخ می دهد و از آنجا که این شین در نزدیکی ژنراتور ۲ قرار دارد بیشترین نوسانات را در این ژنراتور ایجاد می کند و لذا مهمترین مساله در اینجا پایداری پارامترهای مربوط به این ژنراتور است در این حالت نمودارهای بدست آمده برای پارامترهای مختلف پایداری سیستم در شکل های (۵-۲۳) تا (۵-۲۹) نمایش داده شده است.



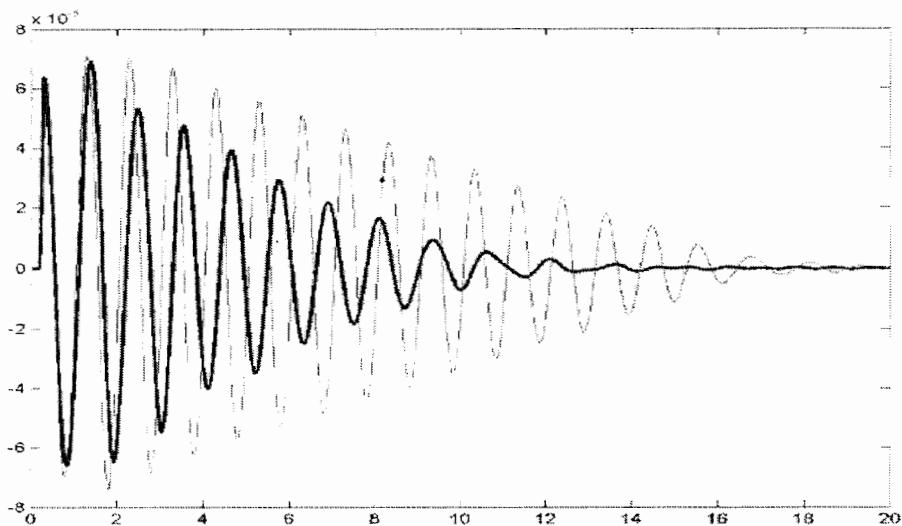
شکل (۵-۲۳): توان تولیدی ژنراتور ۲؛ ژنراتوری که خطا در نزدیکی آن حاصل شده و بیشترین تغییرات و نوسانات را دارد.



