





دانشکده مهندسی برق و رباتیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

طراحی کنترل کننده مقاوم با روش سنتز H_2 برای جبران کننده توان راکتیو
به منظور بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت

نگارنده: مهسا کاشانی

استاد راهنما
دکتر علیرضا الفی

بهمن ۱۳۹۶

شماره ۱۵۳۴، ت. ب.
تاریخ: ۱۱/۱۱/۸۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مهسا کاشانی با شماره دانشجویی ۹۴۱۴۳۳۴ رشته مهندسی برق- کنترل گرایش کنترل تحت عنوان: طراحی کنترل کننده مقاوم با روش سنتز L۱ برای جبران کننده توان راکتیو به منظور بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: <u>خوب</u>)	<input checked="" type="checkbox"/>	مردود	<input type="checkbox"/>
نوع تحقیق:	<input checked="" type="checkbox"/> نظری	عملی	<input type="checkbox"/>

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	علیه النبی	رئیس	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	حسن قلیزاده نیا	—	
۵- استاد ممتحن اول	محمد علی حسینی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	محمد اصیبی	—	



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ

کاش سورہ ای بہ نام ” پدر ” بود کہ این کونہ آغاز شد:

قسم بریندی دسات، کہ بوی نان میدہد و قسم بر چشمان، ہمیشہ نگرانت... قسم بر بنض فرو خورده ات کہ شادی کوه رالرزاند و قسم بر غربت، وقتی بچ بہشتی زیر پات

نیت... یات ہر تلاش یات ممنون پدرم

حروف شک می کنم؛ بہ عشق، بہ خندہ، بہ مہربا بہ کرما، حتی بہ خاک... حروف کم می کنم؛ راہم را، آسمان را، حتی خودم را... بہ مادام نگاه می کنم... مادام ممنون

یات ہر محبت ہی بی منت

و ہمسر عزیزم کہ یاد مہربانی یاد سازند کہیم می باشد، او کہ اسوہ صبر و تحمل بودہ و مشکلات مسیر را برایم تسہیل نمود.

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر علیرضا الفی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کار ساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم.

در آخر از همسر عزیز و مهربانم بخاطر تمام زحمات بی دریغ و راهنمایی‌های ارزشمندش، از صمیم قلبم تشکر و قدردانی می‌کنم و از خداوند منان طلب سلامتی و موفقیت روزافزون برای ایشان دارم.

تعهد نامه

اینجانب مهسا کاشانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-کنترل دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی کنترل کننده مقاوم با روش سنتز H_∞ برای جبران کننده توان راکتیو به منظور بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت تحت راهنمایی دکتر علیرضا الفی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا یافته های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

هدف این پایان‌نامه طراحی کنترل‌کننده مقاوم برای جبران‌کننده استاتیکی^۱ STATCOM برای دستیابی به سطح مطلوبی از پایداری در برابر نوسانات شبکه سیستم قدرت می‌باشد. طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی بر مبنای آنالیز سنتز μ می‌باشد. عموماً برای حل مسئله سنتز μ از روش تکراری D-K استفاده می‌شود. ضعف این روش، منجر شدن به کنترل‌کننده‌ای با مرتبه بالا است. برای مقابله با این ضعف، روش طراحی پیشنهادی در این پایان‌نامه بر مبنای یک مسئله بهینه‌سازی مطرح شده و از الگوریتم تکاملی هوشمند یادگیری بر مبنای آموزش^۲ (TLBO) در جهت کاهش مرتبه کنترل‌کننده استفاده می‌شود. در انتها پایداری و کارایی مقاوم کنترل‌کننده پیشنهادی با سایر کنترل‌کننده‌های مرسوم مقایسه می‌شود و در نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، برتری کنترل‌کننده پیشنهادی قابل مشاهده می‌باشد.

کلمات کلیدی: کنترل مقاوم، سنتز μ ، جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو، پایداری دینامیکی، الگوریتم‌های بهینه

سازی

1- Static Synchronous Compensator

2- Teaching-Learning-Based Optimization

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۲	..... (۱-۱) مقدمه
۳	..... (۲-۱) انگیزه تحقیق
۴	..... (۳-۱) اهداف تحقیق
۵	..... (۴-۱) مروری بر پایان نامه
۷	فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته
۸	..... (۱-۲) مقدمه
۸	..... (۲-۲) مفاهیم پایه
۱۲	..... (۳-۲) تاریخچه تحقیق
۱۳	..... (۱-۳-۲) نسل اول ادوات FACTs
۱۶	..... (۲-۳-۲) نسل دوم دستگاه‌های FACTs
۲۰	..... (۴-۲) نقش STATCOM در افزایش میرایی

۲۵ **فصل سوم: پایداری سیستم قدرت**

۲۶ (۱-۳) مقدمه

۲۶ (۲-۳) پایداری و تعریف آن در سیستم‌های قدرت

۲۷ (۱-۲-۳) انواع پایداری در سیستم‌های قدرت

۲۸ (۱-۱-۲-۳) پایداری حالت ماندگار

۲۸ (۲-۱-۲-۳) پایداری دینامیکی

۳۰ (۳-۱-۲-۳) پایداری گذرا

۳۲ (۳-۳) روش‌های عمده مورد استفاده جهت حفظ پایداری

۳۵ **فصل چهارم: کنترل مقاوم**

۳۶ (۱-۴) مقدمه

۳۸ (۲-۴) مفهوم کنترل مقاوم

۳۸ (۳-۴) مدل‌سازی مسائل مقاوم

۳۸ (۱-۳-۴) مدل‌سازی سیستم‌های نامی

۳۹ (۲-۳-۴) تعریف ریاضی نامعینی

۳۹ (۱-۲-۳-۴) نامعینی ساختاریافته

۴۰	.....نامعینی بدون ساختار.....(۲-۲-۳-۴)
۴۳	.....مزایا و معایب نامعینی ضربی.....(۳-۲-۳-۴)
۴۳	.....شکل کلی نامعینی.....(۴-۲-۳-۴)
۴۴	.....پایداری مقاوم.....(۳-۳-۴)
۴۷	.....کارایی مقاوم.....(۴-۳-۴)
۵۰	.....مقدار تکین ساختاریافته.....(۴-۴)
۵۲	.....روش کنترل مقاوم سنتز μ.....(۵-۴)
۵۳	.....پایداری و کارایی مقاوم بر اساس آنالیز μ.....(۶-۴)
۵۵	.....پایداری مقاوم براساس آنالیز μ.....(۱-۶-۴)
۵۶	.....کارایی مقاوم بر اساس آنالیز μ.....(۲-۶-۴)
۵۷	.....تعریف مسئله سنتز μ.....(۷-۴)
۵۸	.....راهکار حل مسئله سنتز μ.....(۱-۷-۴)
۶۰	.....طراحی کنترل کننده به روش الگوریتم بازگشتی D-K.....(۲-۷-۴)
۶۰	.....مزایا و معایب روش سنتز μ.....(۳-۷-۴)

فصل پنجم: مدسازی مسئله

۶۴مقدمه.....(۱-۵)
----	----------------------

۶۴	.....(۲-۵) مدل غیرخطی شبکه قدرت.....
۶۴	.....(۱-۲-۵) دینامیک اینورتر منبع ولتاژ.....
۶۵	.....(۲-۲-۵) دینامیک ولتاژ خازن.....
۶۶	.....(۳-۲-۵) دینامیک روتور و سیستم تحریک ژنراتور.....
۷۲	.....(۳-۵) مدل خطی شده سیستم قدرت.....
۷۴	.....(۱-۳-۵) معادلات فضای حالت.....
۷۶	.....(۴-۵) طرح کنترلی پیشنهادی.....
۷۷	.....(۱-۴-۵) انتخاب تابع وزنی عملکرد ($W_s(s)$).....
۷۸	.....(۲-۴-۵) انتخاب تابع وزنی نامعینی در مدل ($W(s)$).....
۷۸	.....(۳-۴-۵) انتخاب تابع وزنی سیگنال تلاش کنترلی ($W_u(s)$).....
۷۸	.....(۵-۵) تعریف مسئله بهینه‌سازی.....
۸۰	.....(۱-۵-۵) الگوریتم یادگیری برمبنای آموزش.....
۸۵	فصل ششم: شبیه‌سازی و ارائه نتایج
۸۶	.....(۱-۶) مقدمه.....
۸۶	.....(۲-۶) شبیه‌سازی و مطالعه موردی.....
۸۶	.....(۱-۲-۶) اطلاعات سیستم مورد مطالعه.....
۸۷	.....(۲-۲-۶) عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده.....

۸۹	..... تابع وزنی نامعینی ضربی..... (۳-۲-۶)
۸۹	..... تابع وزنی کارایی..... (۴-۲-۶)
۹۰	..... کنترل کننده توسط سنتز μ (۳-۶)
۹۰	..... طراحی کنترل کننده اولیه..... (۱-۳-۶)
۹۰	..... بهبود طراحی..... (۲-۳-۶)
۹۳	..... طراحی کنترل کننده کاهش یافته..... (۳-۳-۶)
۹۵	..... طراحی کنترل کننده H_{∞} (۴-۶)
۹۷	..... کنترل کننده پیشنهادی..... (۵-۶)
۹۷	..... تعریف مسئله طراحی و نحوه کدگذاری الگوریتم هوشمند..... (۱-۵-۶)
۹۹	..... مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی..... (۶-۶)
۹۹	..... بررسی عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم..... (۱-۶-۶)
۱۰۳	..... بررسی عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش..... (۲-۶-۶)
۱۰۴	..... بررسی عملکرد سیستم در تغییر پارامتر سیستم..... (۳-۶-۶)
۱۱۳	فصل هفتم : نتیجه گیری
۱۱۴	..... مقدمه..... (۱-۷)
۱۱۶	..... مراجع

فهرست شکل‌ها

۱۱	آرایش کلی سیستم STATCOM	شکل ۱-۲
۱۴	ساختار داخلی یک TCSC	شکل ۲-۲
۱۵	نمای ساختاری یک SVC سه‌فاز به صورت اتصال موازی یک TCR سه‌فاز با یک بانک خازنی سه‌فاز	شکل ۳-۲
۱۷	ساختار کلی تجهیز SSSC	شکل ۴-۲
۱۷	STATCOM و مشخصه V-I آن	شکل ۵-۲
۱۸	ساختار کلی تجهیز UPFC	شکل ۶-۲
۱۹	ساختار کلی تجهیز IPFC	شکل ۷-۲
۳۰	نمایش پاسخ و پایداری سیستم به ازای شرایط مختلف قرارگیری محل قطب	شکل ۱-۳
۳۲	بررسی اثر اغتشاش پله در معیار مساحت‌های مساوی	شکل ۲-۳
۴۲	اختلال جمع‌پذیر	شکل ۱-۴
۴۲	اختلال ضربی یا دیسکی	شکل ۲-۴
۴۲	عدم قطعیت ضربی در صفحه مختلط	شکل ۳-۴
۴۵	سیستم فیدبک واحد با کنترلر	شکل ۴-۴
۴۵	شرط پایداری مقاوم در صفحه مختلط	شکل ۵-۴
۴۷	سیستم فیدبک مختل شده	شکل ۶-۴
۴۷	بلوک دیاگرام کاهش یافته	شکل ۷-۴
۴۹	شرط کارایی مقاوم در صفحه مختلط	شکل ۸-۴
۵۱	نمایش استاندارد $\Delta - M$	شکل ۹-۴

۵۵	نمایش استاندارد $\Delta - M - K$	شکل ۴-۱۰
۵۶	نمایش استاندارد $\Delta - N$	شکل ۴-۱۱
۵۷	پیکربندی نامعینی در حالت یکپارچه	شکل ۴-۱۲
۶۵	شبکه تک ماشینه دارای STATCOM	شکل ۵-۱
۶۷	سیگنال‌های اثر گذار بر روی شفت یک ژنراتور	شکل ۵-۲
۷۴	بلوک نموداری مدل دینامیک خطی شبکه تک ماشینه سیستم قدرت دارای STATCOM	شکل ۵-۳
۷۶	ساختار کنترلی پیشنهادی برای حل مسئله طراحی	شکل ۵-۴
۸۳	فلوچارت الگوریتم روش بهینه‌سازی بر مبنای آموزش - یادگیری	شکل ۵-۵
۸۷	شبکه تک ماشینه دارای STATCOM	شکل ۶-۱
۸۸	نمودار بودی سیستم نامعین و سیستم نامی	شکل ۶-۲
۸۹	نامعینی محاسبه شده برای سیستم	شکل ۶-۳
۹۱	نتیجه طراحی روش D-K	شکل ۶-۴
۹۲	نتیجه طراحی روش D-K بهبود یافته	شکل ۶-۵
۹۲	پایداری مقاوم کنترل‌کننده سنتز μ بهبود یافته با ضریب تنظیم $a=0.005$	شکل ۶-۶
۹۳	کارایی مقاوم کنترل‌کننده سنتز μ بهبود یافته با ضریب تنظیم $a=0.005$	شکل ۶-۷
۹۳	نمودار مقادیر نرم هنکل کنترل‌کننده حاصل از سنتز μ	شکل ۶-۸
۹۴	پایداری مقاوم کنترل‌کننده سنتز μ کاهش یافته با ضریب تنظیم $a=0.005$	شکل ۶-۹
۹۵	کارایی مقاوم کنترل‌کننده سنتز μ کاهش یافته با ضریب تنظیم $a=0.005$	شکل ۶-۱۰
۹۶	منحنی مقادیر تکین سیستم حلقه بسته و پاسخ فرکانسی آن به ازای $W_u = 0.001$	شکل ۶-۱۱
۹۶	پایداری مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش H_∞	شکل ۶-۱۲
۹۷	کارایی مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش H_∞	شکل ۶-۱۳
۹۸	ساختار اعضای جمعیت الگوریتم هوشمند	شکل ۶-۱۴
۹۸	مقایسه مقدار تابع هزینه بهترین جواب دو الگوریتم TLBO و PSO در تکرارهای مختلف	شکل ۶-۱۵
۱۰۰	پایداری مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش TLBO	شکل ۶-۱۶
۱۰۱	کارایی مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش TLBO	شکل ۶-۱۷

۱۰۱	پایداری مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش PSO	شکل ۶-۱۸
۱۰۲	کارایی مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش PSO	شکل ۶-۱۹
۱۰۲	بررسی پایداری مقاوم کنترل‌کننده‌های طراحی شده از روش‌های مختلف	شکل ۶-۲۰
۱۰۳	بررسی کارایی مقاوم کنترل‌کننده‌های طراحی شده از روش‌های مختلف	شکل ۶-۲۱
۱۰۳	تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش	شکل ۶-۲۲
۱۰۴	تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش	شکل ۶-۲۳
۱۰۵	تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی دو	شکل ۶-۲۴
۱۰۶	تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی دو	شکل ۶-۲۵
۱۰۷	تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی صفر	شکل ۶-۲۶
۱۰۷	تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی صفر	شکل ۶-۲۷
۱۰۸	تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی شش	شکل ۶-۲۸
۱۰۹	تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی شش	شکل ۶-۲۹
۱۱۰	تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با $H=1$	شکل ۶-۳۰
۱۱۰	تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با $H=1$	شکل ۶-۳۱
۱۱۱	تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با $H=5$	شکل ۶-۳۲
۱۱۱	تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با $H=5$	شکل ۶-۳۳

فهرست جدول‌ها

۲۰	انواع ادوات فکت و کاربردهای اصلی آنها	جدول ۱-۲
۳۷	تاریخچه توسعه کنترل مقاوم [۳۹]	جدول ۱-۴
۸۶	اطلاعات مربوط به سیستم مورد مطالعه [۶۶]	جدول ۱-۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

در عصر حاضر گستردگی شبکه‌های قدرت در نقاط مختلف دنیا به قدری چشمگیر است که چشم‌پوشی از اهمیت این شبکه امکان‌پذیر نیست. این موضوع باعث رشد علوم مهندسی مختلف مرتبط با حوزه مطالعات شبکه قدرت شده است. در این میان می‌توان از علم کنترل به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخه‌های مهندسی در این حوزه یاد کرد. یکی از مهم‌ترین مباحث مطالعات شبکه قدرت، بحث پایداری و بهبود آن در شبکه می‌باشد. در سال‌های اخیر سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS)، به عنوان یکی از روش‌های موثر برای بهبود عملکرد کنترل‌پذیری سیستم قدرت و محدودیت‌های انتقال توان مطرح شده است. از جمله این ادوات، جبران‌کننده سنکرون استاتیکی^۱ (STATCOM) می‌باشد که به صورت یک اینورتر ولتاژ بالا به شکل موازی به شبکه وصل می‌شود [۱].

یکی از مسائل مهم جهت بهبود عملکرد این ادوات، طراحی کنترل‌کننده مناسب برای آنها می‌باشد. پیچیدگی‌های سیستم قدرت و غیرخطی بودن آن و رفتارها و پدیده‌های غیرقطعی باعث کاهش عملکرد مطلوب و پایداری سیستم قدرت می‌شود. لذا در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها برای طراحی کنترل‌کننده تجهیزات سیستم قدرت به منظور بهبود عملکرد آنها امری ضروری و مهم می‌باشد. با توجه به این شرایط، طراحی کنترل‌کننده مقاوم ضروری است.

در این پایان‌نامه برای غلبه بر اثرات عدم قطعیت‌ها، طراحی کنترل‌کننده مقاوم با استفاده از روش سنتز μ برای افزایش قوام و بهبود عملکرد دینامیکی سیستم قدرت پیشنهاد می‌شود. مسئله دیگری که در طراحی کنترل‌کننده حائز اهمیت می‌باشد، هزینه ساخت و مقرون به صرفه بودن آن است که این موضوع ارتباط مستقیمی با درجه کنترل‌کننده طراحی شده دارد. روش پیشنهادی برای رفع این موضوع در این پایان‌نامه

1- Flexible AC transmission system

2- Static synchronous compensator (STATCOM)

استفاده از الگوریتم‌های هوشمند می‌باشد. در واقع به دنبال کاهش درجه کنترل‌کننده از طریق به کار بردن الگوریتم‌های هوشمند می‌باشیم. الگوریتم هوشمند مورد استفاده در این پایان‌نامه الگوریتم یادگیری بر مبنای آموزش (TLBO) می‌باشد. کنترل‌کننده پیشنهادی به صورت ساختار ثابت^۲ فرض شده و الگوریتم بهینه‌سازی با هدف دستیابی به پایداری مقاوم به تنظیم ضرایب کنترل‌کننده ساختار ثابت پیشنهادی می‌پردازد. در نهایت عملکرد و مقاوم بودن سیستم کنترلی پیشنهادی، در رنج وسیعی از شرایط کاری سیستم قدرت بررسی می‌شود. همچنین عملکرد الگوریتم هوشمند مورد نظر نیز از لحاظ کارایی با الگوریتم هوشمند ازدحام ذرات مقایسه می‌گردد.

۱-۲- انگیزه تحقیق

همراه با توسعه صنعت و گوناگون شدن نیازمندی‌های بشر، استفاده از انرژی رو به فزونی است. این افزایش نرخ تقاضا، باعث رقابتی‌تر شدن و ارزشمندتر شدن حامل‌های انرژی در جهان مدرن شده است. به مرور زمان مفهوم مدیریت انرژی و افزایش کارایی در تولید، انتقال و مصرف انرژی جزء مفاهیم و دغدغه‌های اصلی حوزه انرژی شد. این مفاهیم باعث شکل‌گیری و گسترش شبکه‌های مختلف انرژی شد که از میان آنها انرژی شبکه برق از جایگاه ویژه برخوردار است. این موضوع باعث رشد چشم‌گیر شبکه برق شده و حفظ امنیت و کنترل مناسب این شبکه را به عنوان یک دغدغه مهم برای بهره‌برداران این سیستم در آورده است. عواملی چون موضوع‌های اقتصادی و محیط زیستی باعث شده که شبکه‌های برق کنونی در نزدیکی حداکثر توان انتقالی خود مورد بهره‌برداری قرار گیرند. این شرایط باعث شده حفظ پایداری شبکه بسیار پر اهمیت شود. در این میان ادوات FACTS به عنوان یک استراتژی کمکی برای افزایش پایداری سیستم‌های

1- Teaching-Learning-Based Optimization

2- Fixed Structure

قدرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین موارد مهم مورد نیاز برای استفاده صحیح این تجهیزات، طراحی کنترل‌کننده مطلوب می‌باشد. از این‌رو با طراحی مناسب می‌توان به هدف کنترلی مورد نظر نزدیک شد و پایداری سیستم به شکل مطلوب‌تری محقق گردد. به همین علت طراحی کنترل‌کننده مناسب با اهداف کنترلی مختلف (با توجه به تقسیم‌بندی‌های مختلف پایداری سیستم قدرت) مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است [۱].

۱-۳- اهداف تحقیق

همانطور که اشاره شد استفاده از ادوات FACTs می‌تواند یک استراتژی مطلوب برای بهبود پایداری شبکه و میرایی نوسانات آن باشد. در بین ادوات FACTs مختلف STATCOM دارای توانمندی مطلوبی در میرایی نوسانات شبکه و تنظیم ولتاژ محلی است. از این‌رو در این پایان‌نامه نیز با هدف دستیابی به پایداری مطلوب شبکه و میرایی نوسانات آن از تجهیز STATCOM استفاده می‌شود. از طرفی شبکه قدرت همواره دارای عدم قطعیت‌های مختلف از جمله تغییرات ناگهانی و پیش‌بینی نشده بارهای شبکه، بروز خطاهای مختلف و در نظر نگرفتن مدل کامل و دقیق شبکه برای انجام محاسبات و تحلیل‌های مختلف شبکه، به علت جلوگیری از پیچیدگی‌های محاسباتی است. صرف نظر کردن از این عدم قطعیت‌ها در طراحی کنترل‌کننده برای همچنین سیستمی می‌تواند باعث عدم دستیابی به هدف مورد نظر در رنج وسیع کاری شود. در این پایان‌نامه برای غلبه بر اثرات عدم قطعیت‌ها، طراحی کنترل‌کننده مقاوم پیشنهاد می‌شود.

کنترل مقاوم^۱ یک استراتژی طراحی سیستم‌های کنترل می‌باشد، که در آن بر روی ثبات و قوام^۲ عملکرد

1- Robust Control

2- Robustness

سیستم کنترلی در مقابل تغییرات و نامعینی‌ها، تاکید می‌شود. در کنترل مقاوم هدف از طراحی، ایجاد یک سیستم کنترلی است که تغییرات در شرایط سیستم، کمترین اثر را در خروجی داشته باشد.

در طراحی یک سیستم کنترلی، مرتبه سیستم کنترلی طراحی شده، همواره به طور مستقیم بر روی پیچیدگی‌ها و هزینه‌های ساخت آن سیستم کنترلی تاثیرگذار است. بدین منظور برای جلوگیری از پیچیدگی‌های طراحی و همچنین کاهش هزینه ساخت، کاهش مرتبه کنترل‌کننده طراحی شده، امری غیرقابل اجتناب می‌باشد. از این‌رو در این پایان‌نامه الگوریتم طراحی پیشنهادی با هدف کاهش مرتبه و حفظ پایداری مقاوم سیستم کنترلی ارائه می‌شود.

۱-۴- مروری بر پایان‌نامه

پایان‌نامه پیشرو در هفت فصل تدوین شده است. در فصل دوم مروری بر کارهای انجام شده در زمینه پایداری و میرایی نوسانات سیستم قدرت با استفاده از تجهیز STATCOM انجام می‌شود. همچنین در این فصل به بررسی انواع ادوات FACTS، نقاط ضعف و قوت هر یک از آنها می‌پردازیم. با توجه به اهمیت مسئله پایداری، در فصل سوم به تفصیل به مسائل پیرامون پایداری و انواع آن پرداخته می‌شود. در ادامه این فصل روش‌های مختلف حفظ پایداری در شبکه قدرت بیان می‌شود. در فصل چهارم این پایان‌نامه مروری بر مفاهیم پایه‌ای کنترل مقاوم و تعریف مسئله سنتز H_{∞} خواهیم داشت. مدلسازی سیستم و طرح کنترلی پیشنهادی نیز در فصل پنجم آورده شده و در ادامه در فصل بعدی، شبیه‌سازی و نتایج آن ارائه می‌شود. در نهایت در فصل آخر نتیجه‌گیری از موضوع تحقیق بیان شده و پیشنهادات برای کارهای آینده ذکر می‌شود.

فصل دوم

مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مقدمه

در این فصل مروری بر کارهای انجام شده در زمینه جبران‌کننده سنکرون استاتیکی انجام خواهیم داد. در ابتدا مفاهیم پایه مربوط به جبران‌سازی و تجهیز STATCOM آورده می‌شود. سپس تاریخچه‌ای از تحقیق بیان می‌شود. در این قسمت مطالعه‌ای بر انواع ادوات FACTS و تقسیم‌بندی آنها از منظرهای مختلف داشته و همچنین تفاوت‌ها، نقاط ضعف و قوت هر یک بیان می‌شود. از آنجا که در این پایان‌نامه بر روی تجهیز STATCOM کار شده است، در ادامه مطالب این فصل، مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی پایداری شبکه قدرت در حضور STATCOM و تاثیرگذاری آن در میرایی نوسانات قدرت بیان می‌شود. در واقع همانطور که در ادامه توضیح خواهد داده شد، کارهای انجام شده را می‌توان از دو جنبه بررسی کرد. اولین مورد، بررسی هدف کنترلی مورد نظر و مورد دوم، بررسی روش کنترلی پیشنهادی می‌باشد. در رابطه با هدف کنترلی در حالت کلی می‌توان دو هدف اصلی را برای استفاده از STATCOM در نظر گرفت که عبارتند از پایداری زاویه بار و تنظیم ولتاژ می‌باشند. در مورد روش کنترلی نیز روش‌های مختلفی از جمله روش‌های مختلف کنترل خطی و غیرخطی قابل تقسیم می‌باشند، که در ادامه مطالب این فصل به توضیح بیشتر این موارد خواهیم پرداخت.

۲-۲- مفاهیم پایه

همراه با افزایش هزینه انرژی، هزینه ساخت، به وجود آمدن محدودیت‌های زیست محیطی و دیگر مشکلات قانونی و اجتماعی، روند افزایش ساخت و ساز خطوط جدید از دهه ۷۰ به بعد کاهش یافت. همراه با این دگرگونی‌ها، تغییرات عمیقی در ساختار صنایع بوجود آمد و تمامی این عوامل موجب شد که شبکه قدرت بسیار فشرده شده و شبکه‌های قدرت مدرن در نزدیکی حداکثر توان خود در حال بهره‌برداری باشند.

علاوه بر آن در چند سال گذشته با ارائه تجدید ساختار در صنعت برق، این صنعت به سمت رقابتی شدن حرکت نموده است. برای رقابتی شدن در صنعت برق دسترسی آزاد برای تمام شرکت کنندگان امری ضروری است. از این رو شبکه انتقال باید توانایی عبور توان تمام شرکت کنندگان را داشته باشد [۲].

از یک طرف ویژگی‌های شبکه‌های قدرت مدرن و چالش‌های پیشروی آن و از طرف دیگر پیشرفت در زمینه الکترونیک قدرت باعث ظهور ادوات FACTS شده است. در میان این ادوات، نسل جدید آنها که بر پایه مبدل اینورتری منبع ولتاژ کار می‌کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. در حالت کلی بسته به نوع کاربرد، نوع کلید، نوع شبکه که اینورتر به آن وصل می‌شود و دیگر موارد، اینورترهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت کلی از لحاظ نوع تغذیه اینورتر و باری که اینورتر آن را تغذیه می‌کند، می‌توان اینورترها را به دو گروه اینورترهای منبع ولتاژ^۱ (VSI) و اینورترهای منبع جریان^۲ (CSI) تقسیم کرد.

اینورترهای منبع جریان بیشتر در کاربردهای درایوهای ماشین‌های بزرگ صنعتی کاربرد دارند یا حتی در جاهایی که بحث توان بالا وجود دارد نیز استفاده می‌شوند. در این اینورترها، ورودی جریان مستقیم (DC) و خروجی آن ولتاژ متناوب (AC) می‌باشد. اما در اینورترهای منبع ولتاژی این موضوع برعکس می‌باشد یعنی ورودی ولتاژ مستقیم (DC) و خروجی جریان متناوب (AC) می‌باشد. هر دو این اینورترها توان قابلیت انتقال در هر دو سمت را دارا می‌باشند، یعنی در صورتی که ولتاژ و جریان هم علامت باشند سیستم به صورت اینورتری و در صورتی که مختلف علامت باشند، سیستم به صورت یکسوساز عمل می‌کند [۲].

یکی از ادوات سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر، جبران‌کننده سنکرون استاتیکی

1- Voltage Source Inverter

2- Current Source Inverter

(STATCOM) می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان پایداری ولتاژ، دینامیکی و گذرای سیستم قدرت را بهبود بخشید. در واقع جبران‌کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM) نسل دوم جبران‌کننده توان راکتیو استاتیکی^۱ (SVC) می‌باشد به همین دلیل از آن با نام جبران‌کننده پیشرفته توان راکتیو^۲ (ASVC) نیز یاد می‌شود. در عمل این تجهیز به عنوان یک اینورتر ولتاژ بالا است که ولتاژ DC را از طریق سوئیچینگ به ولتاژ AC تبدیل می‌کند و با تزریق جریان به شبکه، توان راکتیو و ولتاژ شبکه را کنترل می‌کند. در واقع همانطور که ذکر شد، این کنترل‌کننده در مقایسه با کنترل‌کننده‌های نسل قدیمی خود (SVC) دارای مزیت‌هایی از قبیل کنترل پیوسته توان راکتیو با توجه به ویژگی اینورتر منبع ولتاژ می‌باشد. آرایش کلی سیستم STATCOM در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

مبدل‌هایی که امروزه در طراحی اینورتری ولتاژ بالا به کار می‌رود، بیشتر از نوع مبدل اینورتری منبع ولتاژ هستند. ساختار یک اینورتری ولتاژ بالا متصل به شبکه متشکل شده است از:

(۱) اینورتر منبع ولتاژ (VSI)

(۲) ترانسفورماتور تزریق

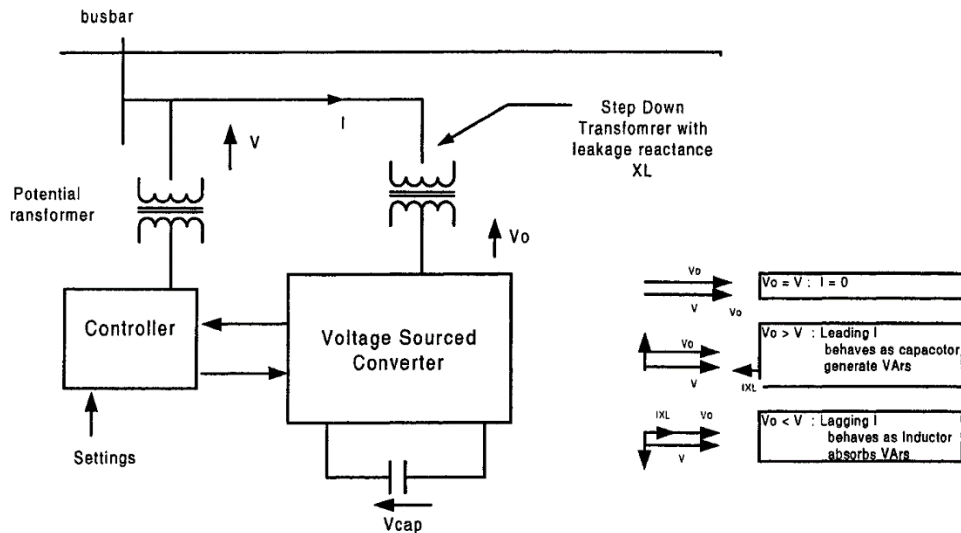
(۳) خازن DC به عنوان ابزار ذخیره انرژی

(۴) سیستم کنترلی

قسمت VSI کنترل ولتاژ ثابت را فراهم می‌آورد. ولتاژ خروجی VSI که با V_o نشان داده می‌شود، از شاخص مدولاسیون اینورتر mE در کنترل PWM و اندازه‌گیری ولتاژ خازن لینک DC حاصل می‌شود. در سیستم قدرت عملکرد اینورتر ولتاژ بالا، همانند کندانسور سنکرون است که به طور معمول می‌تواند توان راکتیو مورد نیاز را تأمین کند. برای کنترل میزان توان مبادله شده بین شبکه و STATCOM

1- Static VAR Compensator

2- Advanced static VAR compensator



شکل ۱-۲: آرایش کلی سیستم STATCOM [۲]

بایستی ولتاژ خروجی آن را کنترل کرد. دو روش اصلی برای کنترل این ولتاژ خروجی وجود دارد:

(۱) روش مستقیم.

(۲) روش غیر مستقیم.

در روش مستقیم، ولتاژ خازن DC ثابت بوده و ولتاژ خروجی V_o مستقیماً با تغییر زمان‌های کلیدزنی کلیدهای قدرت تغییر داده می‌شود. در روش غیرمستقیم، تغییر در زمان کلیدزنی‌ها اعمال نمی‌شود و اندازه ولتاژ خروجی V_o با تغییر ولتاژ خازن DC انجام می‌شود. برای تغییر ولتاژ خازن DC بایستی آن را شارژ یا دشارژ بین ولتاژ خروجی «تغییر فاز موقتی» کرد، که این عمل توسط STATCOM و ایجاد ولتاژ خطا انجام می‌شود معمولاً در بیشتر مطالعات برای کنترل سوئیچینگ اینورتر، از روش مستقیم PWM استفاده می‌کنند.

۲-۳- تاریخچه تحقیق

دستگاه‌های انتقال الکتریکی انعطاف پذیر (FACTS) کنترل کننده‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت هستند که توان عبوری خطوط و ولتاژ انتقال را با اعمال کنترل سریع تنظیم می‌کنند. مفهوم FACTS توسط هینگومانی^۱ از موسسه تحقیقات برق (EPRI) در اواخر دهه ۱۹۸۰ پیشنهاد شد [۳]. قبل از معرفی تکنولوژی FACTS، کنترل سیستم قدرت بر روی کنترل ژنراتور متمرکز بوده، چرا که در آن زمان قابلیت کنترل شبکه انتقال بسیار ضعیف بود. دستگاه‌های FACTS قادر به کنترل پارامترهای انتقال مانند امپدانس سری، امپدانس شنت، زاویه فاز و غیره هستند. تکنولوژی FACTS تنها یک کنترل کننده توان بالا سیستم قدرت نیست بلکه مجموعه‌ای از کنترل کننده‌های مختلف است که هر یک می‌توانند برای کنترل پارامترهای مذکور شبکه به صورت جداگانه یا جمعی استفاده شوند. برخی از توانمندی‌های ادوات FACTS عبارتند از:

- تنظیم توان عبوری در مسیرهای مجاز انتقال.
- بارگذاری امن خطوط در نزدیک محدودیت‌های حرارتی آنها.
- پیشگیری از خروج‌های سلسله مراتبی عناصر شبکه در هنگام بروز اغتشاش با کمک کنترل اضطراری.
- کاهش نوساناتی که می‌تواند امنیت سیستم قدرت را تهدید کنند و یا ظرفیت قابل استفاده خط انتقال را محدود کنند.
- بهبود پایداری شبکه قدرت.

1- N.G. Hingomani

از نقطه نظر کنترلی، کنترل‌کننده‌های FACTs را می‌توان به چهار نوع زیر تقسیم کرد [۲]:

الف) کنترل‌کننده‌های سری: این دسته از کنترل‌کننده‌ها می‌توانند یک امیدانس متغیر مانند خازن، راکتور و یا یک منبع متغیر مبدل قدرت که بصورت سری در خطوط انتقال نصب شده‌اند، باشند.

ب) کنترل‌کننده‌های موازی: کنترل‌کننده‌های موازی ممکن است امیدانس متغیر، منبع متغیر و یا ترکیبی از آنها باشند. این کنترل‌کننده‌ها بصورت موازی به یک نقطه از شبکه متصل می‌شوند. در واقع، کنترل‌کننده‌های موازی با تزریق جریان به نقطه اتصال، هدف کنترلی مدنظر را عملی می‌کنند.

ج) کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری-سری: این دسته از کنترل‌کننده‌ها می‌توانند ترکیبی از کنترل‌کننده‌های سری جداگانه باشند که در یک سیستم انتقال به صورت هماهنگ با هم کنترل می‌شوند.

د) کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری-موازی: این دسته از کنترل‌کننده‌ها نیز ترکیبی از کنترل‌کننده‌های سری جداگانه و کنترل‌کننده موازی می‌باشند که با بصورت هماهنگ کنترل می‌شوند.

۲-۳-۱- نسل اول ادوات FACTs

نسل اول ادوات FACTs دارای یک ویژگی مشترک یعنی کنترل توان راکتیو از طریق کنترل راکتانس خازنی و سلفی می‌باشند. در واقع این دست از ادوات FACTs از طریق کنترل راکتانس عمل می‌کنند. برخی از این نوع ادوات FACTs عبارتند از:

۱- جبران کننده خازنی سری یا خازن سری کنترل شده بوسیله تریستوری (TSSC):

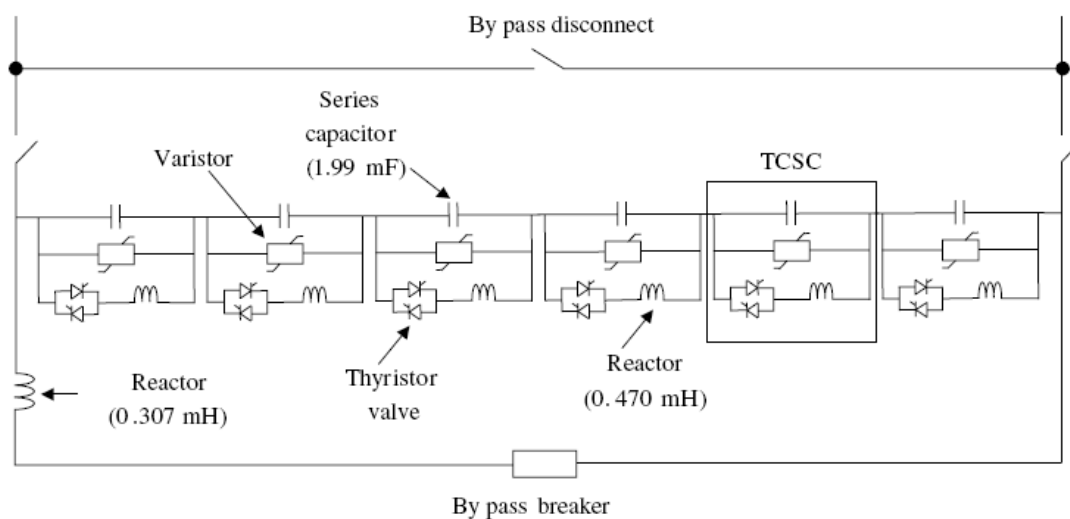
جبران‌کننده راکتانس خازنی شامل بانک‌های خازنی سری کنترل‌شده توسط سویچ‌های تریستور

1- Thyristor Switched Series Capacitor

موازی می‌باشند. این دست از کنترل‌کننده‌ها توانمندی ایجاد راکتانس پله‌ای و تنظیم پله‌ای توان راکتیو را دارند.