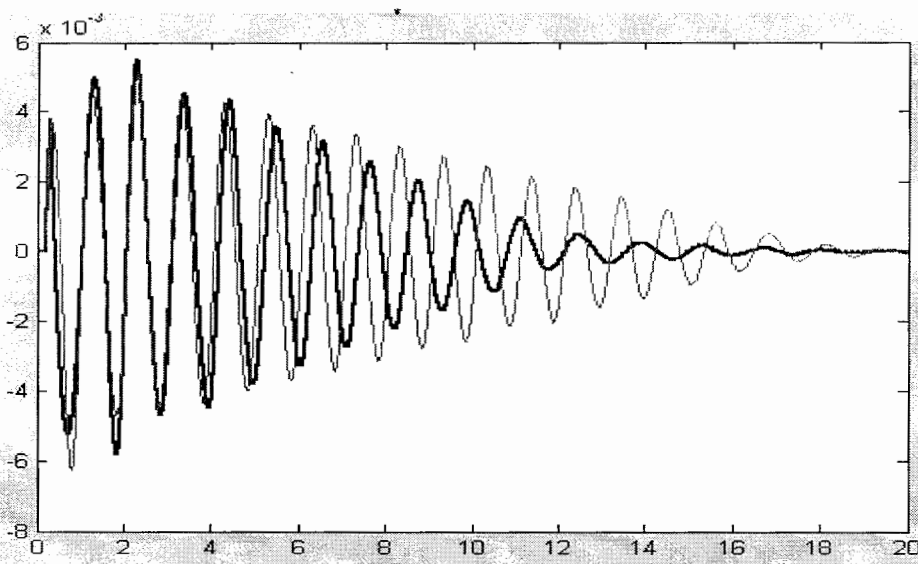
شکل (۵-۲۴): زاویه نسبی رتور δ_{2i}



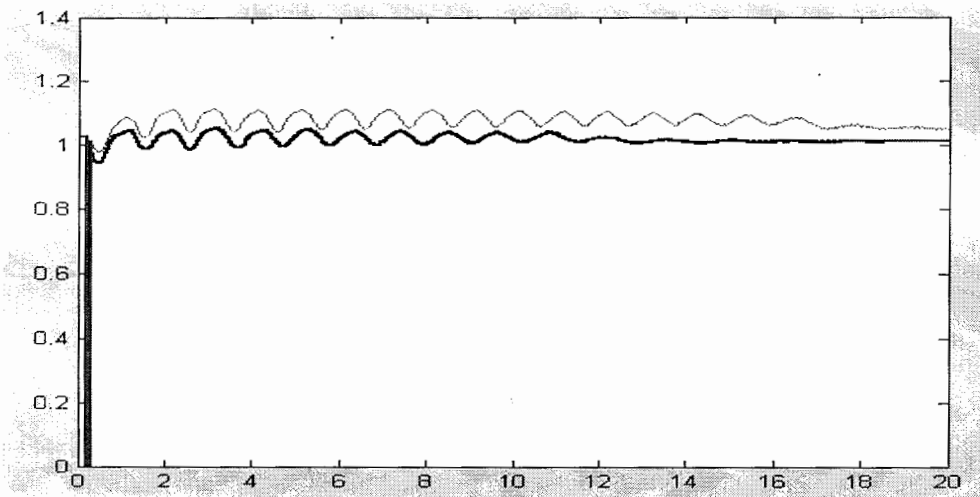
شکل (۵-۲۵): زاویه نسبی رتور δ_{3i}



شکل (۵-۲۶): سرعت زاویه ای نسبی ω_{21}

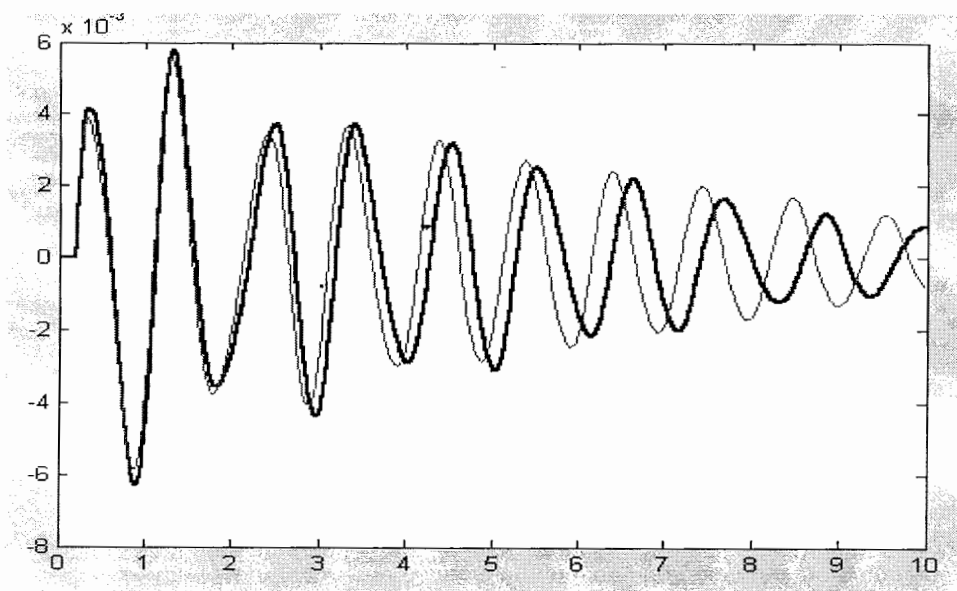


شکل (۵-۲۷): سرعت زاویه ای نسبی ω_{31}



شکل (۵-۲۸): ولتاژ در پالس محل خطا:

در این مرحله جهت تست مقاوم بودن سیستم راکتانس خط ۴-۶ را به اندازه ۱. افزایش می دهیم و شبیه سازی را مجدداً با کنترل کننده فازی مقاوم مذکور تکرار می کنیم. نتایج شبیه سازی برای نمایش زاویه ω_{31} در شکل زیر مشاهده می گردد. ملاحظه می شود علی رغم تغییر در پارامتر سیستم کنترلر دارای عملکرد مناسبی بوده و نوسانات را میرا می کند.