۲- خازن سری کنترل تریستوری (TCSC): جبران‌کننده راکتانس خازنی شامل تعدادی خازن

سری موازی با یک راکتور کنترل شده تریستور می‌باشد. قراردادن راکتور کنترل‌شونده به صورت موازی با خازن‌های سری، سیستم جبران‌سازی سری با تغییرات سریع و پیوسته را بوجود می‌آورد. بکارگیری خازن‌های سری قابل تنظیم، موثرترین روش جبران‌سازی راکتیو خطوط انتقال بلند است و ابزار سودمندی جهت کنترل توان انتقال یافته از این خطوط محسوب می‌شود. ساختار داخلی یک فاز از یک TCSC سه‌فاز در شکل (۲-۲) به نمایش گذاشته شده است. مطابق با این شکل، یک TCSC به صورت کلی، از ترکیب سری یک یا چند بلوک پایه TCSC تشکیل می‌شود. هر کدام از این بلوک‌ها دارای یک راکتور کنترل‌شونده با ترسیستور^۲ (TCR) هستند که در اتصال موازی با یک خازن ثابت قرار گرفته است.



شکل ۲-۲: ساختار داخلی یک TCSC [۲]

1- Thyristor-controlled Series Capacitor

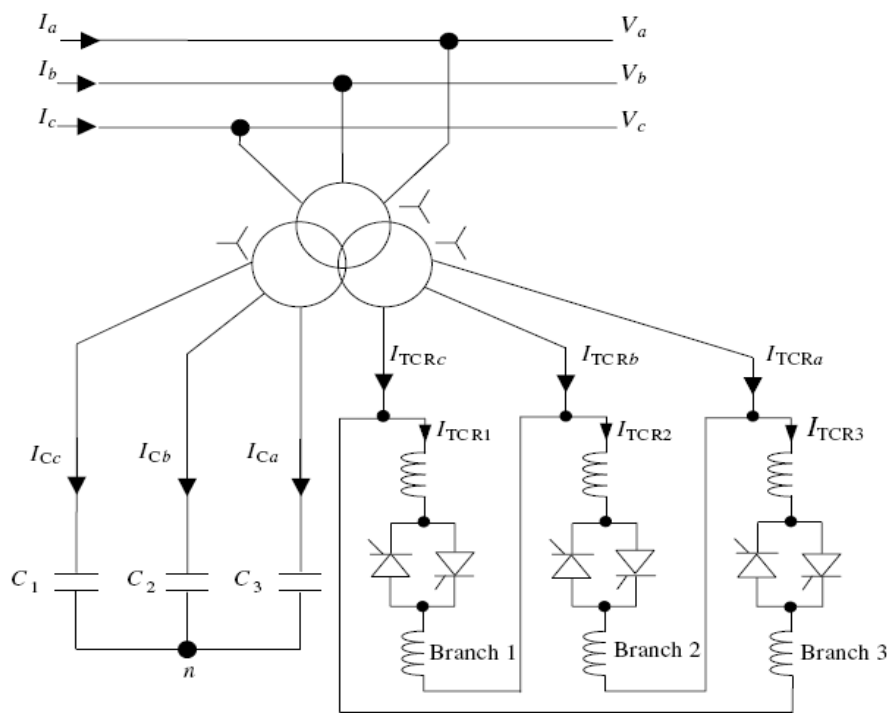
2 - Thyristor Controlled Reactor

۳- خازن کنترل شده با ترستور یا خازن سوئیچ شده ترستوری (TSC): شامل یک خازن سوئیچ

ترستور است که راکتانس موثر آن به صورت گام به گام توسط یک سوئیچ ترستوری تغییر می کند. خازن سوئیچ شده ترستوری بصورت موازی به شبکه قدرت متصل می شود.

۴- جبران گر استاتیکی توان راکتیو (SVC): جبران گر استاتیکی توان راکتیو SVC در حقیقت،

یک راکتانس (سوسپتانس) متغیر موازی است که به منظور تثبیت اندازه ولتاژ شین متصل به آن، در محدوده‌ای از عملکرد خود، مقداری توان راکتیو را به نقطه اتصال تزریق نموده و یا از آن دریافت می کند. در ساده ترین شکل، SVC از یک سلف سه فاز کنترل شده با ترستور (TCR) به همراه یک بانک خازنی سه فاز (ثابت یا کنترل پذیر) تشکیل شده است که به صورت موازی مطابق با شکل (۲-۳) که در صفحه بعد آورده شده است، به یکدیگر متصل گردیده اند. مطابق با شکل (۲-۳)، TCR در حقیقت، یک راکتور (سلف) کنترل پذیر است که مقدار راکتانس آن از طریق تغییر زاویه آتش ترستورهای داخلی قابل تنظیم می باشد.



شکل ۲-۳: نمای ساختاری یک SVC سه فاز به صورت اتصال موازی یک TCR سه فاز با یک بانک خازنی سه فاز [۲]

۲-۳-۲- نسل دوم دستگاه های FACTs

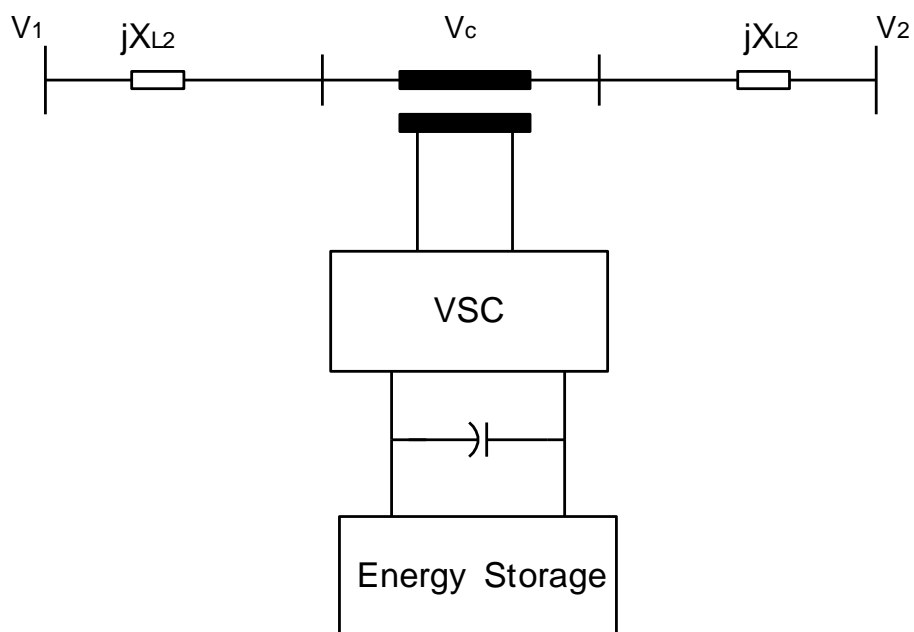
نسل دوم کنترل کننده های FACTs بر مبنا مبدل منبع ولتاژی طراحی شده اند. این دسته از ادوات FACTs از طریق کنترل اینورتری منبع ولتاژ داخلی عمل می کنند و دارای مزایای متعددی نسبت به کنترل کننده های امپدانس متغیر می باشند. برخی از کنترل کننده های FACTs متعلق به این دسته عبارتند از:

۱- جبران سازی سری سنکرون استاتیک^۱(SSSC): در عمل SSSC یک مبدل منبع ولتاژ سنکرون است که بطور سری با سیستم انتقال قرار می گیرد. توان حقیقی مورد نیاز SSSC جهت تبادل با شبکه قدرت از سوی یک منبع انرژی DC (باتری یا خازن که در سمت DC مبدل قرار دارد) تأمین می گردد. ولتاژ خروجی در SSSC با کنترل زمان هدایت سوئیچ های واقع در مبدل منبع ولتاژ صورت می گیرد.

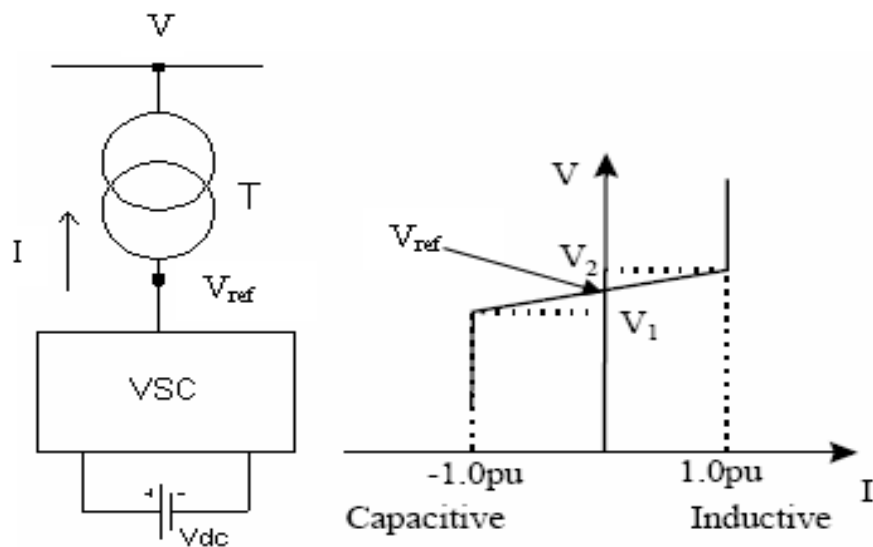
بنابراین تحت هر شرایطی (ماندگار/گذرا) با تنظیم ولتاژ خروجی SSSC توان خط انتقال کنترل می گردد. شکل (۲-۴) ساختار و طرز اتصال SSSC به شبکه را نشان می دهد.

۱- جبران کننده استاتیکی (STATCOM) : تجهیز STATCOM، که سابق به نام STATCON یا کندانسور استاتیکی شناخته شده است، اساس عملکردی مشابه کندانسور سنکرون دارد. مبدل های به کاررفته در این جبران ساز توان راکتیو مورد نیاز را به طور محلی (در محل اتصال STATCOM به شبکه) تأمین کرده و خروجی آن بطور پیوسته قابل تنظیم می باشد، به همین دلیل در مواردی که ولتاژ شبکه قدرت تغییرات وسیعی داشته باشد (در حالت بروز

1- Static Synchronous Series Compensator



شکل ۲-۴: ساختار کلی تجهیز SSSC [۲]

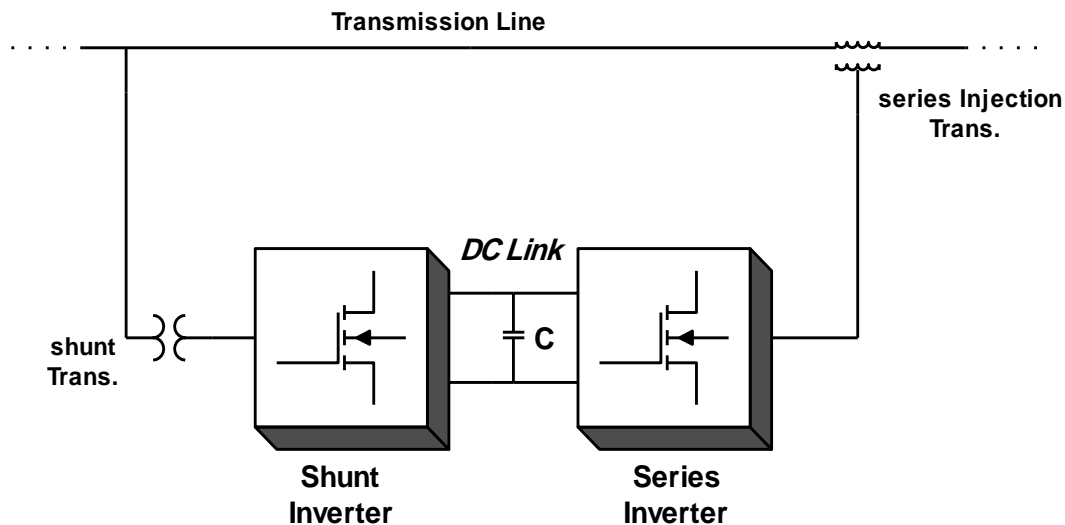


شکل ۲-۵: ساختار STATCOM و مشخصه V-I آن [۲]

اغتشاش یا پس از رفع خطا) از این جبران‌ساز استفاده می‌شود. شکل (۲-۵) در ادامه طرحی از STATCOM و مشخصه V-I آن را نشان می‌دهد.

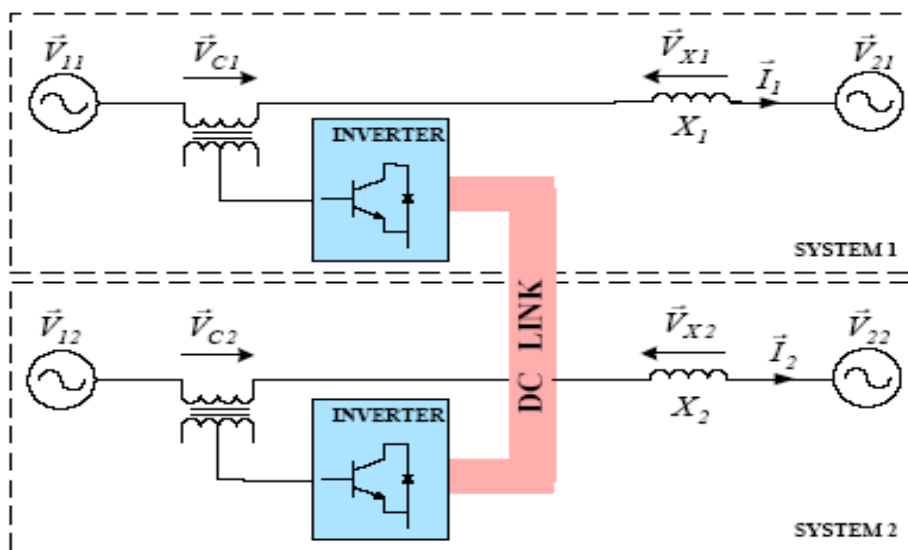
۲- کنترل جریان یکپارچه جریان (UPFC): در واقع UPFC از اتصال STATCOM و SSSC

پدید می‌آید. بخش‌های سری و موازی در UPFC مشترکاً با یک خازن DC تغذیه می‌شوند. از لحاظ توانمندی UPFC کلیه اعمال جبران‌سازی سری و موازی را با هم انجام می‌دهد و می‌تواند بطور پیوسته زاویه فاز، امپدانس و دامنه ولتاژ را کنترل کند و بنابراین توان حقیقی و راکتیو خط انتقال را مستقلاً کنترل کند. بخش‌های سری و موازی در UPFC عملکرد مستقل دارند. از دیدگاهی UPFC را می‌توان با PST مقایسه نمود با این تفاوت که ولتاژ سری تزریق با هر فاز و دامنه (در محدوده تعریف شده) قابل دستیابی است. در واقع UPFC قابلیت‌های STATCOM و TCSC را یکجا در بر دارد و حوزه عملکرد آن در صفحه توان (P-Q) وسیع‌تر از سایرین است. شکل (۲-۶) در ادامه طرحی از UPFC را نشان می‌دهد. در این شکل همچنین حوزه کاری چند عنصر FACTS با یکدیگر مقایسه شده است و همانطور که دیده می‌شود UPFC نسبت به بقیه برتری دارد. ناحیه هاشور خورده متعلق به UPFC است.



شکل ۲-۶: ساختار کلی تجهیز UPFC [۲]

۳- کنترل کننده توان بین خطوط^۱ (IPFC): مفهوم IPFC را می توان توسعه مفهوم جبران سازی سری سنکرون استاتیک (SSSC) دانست. SSSC وسیله ای مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ^۲ (VSC) است که ولتاژی را به صورت سری با خط انتقال به آن تزریق می کند از آنجایی که شین DC مبدل منبع ولتاژ هیچ منبع توان حقیقی ندارد توان حقیقی تزریق شده بوسیله SSSC به خط انتقال به منظور اطمینان از بهره برداری مناسب وسیله باید صفر باشد (به غیر از مقدار کمی توان که در خود IPFC تلف می شود). این نشان می دهد که ولتاژ تزریق شده همیشه باید با جریان خط ۹۰ درجه اختلاف فاز داشته باشد و تنها متغیر قابل کنترل، دامنه ولتاژ است. اگر دو خط از یک شین پست خارج شود و روی هر کدام یک SSSC باشد، شین های DC مبدل منبع ولتاژ می توانند تزویج شوند تا اجازه دهند توان حقیقی بین دو VSC تغییر کند. این آرایش IPFC نامیده می شود و شکل (۷-۲) در صفحه بعد این ساختار را نشان می دهد. با این ساختار توان حقیقی می تواند از یک طرف خط گرفته و به طرف دیگر تزریق شود.



شکل ۷-۲: ساختار کلی تجهیز IPFC [۲]

- 1 - Interline Power-Flow Controller
- 2 - Voltage Source Converter

جدول (۱-۲) نحوه قرارگیری برخی از مهمترین ادوات فکت در شبکه قدرت و عملکرد اصلی هر یک از این ادوات را نشان می دهد.

جدول ۱-۲: انواع ادوات فکت و کاربردهای اصلی آنها

نام تجهیز	نحوه قرارگیری در شبکه	عملکرد اصلی تجهیز
SVC	موازی	کنترل ولتاژ
TCSC	سری	کنترل توان عبوری
TCPAR	سری و موازی	کنترل توان عبوری
STATCOM	موازی	کنترل ولتاژ و میرایی نوسانات
SSSC	سری	کنترل توان عبوری و میرایی نوسانات
UPFC	سری و موازی	کنترل ولتاژ و کنترل توان عبوری و میرایی نوسانات

۲-۴- نقش STATCOM در افزایش میرایی

STATCOM به علت عملکرد حالت دائم و ویژگی‌های بهره‌برداری بسیار مؤثر، نقش مهمی در تامین توان راکتیو و تثبیت ولتاژ دارد. مطالعات مختلفی در مورد رفتار دینامیکی STATCOM و همچنین کاربرد آن برای

بهبود عملکرد گذرا در سیستم‌های قدرت انجام شده است [۴]. با این حال همچنان، استراتژی‌های کنترل مناسب برای دستیابی به پایداری مطلوب با استفاده از STATCOM ضروری هستند. تقسیم‌بندی کارهای انجام شده را می‌توان از دو منظر مختلف بررسی کرد، که عبارتند از:

(۱) روش کنترلی مورد استفاده

(۲) هدف کنترلی مورد نظر

روش‌های کنترلی مختلفی برای کنترل مطلوب STATCOM در مراجع مختلف ارائه شده است. در طراحی کنترل خطی می‌توان به کنترل کننده پیش‌فاز-پس‌فاز ساده در [۵]، کنترل کننده PI ساده [۶]،

کنترل کننده PI تطبیقی [۷] اشاره کرد. در مرجع [۸] نیز از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تنظیم ضرایب کنترلی کنترل کننده PI به منظور دستیابی به پاسخ دینامیکی مطلوب‌تر استفاده شده است. همچنین مرجع [۹] نیز دو کنترل کننده PID برای تنظیم ولتاژ لینک DC و AC جبران کننده سنکرون استاتیکی ارائه داده است. در این مرجع نیز با استفاده از الگوریتم هوشمند رقابت استعماری به تنظیم ضرایب کنترل کننده‌ها پرداخته شده است.

در طراحی کنترل کننده‌های غیرخطی نیز مرجع [۱۰] روش کنترل مود لغزشی ساده و مرجع [۱۱] یک روش کنترل مود لغزشی فازی برای کنترل جبران کننده سنکرون استاتیکی ارائه داده‌اند. کنترل کننده غیرخطی داخلی جبران کننده استاتیکی برای تولید پالس‌های سوئیچ زنی با هدف کنترل و تنظیم ولتاژ در مرجع [۱۲] ارائه شده است. طراحی کنترل غیرخطی برای STATCOM مبتنی بر نظریه حساب دیفرانسیل در [۱۳] ارائه شده است. کنترل کننده طراحی شده توسط این روش، امکان خطی‌سازی جبران کننده و کنترل مستقیم خروجی ولتاژ خازنی و توان راکتیو STATCOM را فراهم می‌کند.

مرجع [۱۴] یک کنترل کننده مقاوم تطبیقی برای سیستم STATCOM با در نظر گرفتن مدل غیرخطی شبکه قدرت ارائه شده است. همچنین مراجع [۱۵-۱۶] نیز ارائه تابع انرژی مناسب کنترل کننده غیرخطی برای میرایی نوسانات شبکه ارائه داده‌اند. انتخاب سیگنال ورودی یکی از موارد مهم در طراحی یک کنترل کننده است. معمولاً از سیگنال ورودی کمکی مختلفی همچون توان حقیقی و ولتاژ باس STATCOM، ولتاژ داخلی محاسبه شده، برای کنترل STATCOM استفاده می‌شود.

اکثر کنترل کننده‌های معرفی شده برای STATCOM بر اساس مدل خطی شده سیستم قدرت طراحی شده‌اند و از این رو برای نقاط کاری مشخصی مناسب هستند. تغییرات در نقطه کار یک سیستم قدرت به دلایل همچون تغییر بار و همچنین اختلالات غیر قابل پیش‌بینی، همواره رخ می‌دهد. یک کنترل کننده طراحی شده برای یک نقطه کار خاص ممکن است در سایر نقاط کاری عملکرد رضایت بخشی نداشته باشد.

کنترل کننده‌ای که برای کار بر روی یک مجموعه‌ای از نقاط کاری مختلف طراحی شده است می‌تواند از مشکل ذکر شده در مواجهه با عدم قطعیت عملکردی سیستم قدرت جلوگیری کند. چنین کنترل کننده‌ای به عنوان کنترل کننده مقاوم^۱ شناخته می‌شود. بنابراین طراحی یک کنترل کننده مقاوم که به طور موثر در طیف وسیعی از شرایط عملیاتی کار می‌کند بسیار مطلوب است.

در مراجع [۱۷-۱۹] کنترل کننده مقاوم برای جلوگیری از ضعف یاد شده ارائه شده است. به ترتیب در این مراجع از روش نابرابری ماتریس خطی^۲ (LMI)، Loop-shaping و H_∞ استفاده شده است. در مرجع [۲۰] کنترل مقاوم تطبیقی برای یک STATCOM که در شبکه چند ماشینه حضور دارد، ارائه شده است. در [۲۱] یک روش طراحی استراتژی‌های کنترل میرایی مقاوم برای کنترل کننده STATCOM در دو مدل تقریبی و دقیق ارائه شده است. کنترل کننده طراحی شده برای تعدادی از شرایط اغتشاش از جمله خطاهای سه فاز متقارن مورد آزمایش قرار گرفت. کنترل کننده مقاوم برای طیف وسیعی از شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت موثر بوده است. کنترل کننده مقاوم پیشنهادی برتری محسوسی نسبت به کنترل PI مرسوم داشته است.

از نظر هدف کنترلی می‌توان کارهای انجام شده را به دو دسته کلی، پایداری زاویه بار و تنظیم ولتاژ شبکه تقسیم بندی کرد. به ترتیب مراجع [۲۲] و [۲۳] کنترل پیشنهادی را با هدف بهبود پایداری زاویه بار و تنظیم ولتاژ شبکه قدرت ارائه داده‌اند. در مرجع [۲۴] تضاد بین کنترل ولتاژ و کنترل میرایی در STATCOM بررسی شده است. تاکید بیشتر بر کنترل ولتاژ، گشتاور میرایی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، با وجود اینکه کنترل میرایی می‌تواند نوسانات سیستم را تثبیت کند اما نوسانات جزئی را در ولتاژ تولید می‌کند. بهترین موقعیت نصب STATCOM برای میرایی نوسانات سیستم قدرت در تحلیل یک

1- Robust Controller

2- Linear Matrix Inequality

سیستم قدرت تک ماشینه متصل به باس بی‌نهایت^۱ (SMIB)، نقطه میانی محاسبه شده است. مرجع [۲۵] کنترل همزمان پایداری زاویه بار و تنظیم ولتاژ شبکه را هدف کنترلی خود در نظر گرفته است و با مصالحه بین آن دو، کنترل‌کننده خود را طراحی کرده است. یک مطالعه مقایسه‌ای بین نسل اول و دوم در تاثیرگذاری میرایی نوسانات در [۲۶] ارائه شده است. همچنین مقایسه موردی بین دو کنترل‌کننده میراکننده نوسانات یعنی پایدارساز سیستم قدرت^۲ (PSS) و جبران‌کننده سنکرون استاتیکی موازی (STATCOM) برای افزایش میرایی نوسانات ژنراتور در مواجهه با یک اغتشاش با بکارگیری کنترل‌کننده PID در مرجع [۲۷] ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد بهتر STATCOM را نسبت به PSS و جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو (SVC) در میرایی نوسانات را نشان می‌دهد. تکنیک‌های کنترلی مختلفی برای کنترل ادوات FACTS ارائه شده است. در مرجع [۲۸] نیز با هدف پایداری دینامیکی و میرا کردن نوسانات قدرت، یک کنترل‌کننده تطبیقی برای STATCOM و ذخیرساز انرژی ارائه شده است. در مرجع [۲۹] نویسندگان به طراحی کنترل‌کننده PI خود تنظیم با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پرداخته‌اند.

مقالات دیگری با هدف بهینه کردن بهره کنترلی نیز ارائه شده‌اند که در آنها از الگوریتم‌های هوشمند استفاده شده است. در مرجع [۳۰] یک کنترل‌کننده فیدبک حالت برای بهبود پایداری سیستم قدرت با در نظر گرفتن STATCOM و PSS ارائه شده است. ضرایب کنترل‌کننده تحت شرایط کاری مختلف به وسیله الگوریتم ژنتیک بهینه شده‌اند. یک الگوریتم جدید بهینه‌سازی جهت طراحی کنترل‌کننده بهینه جبران‌کننده سنکرون استاتیکی سری (SSSC) با هدف بهبود میرایی نوسانات قدرت در مرجع [۳۱] ارائه شده است.

همچنین کارهای دیگر با در نظر گرفتن SSSC به همراه PSS برای بهبود پایداری انجام شده است.

1- Single Machine Infinite Bus

2- Power System Stabilizer

بطور مثال در مرجع [۳۲] نویسندگان یک طرح کنترلی با هدف بهبود نوسانات قدرت در یک سیستم دارای PSS و SSSC با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پویا ارائه داده‌اند. مرجع [۳۳] نیز الگوریتم ژنتیک بهبودیافته را به منظور یافتن بهترین طرح کنترلی مورد نظر ارائه داده است.

پایداری سیستم قدرت

۳-۱- مقدمه

سیستم برق مدرن یک شبکه پیچیده از ژنراتورهای سنکرون، خطوط انتقال و بار می‌باشد. در این سیستم بر خلاف شبکه‌های ابتدایی که بصورت جدا از هم بودن، قسمت‌های مختلف بصورت متصل در آمده و یک شبکه برق گسترده را شامل شده‌اند. قابلیت اطمینان کل سیستم از طریق یکپارچه شدن شبکه، بهبود یافته، اما اختلالات در چنین سیستمی توسعه یافته است که امکان دارد منجر به بی‌ثباتی سیستم و حتی خاموشی سیستم شود. سیستم‌هایی که فواصل انتقال طولانی بین مراکز بار و ایستگاه‌های تولید را دارند ممکن است نوسانات ضعیف و یا پرتعدادی را ارائه دهند. اگر مقدار اختلال بزرگ باشد، مثل یک خطای سه‌فاز، تغییر ناگهانی و زیادی بار، سیستم حتی می‌تواند به طور موقت ناپایدار شود. یک سیستم قدرت خوب باید توانایی بازگرداندن حالت عادی عملکرد خود را پس از اختلال داشته باشد. از آنجا که تامین بدون وقفه توان الکتریکی به بار مصرفی، کیفیت توان الکتریکی را تعیین می‌کند، ثبات و پایداری به عنوان یکی از موضوعات مهم تحقیق در سیستم‌های برق محسوب می‌شود [۱]. در این فصل در ابتدا به مسائل پیرامون پایداری و انواع آن و در انتها روش‌های مختلف حفظ پایداری در شبکه قدرت بیان می‌شود.

۳-۲- پایداری و تعریف آن در سیستم‌های قدرت

پایداری سیستم قدرت توانایی سیستم قدرت در باقی ماندن در حالت تعادل در شرایط عملکرد عادی سیستم و بدست آوردن نقطه کار تعادل جدید پس از به وجود آمدن اغتشاش در سیستم می‌باشد. پایداری از مهمترین مشخصه‌ها و ملزومات در سیستم‌های دینامیکی است. پایداری تعاریف مختلفی دارد؛ پایداری به مفهوم لیاپانوف و پایداری بر مبنای ورودی خروجی از جمله آنها می‌باشد. در مسائل تئوریک، سیستمی پایدار است که به ازای هر ورودی، محدوده خروجی محدود باشد. از دید مهندسی برق سیستم وقتی ناپایدار است که سیستم‌های کنترلی از عهده اغتشاش برنیایند و سیستم‌های حفاظتی برای حفظ سلامت سیستم

وارد عمل می‌شوند هر چند ژنراتورها و توربین‌ها سیستم‌های حفاظتی بسیار قوی دارند [۳۴].

میرایی نوسانات در سیستم قدرت یکی از عوامل مهم در عملکرد مطمئن و ایمن سیستم قدرت می‌باشد که باید به نحو مطلوبی کنترل شود. به منظور مطالعات پایداری می‌توان STATCOM را به وسیله یک منبع جریان موازی قابل کنترل مدل کرد. تجهیز STATCOM به عنوان یک اینورتر توان بالا در دو حالت کاری، جابه‌جایی توان انتقالی را تنظیم می‌کند. در حالت خازنی توان انتقالی افزایش پیدا کرده و در حالت سلفی کاهش می‌یابد و با کنترل مناسب می‌توان حاشیه پایداری را افزایش داد [۳۵].

۳-۲-۱- انواع پایداری در سیستم‌های قدرت

پدیده‌ها و پایداری در یک سیستم قدرت از دو جهت، شدت اغتشاش و مدت زمانی که در شبکه باقی می‌مانند تقسیم بندی می‌شوند. در تقسیم بندی اول، پایداری در یک سیستم قدرت را به پایداری حالت ماندگار، دینامیکی و گذرا تقسیم می‌شود. هر چند مرز روشنی بین این تقسیم‌بندی‌ها وجود ندارد ولی در کتاب‌ها و مقالات مختلف پایداری شبکه تحت اغتشاش بسیار کوچک را پایداری حالت ماندگار، پایداری شبکه تحت اغتشاشات بسیار شدید را پایداری گذرا و پایداری شبکه تحت اغتشاشاتی که توسط کنترل‌کننده‌های نیروگاه‌ها، مثل کنترل‌کننده ولتاژ و گاورنر، برطرف می‌شوند را پایداری دینامیکی می‌نامند [۳۴].

در تقسیم بندی دوم، پدیده‌های یک شبکه قدرت را بسته به مدت زمانی که در شبکه باقی می‌مانند، به سه دسته می‌توان تقسیم‌بندی کرد. دسته اول دینامیک‌های کوتاه مدت که شامل پدیده‌هایی است که از صفر تا چند ثانیه در سیستم قدرت باقی می‌مانند. دسته دوم دینامیک بلند مدت می‌باشد. بررسی این دسته از پدیده‌ها به ویژه وقتی در تجهیزات نقصی وجود داشته باشد و یا بین سیستم‌های حفاظتی و کنترل هماهنگی درست برقرار نباشد و یا ذخیره‌های توان حقیقی و یا غیر حقیقی کم باشد، بسیار با اهمیت است.

دسته آخر دینامیک میان مدت که فاصله بین دینامیک کوتاه مدت و بلند مدت است. این دسته از پدیده‌ها معمولاً در فاصله زمانی چندین ثانیه تا چندین دقیقه درسیستم قدرت باقی می‌مانند [۳۴].

۳-۲-۱-۱- پایداری حالت ماندگار

پایداری حالت ماندگار به پایداری سیستم قدرت در اثر ایجاد تغییرات کوچک و پیوسته در بار و شرایط اولیه شبکه، و باقی ماندن پایداری سیستم با وجود سیستم‌های تحریک و گاورنرهای مرسوم، اشاره دارد. اگر در وضعیت خاصی خطوط انتقال تا نزدیکی حداکثر توان مجاز خود باردار شده باشند و در این شرایط بار به تدریج افزایش یابد، خطوط انتقال فراتر از محدوده مجاز خود باردار می‌شوند و کل سیستم و یا قسمتی از آن ناپایدار خواهد شد. این وضعیت به ناپایداری حالت ماندگار معروف است. در بررسی چنین پدیده‌ای معادلات حاکم جبری هستند و نیازی به استفاده از معادلات دیفرانسیل نیست [۳۴].

۳-۲-۱-۲- پایداری دینامیکی

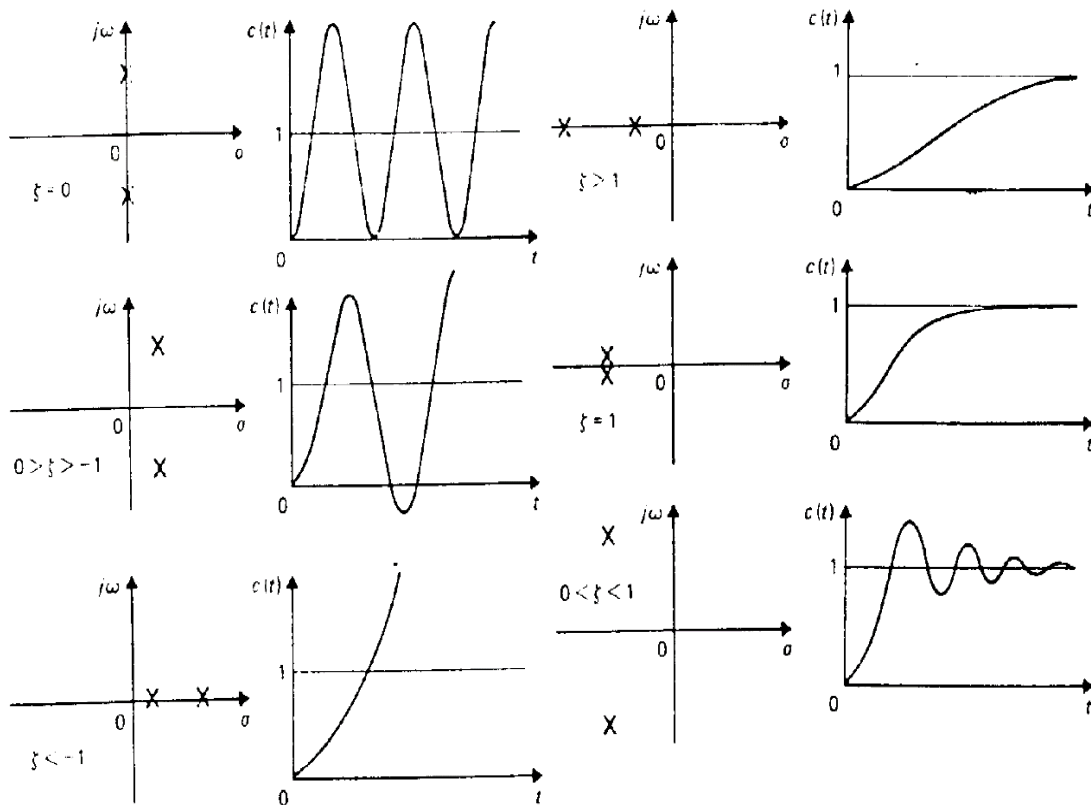
پایداری دینامیکی اشاره دارد به پایداری سیستم قدرت در برابر اغتشاشات ناگهانی ولی کوچک، سیستم قدرت را پایداری دینامیکی گویند، زمانی که شبکه پایداری خود را در مواجهه با چنین اغتشاشاتی به کمک کنترل کننده‌های پایدارساز خود حفظ کند. در بررسی پایداری سیستم‌های قدرت با توجه با اینکه دامنه اغتشاشات کوچک است سیستم خطی، با دقت خوب می‌تواند رفتار سیستم را نشان دهد. به طور کلی برای بررسی این پایداری در یک سیستم قدرت تک ماشینه و یا چند ماشینه باید درباره پایداری در سیستم‌های خطی بحث کرد. در تعریف پایداری یک سیستم خطی نامتغییر با زمان زمانی سیستم را پایدار گویند که تمام قطب‌های تابع تبدیل آن سیستم سمت چپ محور موهومی در صفحه اعداد مختلط باشند [۳۴].

برای بررسی پایداری دینامیکی یک سیستم قدرت خاص پس از خطی‌سازی و محاسبه ماتریس بردار حالت A، می‌توان با استفاده از قضایای مختلف پایداری سیستم خطی به بررسی پایداری دینامیکی سیستم

پرداخت. به طور خلاصه در مطالعات دینامیکی سیستم‌های قدرت، مراحل زیر طی می‌شود:

- (۱) برای یک سیستم خاص (تک ماشینه یا چند ماشینه)، یک مدل خطی انتخاب می‌شود.
- (۲) عوامل سیستم تعریف (محاسبه) می‌شود.
- (۳) نقطه کار مطلوب (که سیستم حول آن خطی می‌شود) انتخاب می‌شود.
- (۴) مدل خطی سیستم به صورت ماتریس‌های فضای حالت (A,B,C) بدست می‌آید.
- (۵) مقادیر ویژه ماتریس A محاسبه می‌شود.

چنانچه قسمت حقیقی تمام مقادیر ویژه منفی باشد، از پایداری دینامیکی آن سیستم قدرت خاص، در پیرامون آن نقطه کار مشخص، اطمینان حاصل می‌شود. در شکل (۱-۳) حالت‌های مختلف پایداری برای یک سیستم درجه دو با توجه به محل قطب‌های آن نمایش داده شده است. همچنین در این شکل پاسخ پله سیستم مرتبه دوم نیز نمایش داده شده است [۳۴].



شکل ۳-۱: نمایش پاسخ و پایداری سیستم به ازای شرایط مختلف قرار گیری محل قطب ها [۳۶]

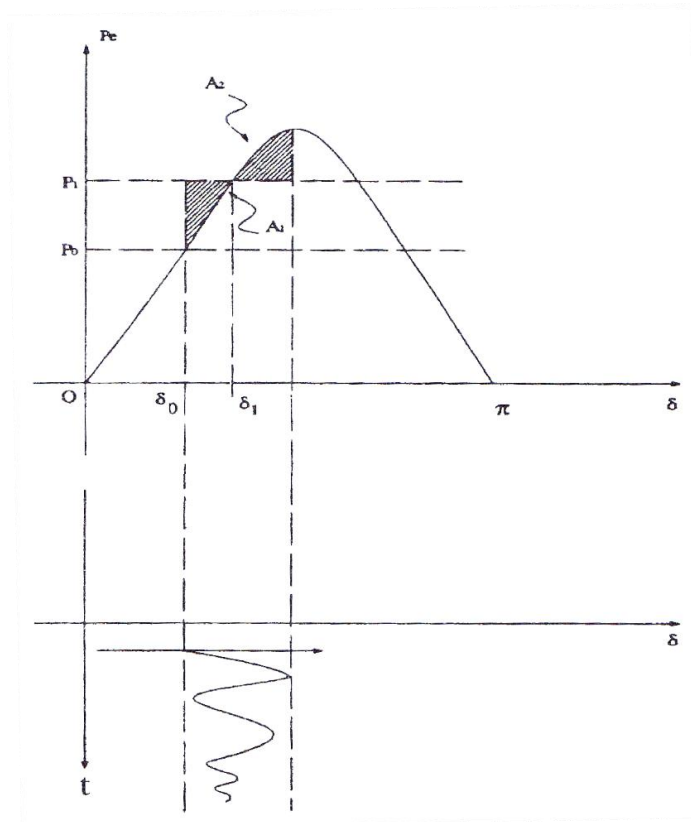
۳-۲-۱-۳- پایداری گذرا

پایداری گذرا اشاره دارد به پایداری سیستم قدرت در برابر حادث شدن یک اغتشاش ناگهانی بزرگ که ماورای توانایی یک کنترل کننده برای حفظ پایداری شبکه می باشد و ممکن است سیستم پایداری خود را در همان نوسانات اول از دست بدهد، مگر آنکه از ادوات کنترلی و یا روش های بهبود دهنده پایداری استفاده شود. یک سیستم موقعی در صورت اعمال خطا پایدار است که متغیرهای آن، وقتی که زمان به سمت بی نهایت میل می کند، به مقادیر حالت مانا نزدیک شوند. بررسی پایداری بعد از یک اغتشاش شدید مطالعات پایداری گذرا نامیده می شود. در یک اغتشاش بزرگ و ناگهانی، تغییرات بزرگی در سرعت و زاویه روتور ژنراتور به وجود می آید. اگر شدت و مدت اغتشاش خیلی بزرگ نباشند، پس از طی حالت گذرا و میرا شدن

نوسانات سیستم قدرت به نقطه تعادل پایدار جدیدی خواهد رسید و سیستم پایدار خواهد ماند. ولی اگر اغتشاش خیلی بزرگ باشد، رفتار سیستم واگرا شده و پایداری آن از دست خواهد رفت. پایداری سیستم در برابر اینگونه اغتشاشات، پایداری گذرا نامیده می‌شود.