شکل (۵-۲۹): نمایش زاویه ω_{31}

۵-۶. نتیجه گیری و پیشنهادات

با توجه به شبیه سازی های صورت گرفته در این فصل و با توجه به ایرادات کنترلر های متداول و مرسوم ، قابلیت های زیر برای کنترلر فازی رو باست نتیجه می شود :

۱- سادگی طراحی

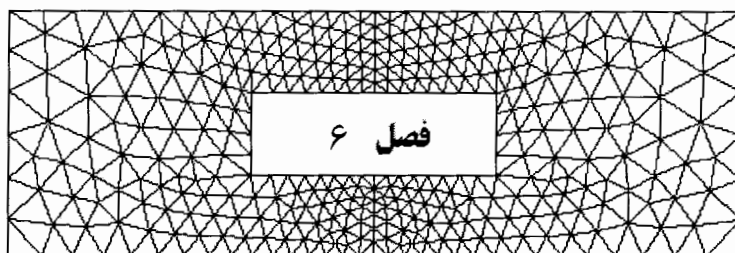
۲- مقاوم بودن در برابر تغییرات بار و تغییرات پارامترها

۳- تعداد قوانین فازی کمتر در مقایسه با کنترل کننده های فازی معمولی

و با توجه به قابلیت کنترلر مفروض پیشنهادات زیر جهت بهبود عملکرد آن پیشنهاد می گردد:

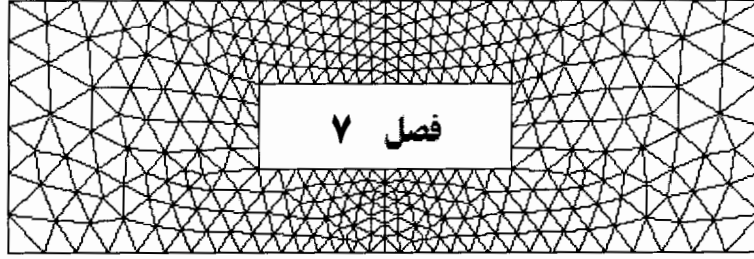
۱- اعمال روشهای بهینه سازی

۲- مقایسه با سایر روشهای مقاوم از نظر قابلیت از قبیل H_{∞}



نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱- در این پایان نامه روش کنترل فازی مقاوم جهت پایدار سازی سیستم قدرت برای نخستین بار پیشنهاد گردیده است
- ۲- نتایج نشان دهنده مقاوم بودن این روش جهت پایدار سازی سیستم قدرت نسبت به تغییرات بار و پارامترهای سیستم است
- ۳- استراتژی کنترلی فازی مقاوم ساده بوده و کارایی بالایی جهت کنترل سیستم قدرت از خود نشان می‌دهد
- ۴- اعمال روش دوم pdc که روشی ساده تر است برای سیستمهای قدرت شبیه سازی شده امکان پذیر بوده است
- ۵- پیشنهاد می‌گردد کارایی این استراتژی کنترلی فازی مقاوم که در این پایان نامه تشریح شد برای دیگر ادوات کنترلی در شبکه قدرت از جمله پایدار ساز سیستم قدرت (PSS) به کار رود
- ۶- از آنجا که هماهنگ سازی ادوات کنترلی در سیستم قدرت بسیار مهم می‌باشد پیشنهاد می‌گردد کارایی کنترل کننده فازی مقاوم در مقایسه با سایر ادوات بررسی گردد