تفاوت اصلی مدل مناسب برای بررسی پایداری گذرا با پایداری دینامیکی در این است که در پایداری دینامیکی، با فرض اینکه دامنه اغتشاش کوچک است، مدل مناسب خطی است و از تئوری‌های پایداری سیستم‌های خطی استفاده می‌شود در حالیکه در بررسی پایداری گذرا فرض بر این است که دامنه اغتشاش بزرگ است و قطعاً باید از مدل غیرخطی و همچنین تئوری پایداری در سیستم‌های غیرخطی استفاده کرد [۳۴].

یکی از روش‌های مهم در بحث پایداری گذرا، معیار برابری سطوح می‌باشد. اساس این روش استفاده از شکل (۲-۳) که نشان‌دهنده رابطه زاویه بار و توان است، می‌باشد. بواسطه اعمال یک اغتشاش پر دامنه در سیستم قدرت، مقدار توان مکانیکی اعمالی توربین از P_0 به P_1 افزایش پیدا کرده و متعاقباً نقطه کار نیز از δ_0 به δ_1 منتقل می‌شود. در معیار برابری سطوح، اگر A_2 با A_1 برابر باشد، سیستم پایدار گذرا است [۳۴].



شکل ۳-۲: بررسی اثر اغتشاش پله در معیار مساحت های مساوی [۳۴]

۳-۳- روش های عمده مورد استفاده جهت حفظ پایداری

پایداری سیستم قدرت می تواند با توانایی ژنراتورهای سنکرون شبکه در باقی ماندن در شرایط سنکرون با یکدیگر تعریف شود. توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرونیزم در صورت بروز اختلال احتمالی مانند خطاهای خط، قطعی خطوط و ژنراتور و تعویض بار و غیره، توسط پایداری آن سیستم مشخص می شود. با توجه به اندازه و نوع اغتشاش، پایداری سیستم قدرت را می توان به سه دسته پایداری حالت ماندگار، پایداری دینامیکی و پایداری گذرا طبقه بندی کرد [۳۴].

پس از عدم تعادل در سیستم، آن سیستم قدرت ممکن است نوسانات پایداری پذیر را تجربه کند. این نوسانات ممکن است بصورت محلی به یک ژنراتور و یا به تعدادی از ژنراتورها که از نظر جغرافیایی به طور

گسترده‌ای از هم قرار دارند، اعمال شود. دسته اول نوسانات یاد شده را نوسانات محلی و دسته دوم را نوسانات بین ناحیه‌ای

می‌نامند. به عنوان مثال، نوسانات محلی ممکن است زمانی که یک سیستم تحریک سریع در ژنراتور استفاده شود، اتفاق بیافتد. همچنین نوسانات بین ناحیه‌ای می‌تواند زمانی که بارگذاری سیستم در سراسر یک خط انتقال ضعیف افزایش می‌یابد، ظاهر شود. اگر این نوسانات کنترل نشوند، ممکن است منجر به قطعی بخشی از شبکه و یا حتی خاموشی کامل شوند.

کاهش نوسانات نه تنها در افزایش توان انتقالی شبکه، بلکه برای ثبات شرایط سیستم قدرت پس از بروز خطاهای شدید، بسیار مهم می‌باشد. به منظور جلوگیری از این امر، باید برای سیستم پایداری اضافی فراهم شود. میرایی قدرتمند در سیستم دارای یک مزیت دوگانه است: کاهش دامنه نوسان اول و کاهش هر نوسان پی‌درپی نسبت به نوسان قبلی، به این ترتیب موجب بهبود کلی حاشیه پایداری سیستم می‌شود [۱]. روش‌های عمده مورد استفاده جهت کاهش نوسانات در سیستم برق عبارتند از:

۱. **کنترل گاورنر:** کنترل قدرت ورودی P_m (توان مکانیکی) می‌تواند یک سیستم قدرت را پس از

ایجاد اغتشاش پایدار سازد. اگر چه کنترل گاورنر نتایج خوبی در کنترل میرایی نشان داده است، اما استفاده آن بطور کامل، برای میرایی شبکه برق قدرت پذیرفته شده نیست.

۲. **کنترل سیستم تحریک:** در میان روش‌های مختلف میرایی سیستم قدرت، کنترل سیستم

تحریک به عنوان یکی از رایج‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها مطرح می‌باشد. کنترل کننده‌های

سیستم تحریک به عنوان تثبیت کننده‌های سیستم قدرت (PSS) نامیده می‌شوند. این دست کنترل

کننده‌ها با تنظیم ولتاژ خروجی ژنراتور بسته به پاسخ دینامیکی سیستم، پایداری سیستم قدرت را

افزایش می‌دهند.

۳. **مقاومت ترمزی ۱:** مقاومت ترمزی با جذب سریع توان حقیقی از ناپایداری گذرا جلوگیری می‌کند. این دست از کنترل‌کننده‌ها معمولاً در میرایی اولین نوسان سیستم قدرت موثر عمل می‌کنند.
۴. **کنترل زاویه بار:** توان الکتریکی خروجی P_e همچنین می‌تواند با تغییر زاویه بار تغییر کند. تنظیم‌کننده‌های زاویه بار برای انجام این کار می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. از جمله این تنظیم‌کننده‌ها می‌توان از ادوات فکت موازی نام برد.
۵. **بار زدایی:** در هنگام افزایش توان درخواستی الکتریکی نسبت به توان تولیدی، این گزینه نیز معمولاً به عنوان آخرین گزینه برای حفظ پایداری مد نظر است.
۶. **کنترل راکتانس خط انتقال:** یکی دیگر از روش‌های تنظیم توان الکتریکی خروجی P_e کنترل راکتانس خط انتقال می‌باشد. بطور عمده جبران‌کننده‌های سری در سیستم‌های انتقال ضعیف برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

فصل چہارم

کنترل مقاوم

۴-۱- مقدمه

قوام^۱ یکی از اساسی‌ترین موضوعات طراحی در یک سیستم کنترلی است. زیرا سیستم‌های کنترلی در عمل علاوه بر آنکه در معرض اغتشاش‌های خارجی و نویز اندازه‌گیری هستند، بر اساس مدل‌های ریاضی طراحی می‌شوند که با سیستم واقعی اختلاف دارند. عموماً یک مهندس کنترل باید کنترل‌کننده‌ای طراحی نماید که ضمن پایدارسازی سیستم، سطحی از کارایی را در حضور اغتشاش سیگنال‌ها، تداخلات نویزها، دینامیک‌های مدل نشده سیستم و تغییرات پارامترهای سیستم فراهم آورد. این اهداف چندگانه طراحی به بهترین نحو از طریق ساختار پسخورد^۲ در سیستم کنترل حاصل می‌گردد [۳۷].

در سیستم‌های کلاسیک تک ورودی-تک خروجی (SISO)، مقاوم بودن از طریق حاشیه فاز و حاشیه بهره تامین می‌گردد، که این امر تا حدی کارایی مطلوب را تضمین می‌نماید. اما با توسعه سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی (MIMO) در دهه ۱۹۶۰، روش‌های ارائه شده به منظور دستیابی به کارایی مطلوب، مقاوم بودن سیستم را تضمین نمی‌کرد. در آن سال‌ها عموماً این روش‌های چند متغیره بر مبنای معیار کارایی مرتبه دوم و اغتشاشات گوسی بنا شده بود و کاربرد آنها در سیستم‌های که دارای مدل ریاضی دقیقی هستند و نویزها و اغتشاشات آنها بر مبنای نویز سفید قابل بیان می‌باشند، به اثبات رسیده است [۳۷].

به هر حال کاربرد چنین روش‌هایی که عموماً LQG خوانده می‌شوند در برخی مسائل صنعتی موفق‌آمیز نبوده و از لحاظ قوام، نتایج ضعیفی را در برداشته‌اند. این امر منجر به تحقیقات گسترده‌ای به منظور توسعه نظری روش‌های طراحی کنترل‌کننده گشت تا بتوان نیاز به قوام را در طراحی سیستم کنترلی لحاظ نمود. جدول (۴-۱) به اختصار تاریخچه توسعه روش‌های طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم را بیان می‌دارد [۳۸].

1- Robustness

2- Feedback

جدول ۴-۱: تاریخچه توسعه کنترل مقاوم [۳۷]

سال	توسعه دهنده	حوزه فعالیت
۱۹۳۲	نایکوئیست (Nyquist)	یافتن ویژگی پایداری در سیستم فیدبک از طریق پاسخ منفی
۱۹۴۰	بودی (Bode)	توسعه ویژگی پایداری در سیستم فیدبک از طریق پاسخ منفی با مفاهیم دامنه و فاز
۱۹۵۹	هرویتز (Horowitz)	معرفی تئوری کنترل پاسخ منفی (Quantitative Feedback Theory) در سیستم‌های دارای نامعینی از طریق توسعه کار بودی در سیستم‌های تک ورودی و تک خروجی
۱۹۶۰	کالمن (Kalman) وینر (Wiener)	شروع و توسعه استفاده از روش‌های فضای حالت در فرآیندهای اتفاقی و بهینه‌سازی H_2 که اصطلاحاً LQG نامیده می‌شود.
۱۹۸۱	زیمس (Zames)	معرفی روش H_∞ و استفاده از مفاهیم فرکانسی برای بیان نامعینی با اینکه مدل فضای حالت در آن سال‌ها در صدر تحقیقات قرار داشته است.
۱۹۸۴	دویل (Doyle)	استفاده از مفاهیم فرکانسی ارائه شده توسط زیمس و توسعه روش‌های مبتنی بر فضای حالت برای حل مسئله بهینه‌سازی
۱۹۸۹	دویل، گلاور (Glover) کارگونکار (Kharagonkar) فرانسیس (Francis)	ارائه روش حل H_∞ از طریق روش تساوی‌های جبری ریکاتی (Algebraic Riccati Equations)
۱۹۹۲	مک‌فارلن (McFarlane) گلاور (Glover)	ارائه روش شکل‌دهی حلقه (Loop Shaping)
۱۹۹۲	دویل (Doyle)	ارائه روش مقادیر تکین ساختاریافته (μ) به منظور حل مسئله کارایی مقاوم
۱۹۹۴	آپکاریان (Apkarian) گاهینت (Gahinet) ایوازکی (Iwasaki) اسکلتون (Skelton)	ارائه روش LMI که انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به تساوی‌های ریکاتی دارد و پیچیدگی محاسبات آن در سطح راه‌حل‌های ریکاتی است.

۴-۲- مفهوم کنترل مقاوم

طراحی مقاوم در اصطلاح به روش‌های طراحی کنترل‌کننده‌ای اطلاق می‌شود که در فرآیند طراحی، اطلاعات مربوط به نامعینی در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته باشد، تا اطمینان حاصل شود که ویژگی پایداری مقاوم یا کارایی مقاوم در آن بدست آید. به کنترل‌کننده‌هایی که به این صورت طراحی می‌شوند در اصطلاح کنترل‌کننده مقاوم گفته می‌شود. این بدان معنی نیست که سایر کنترل‌کننده‌هایی که به وفور در صنعت استفاده می‌شوند و خصوصیت قوام را در عمل از خود نشان می‌دهند، مقاوم نیستند. اما در ادبیات کنترل اگر در طراحی این کنترل‌کننده‌ها از اطلاعات مربوط به نامعینی در مدل‌سازی بهره‌برداری نشود، آنها را جزء کنترل‌کننده‌های مقاوم دسته‌بندی نمی‌کنند [۳۷]. رویکردهای مختلفی برای طراحی کنترل‌کننده مقاوم وجود دارد، که از جمله آنها، می‌توان به رویکردهای نرم بی‌نهایت (H_∞)، نرم دو (H_2)، ترکیب نرم‌های دو و بی‌نهایت ($Mix H_\infty/H_2$)، و سنتز μ اشاره نمود.

۴-۳- مدل‌سازی مسائل مقاوم

۴-۳-۱- مدل‌سازی سیستم‌های نامی

مدل نامی غیرخطی یک سیستم به منظور ارتباط دینامیکی بین بردار حالت $x(t)$ ، بردار خروجی $y(t)$ ، سیگنال ورودی $u(t)$ و متغیر زمان t در حالت کلی به شکل زیر تعبیر می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u, t) \\ y(t) = g(x, u, t) \end{cases} \quad (۱-۴)$$

با خطی‌سازی این معادلات حول نقطه تعادل، دو نمایش متداول در مسائل کنترل حاصل می‌شود. مدل

فضای حالت که در حوزه زمان بکار می‌رود، عبارت است از:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2-4)$$

و مدل تابع تبدیل که در حوزه فرکانسی کاربرد دارد، برابر است با:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (3-4)$$

۴-۳-۲- تعریف ریاضی نامعینی

اصطلاح نامعینی^۱ به اختلاف بین مدل نامی و مدل واقعی اطلاق می‌گردد و به دو دسته نامعینی ساختاریافته^۲ و نامعینی بدون ساختار^۳ طبقه‌بندی می‌گردد [۳۸].

۴-۳-۱- نامعینی ساختاریافته

در صورتی که ساختار یک مدل مشخص باشد (شامل مرتبه مدل) اما تعدادی از پارامترها دقیقاً مشخص نباشند ولی مشخصات آماری و ساختار آنها معین باشد، آنگاه نامعینی‌هایی در سیستم رخ می‌دهد که اصطلاحاً به آنها "نامعینی پارامتریک"^۴ یا "نامعینی ساختار یافته" می‌گویند. با توجه به مشخصات آماری این نامعینی‌ها که معمولاً در فرکانس‌های پایین یک سیستم ظاهر می‌شوند تغییرات این پارامترها در بازه $[a_{\min} \quad a_{\max}]$ فرض می‌شود و به شکل زیر مدل می‌گردد:

$$a_p = \bar{a}(1 + r_a \delta_p) \quad (4-4)$$

که در آن \bar{a} مقدار میانگین پارامتر نامعینی‌دار و r_a بزرگی نسبی بهره‌ی نامعینی می‌باشد که برابر است

با:

-
- 1- Uncertainty
 - 2- Structured
 - 3- Unstructured
 - 4- Parametric Uncertainty

$$\bar{a} = \frac{a_{\max} + a_{\min}}{2} \quad r_a = \frac{(a_{\max} - a_{\min})}{(a_{\max} + a_{\min})} \quad (5-4)$$

در رابطه (4-4) δ_p (p مخفف عبارت Parametric) یک مقدار حقیقی تصادفی بین $[-1, 1]$ است: اگر در سیستمی چندین پارامتر با نامعینی ساختاریافته وجود داشته باشد آنگاه متناسباً لازم است چندین متغیر استفاده شود تا نامعینی را تعبیر نماید. در این حالت می‌توان از ماتریس قطری δ که عناصر روی قطر آنرا δ_p ها تشکیل می‌دهند، می‌توان استفاده نمود [37].

۴-۳-۲- نامعینی بدون ساختار

تعداد زیادی از نامعینی‌ها معمولاً به دلایل اختلال دینامیکی، مانند دینامیک مدل نشده یا دینامیک‌های فرکانس بالا، در بخش‌های مختلف یک سیستم ظاهر می‌شوند. این اختلال دینامیکی مدل نشده معمولاً با یکدیگر جمع شده و با بلوک Δ_I (I مخفف عبارت Input) در قالب یک تابع تبدیل نامعین نشان داده می‌شوند. به این نامعینی‌ها اصطلاحاً نامعینی‌های بدون ساختار می‌گویند. این نوع از نامعینی‌ها معمولاً بصورت نرمالیزه شده و مختلط $\|\Delta_I\| \leq 1$ در نظر گرفته می‌شوند [38]. این دسته از نامعینی شامل دو نوع نامعینی بدون ساختار جمع پذیر و بدون ساختار ضربی یا دیسکی می‌باشد که در ادامه هر یک را توضیح خواهیم داد.

الف) نامعینی بدون ساختار جمع پذیر

یکی از انواع نامعینی بدون ساختار نرمالیزه شده اختلال جمع پذیر است که به صورت شکل (4-1) نمایش داده می‌شود. رابطه این نوع نامعینی در معادله (4-6) آورده شده است. که در آن نماد $G_p(s)$ بیانگر مجموعه‌ای از مدل‌های سیستم دارای اختلال و نماد $G_o(s)$ نماد مدل نامی سیستم بدون اختلال است [37].

(۶-۴)

$$G_p(s) = G_o(s) + \Delta(s)$$

(ب) نامعینی بدون ساختار ضربی یا دیسکی

یکی از مهم‌ترین نامعینی بدون ساختار، اختلال ضربی^۱ یا دیسکی^۲ است. به منظور معرفی این اختلال تابع تبدیل سیستم نامی را G_0 و تابع تبدیل سیستم اختلال یافته را G_p فرض نمائید [۳۹]. همانطور که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است از نظر ریاضی خواهیم داشت:

$$G_p = (1 + \Delta W)G_0 \quad (۷-۴)$$

در این رابطه تابع وزنی W یک تابع تبدیل پایدار ثابت است که برای نرمالیزه نمودن Δ بکار می‌رود. Δ یک تابع تبدیل پایدار نامعین است که نرم بی‌نهایت آن همواره کمتر از ۱ می‌باشد ($\|\Delta\|_\infty < 1$). همچنین فرض می‌شود هیچ قطب ناپایداری از G_0 با این تعبیر از G_p حذف نشده است. ایده نهفته در این مدل از نامعینی آن است که ΔW برابر با هر گونه اختلال سیستم نرمالیزه شده نسبت به عدد یک است. پس در سیستم‌های تک متغیره خواهیم داشت:

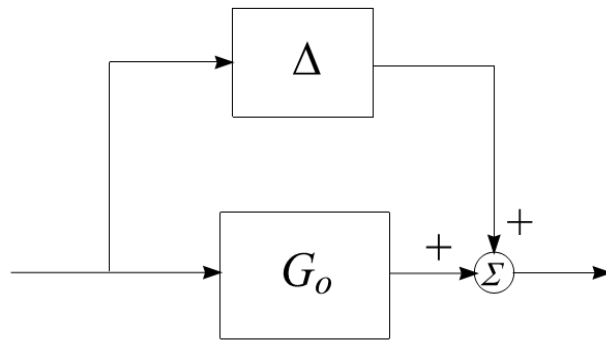
$$\frac{G_p}{G_0} - 1 = \Delta W \quad (۸-۴)$$

لذا اگر $\|\Delta\|_\infty < 1$ آنگاه:

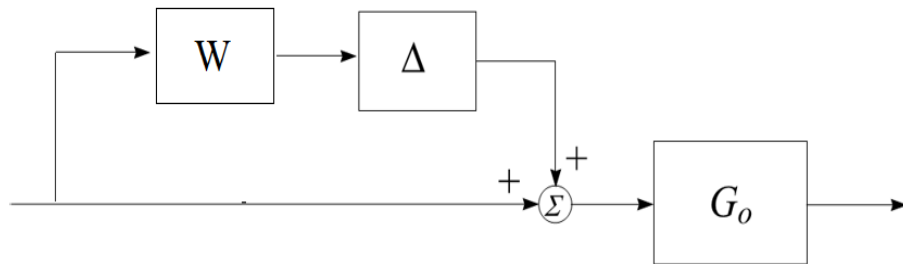
$$\left| \frac{G_p(j\omega)}{G_0(j\omega)} - 1 \right| < |W_2(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (۹-۴)$$

1- Multiplicative Perturbation

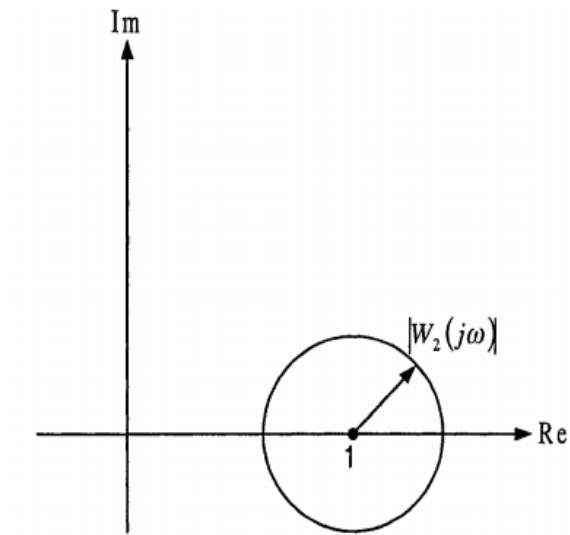
2- Disk Type



شکل ۴-۱: اختلال جمع پذیر



شکل ۴-۲: اختلال ضربی یا دیسکی



شکل ۴-۳: عدم قطعیت ضربی در صفحه مختلط [۳۹]

این نامساوی یک دیسک را در صفحه مختلط توصیف می‌کند: در هر فرکانس، نقطه $\frac{G_p}{G_0}$ در دیسکی با

مرکز ۱ و شعاع $|W|$ قرار دارد. در عمل تابع W یک تابع افزایشی است زیرا معمولاً نامعینی در سیستم‌های عملی با زیاد فرکانس، افزایش می‌یابد. دلیل استفاده از Δ نیز تعیین فاز نامعینی و استفاده از آن به‌عنوان یک ضریب ترازکننده بر روی دامنه اختلال است که بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند.

۴-۳-۲-۳- مزایا و معایب نامعینی ضربی

علی‌رغم اینکه نامعینی ضربی عمومی‌ترین فرم تعبیر نامعینی بدون ساختار است، ممکن است برای همه کاربردها مناسب نبوده و قدری محافظه‌کاری را افزایش دهد. در چنین مواردی کنترل‌کننده طراحی شده برای مدل نامعینی ضربی نیز احتمالاً بیشتر محافظه‌کارانه می‌گردد و شاید دسترسی به کارایی خاصی در این شرایط نسبت به دیگر تخمین‌های قابل‌تصور، با محدودیت روبرو گردد [۳۷].

۴-۳-۲-۴- شکل کلی نامعینی

می‌توان تمامی نامعینی‌های ساختاریافته و بدون ساختار را از دینامیک سیستم جدا نموده و با ماتریس Δ (بلوک Δ) به شکل ساختاریافته زیر نمایش داد [۳۸]:

$$\Delta = \text{diag}[\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_s I_{r_s}, \Delta_1, \dots, \Delta_f] \text{ that } \delta_i \in C, \Delta_j \in C^{m_j \times m_j} \quad (10-4)$$

در این نمایش هر دو نوع نامعینی عضو مجموعه اعداد مختلط در نظر گرفته شده‌اند. عناصر قطری δ_i نامعینی‌های پارامتریک را شامل می‌شوند که برای عمومیت بیشتر در مجموعه اعداد مختلط در نظر گرفته شده‌اند. همچنین بلوک‌های نامعینی Δ_j بلوک‌های کاملی هستند که می‌توانند مربعی نباشند و نامعینی‌های بدون ساختار را شامل شوند. حال چنانچه این رابطه بصورت گسترده نوشته شود، داریم:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 \end{bmatrix}_{1 \times 1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \begin{bmatrix} \delta_s & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \delta_s \end{bmatrix}_{r_s \times r_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta_I = [non\ diagonal]_{m_1 \times m_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta_f = [non\ diagonal]_{m_f \times m_f} \end{bmatrix}$$

در این رابطه ابعاد بلوکی نهایی Δ برابر با n است که $\sum_{i=1}^s r_i + \sum_{j=1}^f m_j = n$. همچنین تمامی ماتریس‌های نامعینی با فرمت Δ ، عضو مجموعه Δ هستند و تمامی ماتریس‌های نامعینی با فرمت Δ که نرمالیزه شده باشند عضو مجموعه B_Δ می‌باشند.

$$B_\Delta = \{\Delta : \bar{\sigma}(\Delta) \leq 1, \Delta \in \Delta\} \quad (11-4)$$

بدیهی که مجموعه B_Δ زیر مجموعه Δ است که بلوک‌های Δ عضوهای آن می‌باشند.

۴-۳-۳- پایداری مقاوم

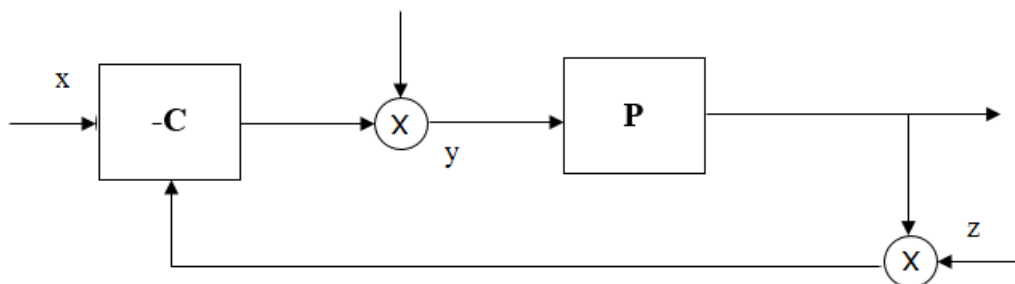
یک سیستم کنترل چند ورودی را در شکل (۴-۴) در نظر بگیرید. فرض کنید که P متعلق به مجموعه P است.

کنترل کننده C پایداری مقاوم را تامین می‌کند اگر پایداری داخلی را برای هر سیستم در مجموعه نامعین P تامین نماید. L نشانگر تابع تبدیل حلقه باز (یعنی $L=PC$) و S نشانگر تابع حساسیت یا خطا برای تابع تبدیل مرجع است که توسط رابطه زیر تعریف شده است:

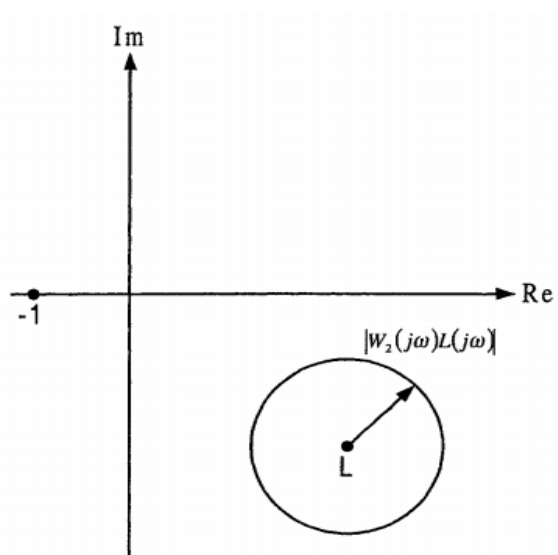
$$S = \frac{1}{1+L} \quad (12-4)$$

سپس تابع مکمل حساسیت یا تابع تبدیل خروجی به ورودی مرجع توسط رابطه زیر نشان داده شده است.

$$T = 1 - S = \frac{L}{1+L} = \frac{PC}{1+PC} \quad (۴-۱۳)$$



شکل ۴-۴: سیستم فیدبک واحد با کنترلر [۴۰]



شکل ۴-۵: شرط پایداری مقاوم در صفحه مختلط [۴۰]

علاوه بر این، برای یک مدل نامعینی ضربی، شرط پایداری مقاوم این است که اگر و تنها اگر $\|W_2 T\| \leq 1$

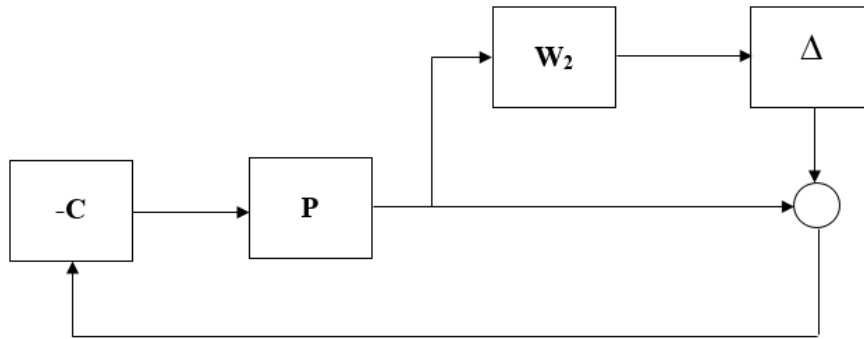
بیان گرافیکی این شرط در شکل (۴-۵) صفحه قبل، نشان داده شده است. از این رو شرط پایداری ممکن است به صورت زیر تعریف شود:

$$\|W_2 T\|_{\infty} \leq 1 \Leftrightarrow \left| \frac{W_2(j\omega)L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| < 1, \quad \text{for all } \omega \quad (۱۴-)$$

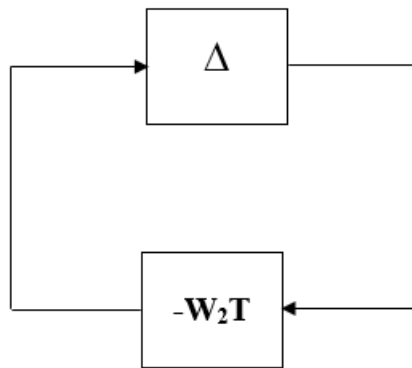
$$\Leftrightarrow |W_2(j\omega)L(j\omega)| < |1+L(j\omega)|, \quad \text{for all } \omega \quad (۴)$$

$$\Leftrightarrow |\Delta(j\omega)W_2(j\omega)L(j\omega)| < |1+L(j\omega)|, \quad \text{for all } \omega, \quad \|\Delta\|_{\infty} \leq 1$$

بنابراین نقطه بحرانی ۱-، در خارج از دیسک در مرکز $L(j\omega)$ و شعاع $|W_2(j\omega)L(j\omega)|$ قرار دارد. ارتباط شرط $\|W_2 T\|_{\infty} \leq 1$ را می توان در ارتباط آن با قضیه بهره کوچک بدست آورد، که بیان می کند که سیستم پسخورد در ابتدا پایدار است اگر تمام توابع تبدیل (یعنی سیستم P ، کنترل کننده C و بهره پسخورد F) پایدار باشند و $\|PCF\| \leq 1$. بلوک دیاگرام یک سیستم نامعین که همه ورودی ها را نادیده می گیرد که در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. تابع تبدیل از خروجی Δ به ورودی Δ معادل $W_2 T$ است. تنظیمات بلوک دیاگرام می تواند به پیکربندی داده شده در شکل (۴-۷) کاهش یابد. حداکثر بهره حلقه $\|-\Delta W_2 T\|_{\infty}$ می باشد که برای همه Δ های مجاز کمتر از ۱ است اگر و تنها اگر شرایط بهره کوچک $\|W_2 T\|_{\infty} \leq 1$ برقرار باشد [۴۰].



شکل ۴-۶: سیستم فیدبک مختل شده [۴۰]



شکل ۴-۷: بلوک دیاگرام کاهش یافته [۴۰]

۴-۳-۴- کارایی مقاوم

یک سیستم کارایی مقاوم دارد اگر پایداری داخلی مقاوم داشته باشد و اهداف کارایی برای کلیه مدل‌های نامعین P تامین گردد. شرط پایداری مقاوم برای یک سیستم پسخورد نامی، پایدار داخلی $\|W_2 T\|_\infty \leq 1$ می‌باشد، و شرط کارایی نامی $\|W_1 S\|_\infty \leq 1$ است که W_1 یک تابع تبدیل حقیقی گویا، پایدار، مینیمم فاز (همچنین به عنوان تابع وزن نامیده می‌شود) است به طوری که [۴۰]:

$$\|W_1 S\|_\infty \leq 1 \Leftrightarrow \left| \frac{W_1(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| < 1, \quad \text{for all } \omega \quad (15-4)$$

$$\Leftrightarrow |W_1(j\omega)| < |1+L(j\omega)|, \quad \text{for all } \omega$$

با فرض $\hat{P} = [1 + \Delta W_2]P$ ، تابع حساسیت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\hat{S} = \frac{1}{1 + \hat{P}C} = \frac{1}{1 + (1 + \Delta W_2)PC} = \frac{1}{1 + (1 + \Delta W_2)L} = \frac{S}{1 + \Delta W_2 T} \quad (16-4)$$

بنابراین، شرط کارایی مقاوم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\|W_2 T\|_\infty \leq 1 \quad \text{and} \quad \left\| \frac{W_1 S}{1 + \Delta W_2 T} \right\|_\infty \leq 1, \quad \text{for all allowable } \Delta \quad (17-4)$$

از آنجا که $\|\Delta\| \leq 1$ ، سپس $|\Delta W_2 T| \leq |W_2 T|$. بدین ترتیب $|1 + \Delta W_2 T| \geq 1 - |W_2 T|$ برای

یک فرکانس ثابت، به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\left\| \frac{W_1 S}{1 + \Delta W_2 T} \right\|_\infty \leq \left\| \frac{W_1 S}{1 - |W_2 T|} \right\|_\infty \leq 1 \quad (18-4)$$

از این رو معادله (17-4) می‌تواند به عنوان یک شرط لازم و کافی برای کارایی مقاوم بازنویسی شود:

$$\| |W_1 S| + |W_2 T| \|_\infty \leq 1 \quad (19-4)$$

که یک قید قوی‌تر نسبت به کارایی نامی یا شرط پایداری مقاوم می‌باشد. بیان گرافیکی این شرایط در

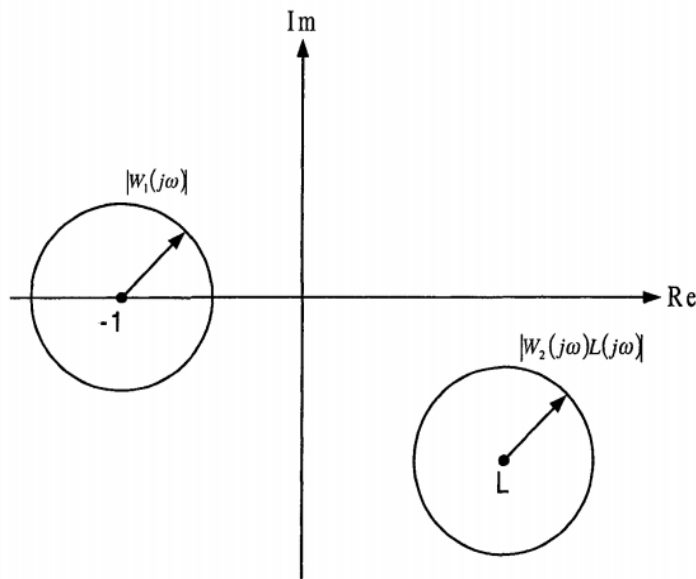
شکل (18-4) نشان داده شده است.

به موجب آن:

$$\begin{aligned} \| |W_1 S| + |W_2 T| \|_{\infty} \leq 1 &\Leftrightarrow \left\| \frac{W_1}{1+L} + \frac{W_2 L}{1+L} \right\| \leq 1, \quad \text{for all } \omega & (20-4) \\ &\Leftrightarrow |W_1| + |W_2 L| \leq 1 + L, \quad \text{for all } \omega \end{aligned}$$

در هر فرکانس دو دیسک بسته وجود دارد، یک دیسک با مرکز -1 ، شعاع $|W_1(j\omega)|$ و دیگری به مرکز $L(j\omega)$ ، شعاع $|W_2(j\omega)L(j\omega)|$. شرایط داده شده توسط معادله (۱۹-۴) برقرار است اگر و فقط اگر دو دیسک هیچ تقاطع غیرقطعی نداشته باشند. (به عنوان مثال آنها می‌توانند به هم برسند، اما آنها نمی‌توانند با هم تداخل (هم‌پوشانی) داشته باشند). لازم به ذکر است که شرایط رسیدن به کارایی نامی و پایداری مقاوم به طور همزمان، از رابطه زیر به دست می‌آید [۴۰]:

$$\| \max(|W_1 S|, |W_2 T|) \|_{\infty} \leq 1 \quad (21-4)$$



شکل ۴-۸: شرط کارایی مقاوم در صفحه مختلط [۴۰]

و شرایط کارایی مقاوم با معادله (۱۹-۴) مورد آزمایش قرار می‌گیرد. سپس این شرایط در معادله (۴-۴)

(۱۹) و (۴-۲۱) تنها در ضریب دو تفاوت دارند. به عبارت دیگر:

$$\| \max(|W_1 S|, |W_2 T|) \|_{\infty} \leq \| |W_1 S| + |W_2 T| \|_{\infty} \leq 2 \| \max(|W_1 S|, |W_2 T|) \|_{\infty} \quad (۲۲-۴)$$

۴-۴- مقدار تکین ساختار یافته^۱

مقدار تکین ساختار یافته μ در تحلیل پایداری و عملکرد یک سیستم کنترل مقاوم بسیار کاربرد دارد. این مقدار، نشان‌دهنده میزان پایداری مقاوم سیستم دارای نامعینی می‌باشد. مقدار تکین ساختار یافته که با نماد $\mu_{\Delta}(M)$ نشان داده می‌شود، برای ماتریس M نسبت به نامعینی ماتریسی Δ تعریف می‌گردد [۳۷]. دو تعریف هم ارز آن عبارتند از [۳۷]:

تعریف اول: طبق تعریف، مقدار تکین ساختار یافته ماتریس M نسبت به ماتریس Δ که با $\mu_{\Delta}(M)$ نشان داده می‌شود، از برابری معکوس $\mu_{\Delta}(M)$ یا همان $\mu_{\Delta}^{-1}(M)$ با کوچکترین مقدار ممکن از بزرگترین مقدار تکین ماتریس Δ یا همان $\bar{\sigma}(\Delta)$ به دست می‌آید، به شرطی که دترمینان $(I - M\Delta)$ برابر با صفر گردد. از نظر ریاضی این تعبیر معادل است با [۳۷]:

$$\mu_{\Delta}^{-1}(M) = \min(\bar{\sigma}(\Delta)) \quad \text{if } \det(I - M\Delta) = 0 \quad (۲۳-۴)$$

اگر هیچ مقداری این شرط را محقق نکند، آنگاه $\mu_{\Delta}(M) = 0$ خواهد شد.

تعریف دوم: مقدار تکین ساختار یافته ماتریس M نسبت به ماتریس Δ که با $\mu_{\Delta}(M)$ نشان داده می‌شود برابر با معکوس کمترین مقدار از بزرگترین مقدار تکین ماتریس Δ است، به شرط آنکه رابطه $\det(I - M\Delta) = 0$ را برآورده سازد. اگر هیچ مقداری این شرط را ارضا نکند، آنگاه $\mu_{\Delta}(M) = 0$ خواهد شد.