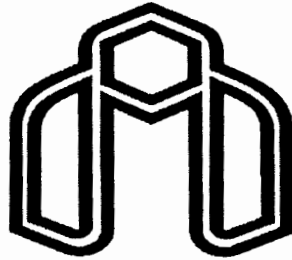
مراجع

- 1)October 1999,California ENERGY COMMISSION STATE ENERGY COMMISSION, " Flexible AC Transmission Systems Benefits Study",
- 2)Klaus Habur and Donal O'Leary (1)," FACTS :For Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy"
- 3)M,H,Baker,R.T.Trow."NEW facts controllers and How To Access Them"
- 4)How FACTS Controllers BenefitAC Transmission Systems,
John J. Paserba, *Fellow, IEEE*
- 5)Modelling of Unified Power Flow Controller into Power Systems using P-Spice
- 6)Integrated Fuzzy State Estimation and Load Flow
Analysis in Distribution Networks,Andrija T. Saric' and Rade M. C' iric'
- 7) Fuzzy Coordination of FACTS Controllers for
Damping Power System Oscillations
- 8) Control Lyapunov Functions for Controllable Series
Devices
- 9) Analysis and Operation of STATCOM in Unbalanced Systems
- 10) First International Workshop on Feasibility of HVDC Transmission Networks for Offshore Wind
Farms
- 11)SVC MULTI-CONTROL SYSTEM:DESIGN AND IMPLEMENTATION
- 12) THE DYNAMIC MODELLING OF STATIC VAR SYSTEM IN POWER SYSTEM BLOCKSET
- 13)Effect OF FACTS Device ON Steady State Voltage Stability
- 14)Coordination Of TCSC AND SVC FOR STABILITY IMPROVEMENTOF POWER Systems

- 15) DRAFT STUDY PLAN FOR SDG&E'S TRANSMISSION PLANNING DESIGN STUDY FOR THE "VALLEY-RAINBOW 500 kV PROJECT"
- 16) UPFC Ideal Transformer Model
- 17) TECNOLOGIA FACTS – TUTORIAL
- 18) Flicker Reduction in Electric Arc Furnaces
- 19) Optimal Allocation of FACTS Devices in Distribution Systems
- 20) Optimal Control of UPFC for Load Flow Control and Voltage Flicker and Current Harmonics Elimination
- 21) Kazuo Tanaka Hua O.Wang "FUZZY CONTROL SYSTEMS DESIGN and ANALYSIS"
- 22) K.Tanaka, T.Ikeda, and H.O.Wang," Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers,"IEEE Trans.Fuzzy Syst., Vol.6, No.2, PP.250-265(1998).
- 23) K. Tanaka and M. Sugeno,"Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems," Fuzzy Syst., Vol.45, No.2, PP.135-156(1992).
- 24) K.Tanaka, T.Hori, K.Yamafuji, and H.O.Wang,"An Integrated Algorithm of Fuzzy Modeling and Controller Design for Nonlinear Systems,"1999 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 2, Seoul, August 1999, PP.887-892.
- 25) K.Tanaka, T.Hori, K.Yamafuji, and H.O.Wang,"An Integrated Fuzzy control System Design for Nonlinear Systems,"38 Th IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, Dec.1999, PP.4349-4354.
- 26) K.Tanaka and M.Sugeno,"Concept of Stability Margin of Fuzzy Systems and Design of Robust Fuzzy Controllers," in Proceedings of 2 nd IEEE International Conference on Fuzzy System,Vol. 1,1993,PP.29-34.
- 27) K.Tanaka and M.Sano,"ARobust Stabilization Problem of Fuzzy Controller Systems and Its Applications to Backing up Control of a Truck Trailer," IEEE Trans .on Fuzzy Syst. Vol 2, No.2, PP.119-134, (1994).
- 28) K. Tanaka and M. Sugeno,"Stability Analysis of Fuzzy Systems Using Lyapunov's Direct Method,"Proc.NAFIPS'90, PP.133-136, 1990.
- 29) K.Tanaka, T.Ikeda, and H.o.Wang,"Design of Fuzzy Control Systems Based on Relaxed LMI Stability Conditions," 35 Th IEEE Conference on Decision and Control, Kobe, Vol. 1, 1996, PP.598-603.