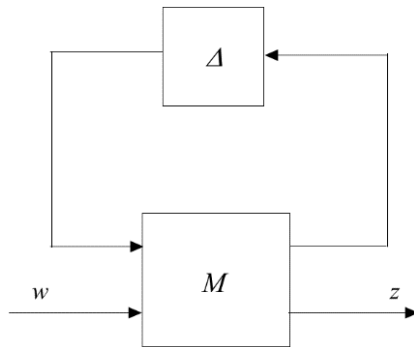
1- Structured Singular Value

$$\mu_{\Delta}(M) = \frac{1}{\min(\bar{\sigma}(\Delta), \text{if } \det(I - M\Delta) = 0)} \quad (24-4)$$

می‌توان تعریف فوق را به ماتریس توابع تبدیل بسط داد. چنانچه M ماتریس توابع تبدیل باشد، آنگاه مقدار تکین ساختار یافته ماتریس توابع تبدیل M که با $\mu_{\Delta}(M)$ نمایش داده می‌شود برابر خواهد بود با [37]:

$$\mu_{\Delta}(M(s)) = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \mu_{\Delta}(M(j\omega)) \quad (25-4)$$

ذکر این نکته در تعریف مقدار تکین ساختار یافته مهم است که چرا بایستی $\det(I - M\Delta) = 0$ در این تعریف لحاظ گردد. با توجه به نمایش استاندارد $M - \Delta$ که در شکل (4-9) مشاهده می‌شود، در صورتی که نامعینی به صورت LFT از بخش معین سیستم جدا شده باشد، در این صورت همواره دو رابطه $u = Mv$ و $v = \Delta u$ برقرار می‌باشد. بدین ترتیب خواهیم داشت:



شکل 4-9: نمایش استاندارد $M - \Delta$

$$u = M\Delta u \rightarrow u(I - M\Delta) = 0 \quad (26-4)$$

لذا چنانچه $|I - M\Delta| \neq 0$ باشد، آنگاه تنها u و v هایی که معادله فوق را برآورده می‌سازند، جواب بدیهی آن‌ها یعنی $u = v = 0$ است. این بدان معنی است که ارتباط بین بخش معین سیستم با بخش نامعین قطع شده است. بنابراین لازم است حتماً $|I - M\Delta| = 0$ باشد تا جواب‌های غیربدیهی برای u و v به دست آید.

بدین ترتیب با توجه به نامعین بودن Δ ، تعداد نامحدودی پاسخ برای تساوی بالا وجود خواهد داشت که در آن‌ها u و v مخالف صفر هستند و نرم آن‌ها در مواقعی ممکن است بسیار بزرگ شود که به نوعی ناپایداری را نشان می‌دهد [۳۷].

۴-۵- روش کنترل مقاوم سنتز μ ^۱

به منظور دستیابی به پایداری و عملکرد مقاوم به صورت توأم، می‌توان از روش‌های طراحی مبتنی بر مقدار تکین ساختار یافته μ بهره جست. مقدار تکین ساختار یافته که با μ نشان داده می‌شود، ابزار بسیار قدرتمندی به منظور تجزیه و تحلیل کارایی مقاوم یک سیستم کنترل طراحی شده است. به گونه‌ای که معیار پایداری و کارایی نامی و مقاوم بر مبنای آن توسعه یافته است. با استفاده از مقدار تکین ساختار یافته μ ، علاوه بر تحلیل کارایی مقاوم، می‌توان کنترل‌کننده بهینه مقاومی را طراحی کرد که ضمن تحقق معیار-های پایداری و کارایی مقاوم، این معیارها را نیز به صورت همزمان کمینه نماید. در ادبیات کنترل مقاوم، چنین حل بهینه‌ای با عنوان سنتز μ شناخته می‌شود. متأسفانه تاکنون روش‌های تحلیلی برای کمینه سازی معیارهای بر مبنای μ ارائه نشده است و معمولاً از روش‌های عددی مبادرت به کمینه سازی زیربهینه^۲ می‌شود [۳۸].

1- μ Robust Control

2- Sub-Optimal Minimization

مقدار تکین ساختار یافته ماتریس N نسبت به بلوک نامعینی Δ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\Delta}^{-1}(N) = \min_{\Delta \in \mathcal{A}} \{ \bar{\sigma}(\Delta), \text{if } \det(I - N\Delta) = 0 \} \quad (27-4)$$

متأسفانه مقدار تکین ساختار یافته، خصوصیات نرم را محقق ننموده و محاسبه آن به صورت تحلیلی ممکن نمی‌باشد. لذا عملاً به جای محاسبه دقیق مقدار تکین ساختار یافته، از کران بالا و پایین آن که در رابطه (۲۸-۴) بیان شده است، استفاده می‌گردد [۳۷].

$$\rho(N) \leq \mu(N) \leq \bar{\sigma}(N) \quad (28-4)$$

همچنین با توجه به این ناتساوی، رابطه (۲۹-۴) به منظور محاسبه مقدار تکین در کاربردهای عملی به کار می‌رود:

$$\mu_{\Delta}(N) \leq \inf_{D \in \mathcal{D}} \bar{\sigma}(DND^{-1}) \quad (29-4)$$

که در آن ماتریس D از ساختار مجموعه ماتریس‌های نامعینی Δ پیروی می‌کنند، که طبق تعریف تمامی مؤلفه‌های تشکیل دهنده آن موهومی می‌باشند.

$$\Delta = \text{diag}[\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_s I_{r_s}, \Delta_1, \dots, \Delta_f] \text{ that } \delta_i \in \mathbb{C}, \Delta_j \in \mathbb{C}^{m_j \times m_j} \quad (30-4)$$

۴-۶- پایداری و کارایی مقاوم بر اساس آنالیز μ

به منظور ایجاد ارتباط معیارهای پایداری مقاوم و کارایی مقاوم در سیستم پسخورد با پیکربندی استاندارد

شکل (۱۰-۴) را در نظر بگیرید، که در آن:

- K کنترل کننده
- M سیستم نامی
- W_2 یا ورودی برونی^۱ که از جنس اغتشاش، نویز، مسیر مطلوب ردیابی و غیره می باشد.
- P یا سیگنال ورودی به سیستم نامی از سمت نامعینی
- q یا سیگنال خروجی سیستم به سمت نامعینی
- u یا سیگنال ورودی که این ورودی ها تلاش کنترلی را می سازند که توسط کنترل کننده ایجاد می شود.
- y یا خروجی های اندازه گیری شده که در پسخورد استفاده می شوند.
- z_2 یا سیگنال خروجی تنظیم شونده سیستم شامل خروجی تنظیم کننده، خطاهای ردیابی، سیگنال های فیلتر شده عملگرها و غیره.

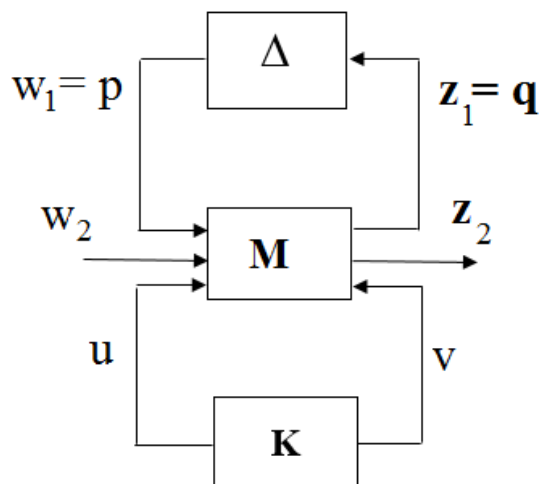
در این شکل دو ورودی ($w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}, u$) و دو خروجی ($z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, y$) که بیانگر مجزا شدن سیستم

کنترل از سیستم نامی و نامعینی است در نظر گرفته شده و رابطه (۴-۳۱) استخراج شده است.

$$T_{zw} = F_l(M, K) = M_{11} + M_{12}K(I - M_{22}K)^{-1}M_{21} \quad (۴-۳۱)$$

سپس به منظور بهره برداری از قضیه بهره کوچک، ماتریس M به شکل گسترده زیر فرض شده است:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \quad (۴-۳۲)$$



شکل ۴-۱۰: نمایش استاندارد $\Delta - M - K$

تا دو ورودی (w_1, w_2) و دو خروجی (z_1, z_2) از یکدیگر جدا (سیستم نامی از نامعینی) شوند:

$$T_{zw} = F_l(M, K) = \begin{bmatrix} P_{11} + P_{13}K(I - P_{33}k)^{-1}P_{31} & P_{12} + P_{13}K(I - P_{33}k)^{-1}P_{32} \\ P_{21} + P_{23}K(I - P_{33}k)^{-1}P_{31} & P_{22} + P_{23}K(I - P_{33}k)^{-1}P_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix}$$

سپس تابع تبدیل از w_2 به z_2 طبق رابطه (۴-۳۳) محاسبه شده است.

$$T_{z_2 w_2} = F_u(N, \Delta) = F_u(F_l(M, K), \Delta) = N_{22} + N_{21}\Delta(I - N_{11}\Delta)^{-1}N_{12} \quad (۴-۳۳)$$

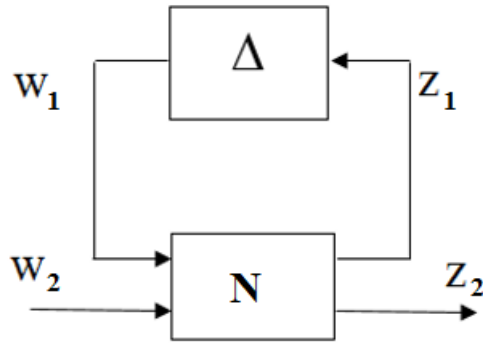
حال بر مبنا رابطه (۴-۳۳) و شکل استاندارد ارائه شده (۴-۱۱) به ارتباط بین معیارهای پایداری و کارایی

در سیستم پسخورد استاندارد بر مبنای مقدار تکین ساختاریافته پرداخته می‌شود [۳۷].

۴-۶-۱- پایداری مقاوم بر اساس آنالیز μ

همانطور که گفته شد برای برقراری شرط پایداری مقاوم می‌بایست N پایدار داخلی و به ازای تمامی

نامعینی‌های ساختاریافته نرمالیزه $\Delta \in B\Delta$ ، شرط $\mu_\Delta(N_{11}) < 1$ یا $\|N_{11}(s)\|_\mu < 1$ برقرار باشد.



شکل ۴-۱۱: نمایش استاندارد $\Delta - N$

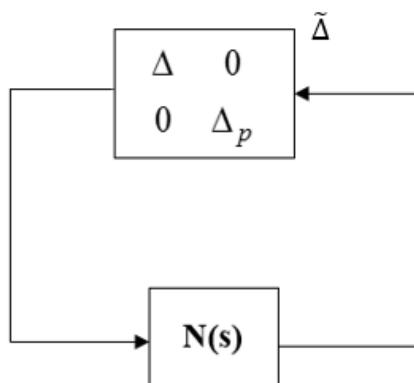
این شرط نتیجه طبیعی از قضیه بهره کوچک است، که در آن مطابق رابطه (۴-۲۹) کران بالا مقدار تکین ساختاریافته از نرم بی‌نهایت تابع تبدیل N بدست می‌آید.

۴-۶-۲- کارایی مقاوم بر اساس آنالیز μ

در محاسبات عملی بررسی شرط $\|F_u(N, \Delta)\|_\infty < 1$ پیچیده است، لذا معمولاً نامعینی‌های کارایی به طور مجازی از نامعینی کل سیستم مجزا می‌شود و یک ساختار نامعینی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\tilde{\Delta} \in \tilde{\mathcal{D}} = \{diag\{\Delta, \Delta_F\} : \Delta \in B\Delta, \|\Delta_p\| \leq 1\} \quad (۴-۳۴)$$

با فرض پایداری داخلی M ، شرط تضمین عملکرد مقاوم آن است که رابطه $\mu_{\tilde{\Delta}}(N) < 1$ تأمین گردد که در آن بلوک $\tilde{\Delta}$ همانطور که در شکل (۴-۱۲) مشخص است از ترکیب ساختاری دو بلوک نامعینی واقعی سیستم، Δ و بلوک نامعینی فرضی در سیستم Δ_p تشکیل شده است.



شکل ۴-۱۲: پیکربندی نامعینی در حالت یکپارچه

۴-۷- تعریف مسئله سنتز μ

با توجه به ساختار شکل (۴-۱۰) که در صفحات قبل ارائه شده است، در مسئله سنتز μ ، مجموعه سیستم‌هایی که بایستی برای آن‌ها کنترل‌کننده بهینه مقاوم طراحی شود، با استفاده از تبدیل کسری خطی بالایی ULFT تابع تبدیل سیستم تعمیم یافته و بلوک نامعینی به صورت زیر بیان می‌شود [۳۷]:

$$\{F_u(M, \Delta) : \Delta \in \mathbf{\Delta}, \max_{\omega} [\Delta(j\omega)] \leq 1\} \quad (۴-۳۵)$$

در رابطه (۴-۳۵)، $\mathbf{\Delta}$ مجموعه کلیه توابع تبدیل نامعین پایدار است که نرم بی‌نهایت آن کوچکتر از یک می‌باشد. بدین ترتیب، هدف از طراحی، یافتن کنترل‌کننده پایدار ساز K است به نحوی که به ازای $\forall \Delta \in \mathbf{\Delta}$ ، نرم بی‌نهایت تابع تبدیل حلقه بسته سیستم کمینه گردد. این هدف را می‌توان با استفاده از تبدیل کسری خطی پایینی LLFT

مجموعه فوق با کنترل‌کننده بهینه به صورت زیر تعبیر نمود [۳۷].

$$\min_{\gamma} \|F_l[F_u(M, \Delta), K]\|_{\infty} < 1 \quad (۴-۳۶)$$

عبارت فوق معادل است با نرم بی‌نهایت تابع تبدیل حلقه بسته سیستم با حضور بلوک نامعینی در سیستم، یعنی $\min_{\gamma} \|T_{zw}\|_{\infty} < 1$. حال اگر کنترل‌کننده مورد نظر داده شده باشد، شرط فوق را می‌توان با محاسبه مقدار تکین ساختار یافته زیر محاسبه نمود [۳۷]:

$$\max_{\omega} \mu_{\Delta}(F_l(M,K)(j\omega)) < 1 \quad (۳۷-۴)$$

بدین ترتیب هدف از طراحی کنترل‌کننده به روش سنتز μ ، تعیین کنترل‌کننده پایدارسازی است که بیشینه مقدار تکین ساختاریافته $\mu_{\Delta}(0)$ را بر روی $F_l(M,K)$ کمینه سازد. این مسئله به صورت زیر قابل بیان است:

$$\min_K \left[\max_{\omega} \mu_{\Delta}(F_l(M,K)(j\omega)) \right] < 1 \quad (۳۸-۴)$$

در ساده‌سازی رابطه (۳۶-۴)، از برابری زیر استفاده می‌شود:

$$F_l(F_u(M,\Delta),K) = F_u(F_l(M,K),\Delta) \quad (۳۹-۴)$$

توجه شود که محاسبه مقدار تکین ساختار یافته، فرآیندی پیچیده بوده و به جای آن می‌توان با اضافه نمودن محافظه‌کاری، از کران بالا استفاده نمود [۳۷].

۴-۷-۱- راهکار حل مسئله سنتز μ

اگر کنترل‌کننده مقاومی طراحی شده باشد، می‌توان کران بالای مقدار تکین ساختاریافته را در فرکانس‌های مختلف به دست آورد. طبیعتاً مقدار این تابع در فرکانس‌های مختلف، متفاوت است و می‌توان توزیع فرکانسی مشخصی برای آن به دست آورد. اگر کنترل‌کننده بتواند بیشینه مقدار تکین ساختاریافته را کمینه سازد، این موضوع بدان معنی است که تا حد امکان توانسته است این تابع را در فرکانس‌های مختلف تخت

نماید. تخت نمودن مقدار تکین ساختاریافته در فرکانس‌های مختلف به دو صورت قابل انجام است. در روش اول، می‌توان توزیع فرکانسی این تابع مقدار تکین ساختاریافته را مورد بررسی قرار داد و در محدوده فرکانسی که مقدار این تابع بیشتر از یک است، تابع وزن عملکرد را متناسب با آن تقویت نمود تا به صورت غیرمستقیم اثر آن بر روی افزایش عملکرد مقاوم سیستم و کاهش مقدار تکین ساختاریافته آن مورد بررسی قرار گیرد. این کار به صورت طبیعی توسط طراح متبخر و در حین طراحی سلسله‌وار کنترل‌کننده بهینه انجام می‌شود که امری زمان‌بر و طاقت‌فرسا می‌باشد. به علاوه، نمی‌توان روشی سیستماتیک و بازگشتی برای آن ارائه نمود [۳۷].

در روش دیگر، برای محاسبه رابطه (۴-۳۷) و بهینه‌سازی آن می‌توان از ماتریس D و رابطه (۴-۲۹)، بهره برد. راهکاری که رابطه (۴-۲۹) ارائه می‌نماید، به صورت سیستماتیک، می‌تواند توزیع فرکانسی مقدار تکین ساختار یافته را در طراحی کنترل‌کننده H_∞ بهینه وارد ساخته و به صورت بازگشتی نسبت به کاهش آن اقدام نماید. بدین ترتیب که با ارائه تخمین مناسبی از توزیع فرکانسی مقدار تکین ساختار یافته توسط تابع تبدیل مناسب D ، آن را می‌توان در طراحی کنترل‌کننده بهینه وارد ساخت و نتیجه آن را بررسی نمود. با انجام این کار با استفاده از رابطه (۴-۲۹)، می‌توان مسئله بهینه‌سازی در سنتز μ را به صورت زیر تغییر داد [۳۷]:

$$\min_{K,D} \left[\max_{\omega} \mu_{\Delta}(D F_l(M,K) D^{-1}(j\omega)) \right] < 1 \quad (۴-۴۰)$$

در این مسئله، هر دو تابع تبدیل D و K قابل تغییر بوده و می‌توان به طریق مناسب نقطه بهینه را به صورت بازگشتی تعیین نمود. در ادامه، کنترل‌کننده بهینه K با الگوریتم بازگشتی $D-K$ که بر اساس این راهکار تعبیه شده است، معرفی می‌گردد [۳۷].

۴-۷-۲- طراحی کنترل کننده به روش الگوریتم بازگشتی D-K^۱

در این روش، مراحل زیر انجام می‌شود [۳۷]:

۱- با حدس اولیه از D شروع کنید. به منظور شروع کار معمولاً D برابر با ماتریس همانی در

نظر گرفته می‌شود: $D=I$.

۲- گام K: مقدار D را ثابت نگه دارید و مسئله بهینه‌سازی H_∞ زیر را به منظور یافتن کنترل-

کننده مقاوم K حل کنید.

$$K = \inf_{K(s)} \| (D F_l(M,K) D^{-1}) \|_\infty = \inf_{K(s)} \| DND^{-1} \|_\infty \quad (۴۱-۴)$$

۳- گام D: مقدار K را ثابت نگه دارید و ماتریس قطری کننده D به منظور کمینه سازی تابع

هزینه زیر را در هر فرکانس بیابید.

$$D(j\omega) = \inf_D \bar{\sigma} [D F_l(M,K) D^{-1}] = \inf_D \bar{\sigma} [DND^{-1}] \quad (۴۲-۴)$$

۴- از طریق برازش، ماتریس تابع تبدیل D را بر اساس توزیع فرکانسی مقدار تکین ساختار

یافته با یک تابع تبدیل کمینه فاز و پایدار تقریب بزنید. اگر تابع هزینه گام سوم از مقدار ۱ کمتر

بود، حل مسئله را متوقف کرده، در غیر این صورت به گام دوم برگردید.