- 30) K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems," Fuzzy Sets Syst. Vol.45, No.2, PP.135-156(1992).
- 31) H.O.Wang, K.Tanaka, and M.Griffin, "An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and Design Issues," IEEE Trans.Fuzzy Syst., Vol.4, No.1, PP.14-23(1996).
- 32) M.Sampey et al., "Arbitrary Path Tracking Control of articulated Vehicles Using Nonlinear Control Theory," IEEE Trans.Control Syst.Technol., Vol.3, No.1, PP.125-131(1995).
- 33) K.Tanaka and T.Kosaki, "Design of a Stable Fuzzy Controller for an Articulated Vehicle," IEEE Trans.Syst., Man Cybernet, Part B, VOL.27, No.3, PP.552-558(1997).
- 34) E.Ott, C.Grebogi, and J.A.Yorke, "Controlling Chaos, Phys.Rev.Lett" Vol.64, PP.1196-1199 (1990)
- 35) H. O. Wang and E. H. Abed, "Bifurcation Control of a Chaotic System," Automatica, Vol. 31, No. 9, PP.1213-1226(1995).
- 36) Kwang, A Newton-Type Current Injection Model of UPFC for Studying Low-Frequency Oscillations, IEEE transactions power systems delivery , April 2004-02-07
- 37) Moris, UPFC Controller Design for Power System Stabilization with Improved Genetic Algorithm, 0-7 803-7906-3/03/\$17 .00 02003 IEEE.
- 38) Frasangi, Choice of FACTS Device Control Inputs for Damping Interarea Oscillations, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004
- 39) Xio, Advanced Unified Power Flow Controller Model for Power System Steady State Control, 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004) April 2004 Hong Kong
- 40) Abdelsalam, OPTIMAL LOCATION OF THE UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS, 0-7803-8386-9/04/\$20.00 62004 IEEE
- 41) Kotari, Design of UPFC Controllers for a Multimachine System, 2004 IEEE
- 42) Zhaojun Meng, A UPFC MODEL FOR DYNAMIC STABILITY ENHANCEMENT
- 43) Tambey, Unified Power Flow Controller (UPFC) Based Damping Controllers for Damping Low Frequency Oscillations in a Power System, Electra, Vol 84, June 2003
- 44) Xiahe, UPFC operations under stressed system conditions, 0-7803-7519-X/02/\$17.00 © 2002 IEEE
- 45) Bin Lu, Unified Power Flow Controller (UPFC) under Nonlinear Control, 0-7803-7156-9/02/\$10.00 2002 IEEE
- 46) Noroozia, Anderson, Use of UPFC for optimal power flow control, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 12, No.4, October 1997

- 47)Ghandhari, Control Lyapunov Functions:A Control Strategy for Damping of Power Oscillations in Large Power Systems,Doctoral Thesis,Lund university Sweden,2000
- 48) Kundur,Power systems stability and Control,2001
- 49) Dr Ali Khaki-Seddigh, Modern control Systems,university of Tehran Press 2235
- 50) M.Januszewski,Application of the direct Lyapunov Method to improve damping of power swings by control of upfc, IEE Proceedng online no.20040054
- 51)Eskandar Gholipour,Improving of Transient Stability of Power Sytems Using UPFC,IEEE transactions on power delivery ,VOL-20,NO 2,April 2005
- 52) P.K.Dash,Damping Multimodal Power System Oscillation Using a Hybrid Fuzzy Controller for series connected FACTS Devices,IEEE Transactions on power systems,VOL.15,NO.4,NOVEMBER 2000
- 53) Kothary,Design of UPFC Controllers for Multimachine System,0-7803-X/04/\$20@2004IEEE
- 54)Cai, Robust FACTS loop-shaping POD (Power Oscillation Damping) controller design in multi-machine power systems ,IEEE transaction power systems 2003



دانشگاه صنعتی شاهرود

Shahrood University of Technology
Department of Electrical Engineering

Thesis submitted for the degree of Master of Sciences in control
Electrical Engineering

Title:

Design and Simulation of Robust Fuzzy Controller for Power Systems

By:

Mohammad Reza Salehizadeh

Supervisor:

Dr. Ali Akbar Gharaveisi

Consultor :

Dr Ashkan Rahimikian

July 2005