۴-۷-۳- مزایا و معایب روش سنتز μ

در الگوریتم D-K، به دلیل ثابت نگه داشتن یک پارامتر طراحی و تغییر دیگری در هر مرحله، نقطه

کمینه محلی به دست می‌آید و هیچ تضمینی در محاسبه نقطه کمینه فراگیر وجود ندارد. اما در کارهای

عملی، به تجربه ثابت شده است که این روش به خوبی ملزومات کنترل مطلوب را برآورده ساخته و پاسخ به دست آمده با توجه به معیار عملکرد مقاوم به مراتب از کنترل کننده اولیه بهتر است. در بیشتر موارد، کنترل کننده بهینه μ به صورت کسری به دست نمی آید، لذا دارای مرتبه بی نهایت خواهد بود ولی به دلیل اینکه از یک تابع مرتبه محدود $D(s)$ برای تخمین مقیاس های $D(s)$ استفاده می شود، به یک کنترل کننده مرتبه محدود ولی غالباً مرتبه بالا منجر می گردد. باید توجه نمود که یافتن کنترل کننده تا حد زیادی به حدس اولیه D و مرتبه آن وابسته است. حدس اولیه در تعداد تکرار مؤثر است اما مرتبه D تا حد بسیار زیادی بر روی مرتبه کنترل کننده نهایی تأثیرگذار است [۳۷].

مدلسازی مسئله

۵-۱- مقدمه

در این فصل به بیان مدل‌سازی مسئله مورد نظر می‌پردازیم. در ابتدا مدل مورد استفاده جهت تحلیل سیستم توضیح داده می‌شود و پس از آن الگوریتم طراحی کنترل‌کننده مطلوب ارائه می‌گردد. از جمله مدل‌های مورد استفاده برای تحلیل‌های دینامیکی سیستم قدرت، مدل سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت است. در این پایان‌نامه نیز از همین مدل برای تحلیل نوسانات سیستم قدرت استفاده می‌شود که در بخش بعدی شرح داده می‌شود. سپس در تشریح روش طراحی پیشنهادی، ابتدا سیستم کنترلی و در ادامه آن روش بهینه‌سازی مورد استفاده ارائه می‌گردد.

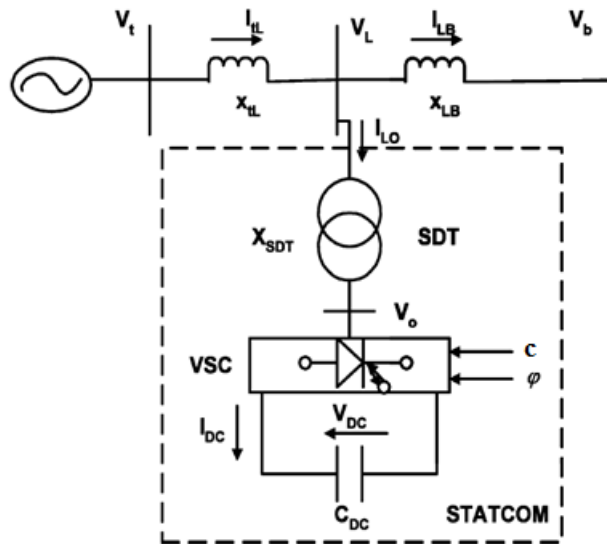
۵-۲- مدل غیر خطی شبکه قدرت

در این قسمت مدل غیرخطی مورد استفاده در طرح کنترلی پیشنهادی ارائه می‌شود. در شکل (۵-۱) که در صفحه بعد آورده شده است، یک شبکه تک ماشینه دارای STATCOM که برای مطالعات نوسانات فرکانس پایین و پایداری حالت گذرا و سیگنال کوچک استفاده می‌شود، نشان داده شده است. ژنراتور سنکرون توان الکتریکی را از طریق یک STATCOM و دو خط موازی به شین بی‌نهایت تحویل می‌دهد. در ادامه، مدل هر یک از قسمت‌های مختلف سیستم مورد نظر شرح داده می‌شود.

۵-۲-۱- دینامیک اینورتر منبع ولتاژ

اینورتر منبع ولتاژ (VSC) یک ولتاژ AC قابل کنترل تولید می‌کند. تفاوت ولتاژ بین شبکه و STATCOM، $V_L(t)$ و $V_O(t)$ باعث تبادل توان راکتیو بین STATCOM و سیستم قدرت می‌شود. ولتاژ STATCOM ($V_O(t)$) توسط V_O دامنه و φ فاز تنظیم می‌شود. رابطه (۵-۱)، رابطه جریان خروجی STATCOM را بر حسب مولفه عمودی و افقی آن نشان می‌دهد.

$$\bar{I}_{Lo} = I_{Lod} + jI_{Loq} \quad (1-5)$$



شکل ۱-۵: شبکه تک ماشینه دارای STATCOM [۵۴]

ارتباط بین ولتاژ خازن و ولتاژ خروجی STATCOM به صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$V_o = cV_{dc}(\cos\varphi + j\sin\varphi) = cV_{dc}\angle\varphi \quad (2-5)$$

که در رابطه بالا V_{dc} ولتاژ لینک DC و V_o ولتاژ خروجی STATCOM می‌باشد. همچنین c و φ پارامترهای کنترلی ولتاژ خروجی می‌باشد.

۵-۲-۲- دینامیک ولتاژ خازن

با توجه به اینکه دینامیک ولتاژ خازن تاثیر زیادی بر سیستم قدرت دارد، بنابراین اثر آن باید در مدل‌سازی در نظر گرفته شود. اگر اینورتر بدون تلفات فرض شود، توان اکتیو مبادله شده سیستم با اینورتر برابر با توانی است که خازن با اینورتر مبادله می‌کند ($P_{DC}=P_{AC}$) با توجه به این نکته داریم:

$$V_{dc}I_{dc} = \text{real}(\bar{V}_o\bar{I}_{Lo}^*) = \text{real}\{cV_{dc}(\cos\psi + j\sin\psi)(I_{Lod} - jI_{Loq})\} \quad (3-5)$$

با حل معادله بالا و با توجه به رابطه (۲-۵) رابطه بین جریان ورودی STATCOM (I_{dc}) و جریان خروجی آن به شرح زیر می‌باشد:

$$I_{dc} = c(I_{Lod} \cos \varphi + I_{Loq} \sin \varphi) \quad (۴-۵)$$

رابطه دینامیکی بین ولتاژ و جریان خازن بصورت زیر می‌باشد:

$$\dot{V}_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} \quad (۵-۵)$$

در رابطه بالا C_{dc} ظرفیت خازن DC، I_{dc} جریان خازنی، ولتاژ خازن است. برای مدل‌سازی کلی سیستم رابطه ولتاژ خازن را بر حسب جریان خروجی STATCOM بیان می‌کنند. با قرار دادن رابطه (۴-۵) در رابطه (۵-۵) داریم:

$$\dot{V}_{dc} = \frac{c}{C_{dc}} (I_{Lod} \cos \varphi + I_{Loq} \sin \varphi) \quad (۶-۵)$$

در رابطه بالا I_{Lod} و I_{Loq} به ترتیب مولفه d و q جریان خروجی STATCOM هستند.

۵-۲-۳- دینامیک روتور و سیستم تحریک ژنراتور

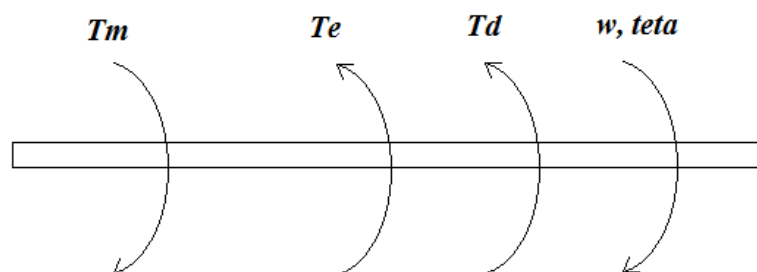
روتور یک ژنراتور الکتریکی، همراه با سیگنال‌های آن در شکل (۲-۵) که در صفحه بعد آمده، نشان داده شده است. در این شکل T_m گشتاور مکانیکی است که بوسیله توربین به محور شفت ژنراتور اعمال و باعث چرخش آن می‌شود. همچنین دیگر پارامترهای نمایش داده شده در این شکل عبارتند از:

ω : سرعت زاویه ای روتور

θ : موقعیت زاویه ای روتور

T_e : گشتاور الکتریکی اعمالی از شبکه بر روی شفت

T_d : گشتاور اصطحکاک ناشی از لختی جرم شفت



شکل ۵-۲: سیگنال‌های اثر گذار بر روی شفت یک ژنراتور

گشتاور اصطحکاک ناشی از لختی جرم شفت رابطه مستقیم با سرعت زاویه ای روتور و میزان ضریب

میراکنندگی

یا ضریب اصطحکاک روتور دارد. رابطه‌ی آن به فرم زیر می‌باشد:

$$T_d = D \cdot \omega \quad (۷-۵)$$

در رابطه (۷-۵) پارامتر D ضریب میراکنندگی یا ضریب اصطحکاک روتور و ω سرعت زاویه ای روتور

می‌باشد. طبق قانون دوم نیوتن که بیان کننده شتاب یک جسم در برابر نیروهای وارد شده بر آن جسم را

بیان می‌کند، مورد شتاب حرکتی روتور به صورت رابطه (۸-۵) بیان می‌شود:

$$M \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d \quad (۸-۵)$$

در رابطه (۸-۵) پارامتر M گشتاور لختی روتور می‌باشد. با قرار دادن رابطه (۷-۵) در رابطه (۸-۵) معادله

(۹-۵) بدست می‌آید:

$$M \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D \cdot \omega \quad (۹-۵)$$

در ژنراتور سنکرون گشتاور مبنای واحد برابر با توان مبنای واحد می‌باشد، از این رو رابطه (۹-۵) در مبنای

واحد بصورت زیر نوشته می شود:

$$M \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D \cdot \omega \quad (10-5)$$

رابطه بین موقعیت زاویه روتور با سرعت زاویه‌ای آن به فرم زیر است:

$$\theta = \omega \cdot t \quad (11-5)$$

موقعیت زاویه روتور متغیر مناسبی در شبیه سازی ژنراتور سنکرون نیست زیرا این متغیر دائما در حال افزایش است. به همین دلیل، در شبیه سازی سرعت روتور از زاویه بار به جای موقعیت زاویه روتور استفاده می شود. رابطه بین زاویه بار δ و سرعت زاویه‌ای به شرح زیر است:

$$\dot{\delta} = \omega_0 (\omega - 1) \quad (12-5)$$

در رابطه بالا ω_0 سرعت سنکرون زاویه‌ای روتور می باشد. بدین ترتیب معادلات مکانیکی روتور مدل می شود. رابطه (10-5) و (12-5) معادلات کامل روتور را نمایش می دهد. روابط حاکم بر سیستم تحریک یک ژنراتور به شرح زیر است:

$$\dot{E}'_q = (-E_q + E_{fd}) / T'_{do} \quad (13-5)$$

در رابطه (13-5) T'_{do} ثابت زمانی مدار باز دیده شده از دو سر سیم پیچ تحریک ژنراتور می باشد. همچنین E_q و E'_q به ترتیب ولتاژ القا شده فاصله‌ی هوایی محور عمودی در حالت مانا و حالت گذرا ژنراتور بوده است. در رابطه (13-5) متغیر E_{fd} ولتاژ دو سر سیم پیچ تحریک می باشد. معادلات دینامیکی ولتاژ دو سر سیم پیچ تحریک به شرح زیر است:

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} (E_{fd} - E_{fd0}) - \frac{K_A}{T_A} (V_t - V_{t0}) \quad (14-5)$$

در رابطه (۱۴-۵) T_A و K_A به ترتیب ضریب گین و ثابت زمانی سیستم تحریک می‌باشند. همچنین V_t ولتاژ ترمینال ژنراتور می‌باشد. بدین ترتیب معادلات کامل دینامیکی شبکه تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت در حضور STATCOM به شرح زیر خلاصه می‌شود.

$$\dot{\delta} = \omega_0 (\omega - 1) \quad (۱۵-۵)$$

$$\dot{\omega} = (P_m - P_e - D \cdot \omega) / M \quad (۱۶-۵)$$

$$\dot{E}'_q = (-E_q + E_{fd}) / T'_{do} \quad (۱۷-۵)$$

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} (E_{fd} - E_{fd0}) - \frac{K_A}{T_A} (V_t - V_{t0}) \quad (۱۸-۵)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{c}{C_{dc}} (I_{Lod} \cos \varphi + I_{Loq} \sin \varphi) \quad (۱۹-۵)$$

روابط (۱۵-۵) تا (۱۹-۵) معادلات کامل دینامیکی شبکه تک ماشین متصل به باس‌بار بی‌نهایت در حضور STATCOM را بیان می‌کند. در این معادلات همانطور که مشخص است متغیرهای اصلی مدل به شرح زیر می‌باشند:

(۱) زاویه بار δ

(۲) سرعت زاویه ای روتور ω

(۳) ولتاژ حالت گذرا القا شده فاصله‌ی هوایی محور عمودی E'_q

(۴) ولتاژ دو سر سیم پیچ تحریک E_{fd}

(۵) ولتاژ خازن V_{dc}

دسته‌ای دیگر از متغیرهای مطرح شده در مدل سیستم مورد مطالعه به عنوان متغیرهای وابسته مطرح

می‌شوند که برای شبیه سازی کامل می‌بایست روابط هر یک از آنها را نسبت به متغیرهای اصلی مدل بیان کرد. متغیرهای وابسته مدل به شرح زیر می‌باشند:

$$(۱) P_e \text{ توان الکتریکی ایجاد کننده گشتاور الکتریکی بر روی شفت روتور}$$

$$(۲) V_t \text{ ولتاژ ترمینال خروجی ژنراتور سنکرون}$$

$$(۳) E_q \text{ ولتاژ القا شده فاصله‌ی هوایی محور عمودی در حالت مانا}$$

$$(۴) I_{Lod} \text{ جریان خروجی STATCOM در محور d}$$

$$(۵) I_{Loq} \text{ جریان خروجی STATCOM در محور q}$$

با توجه به مرجع [۲۴] هر یک از متغیرهای P_e و V_t برحسب مولفه‌های d و q جریان و ولتاژ خروجی ژنراتور بیان می‌شود. که رابطه آن به شرح زیر است.

$$P_e = V_d I_{td} + V_q I_{tq} \quad (۲۰-۵)$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (۲۱-۵)$$

رابطه مولفه‌های d و q ولتاژ خروجی ژنراتور بر حسب متغیرهای ژنراتور سنکرون و جریان خروجی به

شکل زیر می‌باشد:

$$V_{td} = x_q I_{tq} \quad (۲۲-۵)$$

$$V_{tq} = E'_q - x'_d I_{td} \quad (۲۳-۵)$$

در روابط بالا x_q راکتانس محور q ژنراتور سنکرون، x'_d راکتانس گذرا محور d ژنراتور سنکرون و I_{td} و I_{tq} به ترتیب مولفه d و q جریان خروجی ژنراتور می‌باشند. با قرار دادن معادلات (۲۲-۵) و (۲۳-۵) در معادلات (۲۰-۵) و (۲۱-۵) این روابط به شرح زیر اصلاح می‌شوند:

$$P_e = E'_q I_{tLq} + (x_q - x'_d) I_{tLd} I_{tLq} \quad (24-5)$$

$$V_t = \sqrt{(E'_q - x_d I_{tLd})^2 + (x_q I_{tLq})^2} \quad (25-5)$$

روابط دیگر متغیرهای وابسته در مدل سیستم بر حسب پارامترهای سیستم به شرح زیر است:

$$E_q = E'_q + (x_d - x'_q) I_{tLd} \quad (26-5)$$

$$I_{Lod} = \frac{E'_q - (x'_q + X_{tL}) I_{tLq} - cV_{dc} \sin \varphi}{X_{SDT}} \quad (27-5)$$

$$I_{Loq} = \frac{cV_{dc} \cos \varphi - (x'_d + X_{tL}) I_{tLq}}{X_{SDT}} \quad (28-5)$$

همانطور که مشاهده می‌شود تمام متغیرهای وابسته در مدل سیستم بر حسب سه مورد نوشته می‌شوند

که عبارتند از:

(۱) متغیرهای اصلی مدل سیستم

(۲) پارامترها سیستم

(۳) مولفه d و q جریان خروجی ژنراتور

برای اینکه در مدل سیستم تمام رفتار سیستم دیده شود، به عبارت دیگر تمامی متغیرهای سیستم مدل شود، می‌بایست تمامی متغیرهای وابسته در این مدل بر حسب متغیرهای اصلی و پارامترهای سیستم بیان شوند. برای این کار کافی است روابط مولفه d و q جریان خروجی ژنراتور بر حسب پارامترهای سیستم و متغیرهای اصلی سیستم بدست آید. این روابط به شرح زیر است:

$$I_{tLd} = \frac{(1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}})e'_q - \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}mV_{dc} \sin \varphi - V_b \cos \varphi}{X_{tL} + X_{LB} + \frac{X_{tL}}{X_{LB}} + (1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}})x'_d} \quad (29-5)$$

$$I_{tLq} = \frac{(\frac{X_{LB}}{X_{SDT}}mV_{dc} \cos \varphi + V_b \sin \varphi)}{X_{tL} + X_{LB} + \frac{X_{tL}}{X_{LB}} + (1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}})x'_q} \quad (30-5)$$

همچنین تعریف می شود:

$$X_{LB} = \frac{X_L}{2} \quad (31-5)$$

$$X_{tL} = X_T + \frac{X_L}{2} \quad (32-5)$$

در این روابط X_L ، x'_d و X_q به ترتیب راکتانس خط انتقال، راکتانس گذرا محور d ژنراتور، و راکتانس محور q ژنراتور، X_{SDT} راکتانس ترانس متصل به و X_T راکتانس ترانس متصل به ژنراتور می باشد. با خطی سازی مدل غیر خطی گفته شده مدل خطی سیستم تک ماشینه دارای STATCOM متصل به شین بی نهایت بدست می آید.

۵-۳- مدل خطی شده سیستم قدرت

یک مدل دینامیکی خطی با استفاده از خطی سازی مدل غیرخطی حول یک نقطه کار به دست می آید. برای محاسبه ضرایب مدل خطی شده سیستم، تمامی معادلات توصیف کننده سیستم باید بر حسب پارامترها و متغیرهای حالت سیستم نوشته شوند.

برای جلوگیری از پیچیدگی بیش از حد نوشتاری معادلات، در معادلات خطی شده نیز متغیرهای وابسته P_e ، V_t و E_q را از معادلات اصلی سیستم حذف نمی‌کنیم و تنها با جایگذاری معادلات (۵-۲۷) و (۲۸-۲۸) در معادله (۵-۱۹) متغیرهای وابسته I_{Lod} و I_{Loq} از معادلات اصلی سیستم حذف کرده و با خطی سازی معادلات (۵-۱۵) تا (۵-۱۹) حول نقطه کار معادلات خطی سیستم مورد مطالعه بدست می‌آید. روابط زیر مدل خطی شده سیستم تک ماشینه دارای STATCOM متصل به شین بی‌نهایت را نشان می‌دهد.

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (۳۳-۵)$$

$$\Delta \dot{\omega} = (-\Delta P_e - D\Delta \omega) / M \quad (۳۴-۵)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = (-\Delta E_q + \Delta E_{fd}) / T'_{do} \quad (۳۵-۵)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = (K_A(\Delta v_{ref} - \Delta v) - \Delta E_{fd}) / T_A \quad (۳۶-۵)$$

$$\Delta \dot{v}_{dc} = K_7 \Delta \delta + K_8 \Delta E'_q - K_9 \Delta v_{dc} + K_{dc} \Delta c + K_{d\phi} \Delta \phi \quad (۳۷-۵)$$

متغیرهای وابسته معادلات بالا برحسب متغیرهای حالت قابل محاسبه‌اند. روابط خطی شده این متغیرها

برحسب متغیرهای حالت به فرم زیر می‌باشد:

$$\Delta P_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{pdc} \Delta v_{dc} + K_{pc} \Delta c + K_{p\phi} \Delta \phi \quad (۳۸-۵)$$

$$\Delta E'_q = K_4 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_q + K_{qdc} \Delta v_{dc} + K_{qc} \Delta c + K_{q\phi} \Delta \phi \quad (۳۹-۵)$$

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{vdc} \Delta v_{dc} + K_{vc} \Delta c + K_{v\phi} \Delta \phi \quad (۴۰-۵)$$

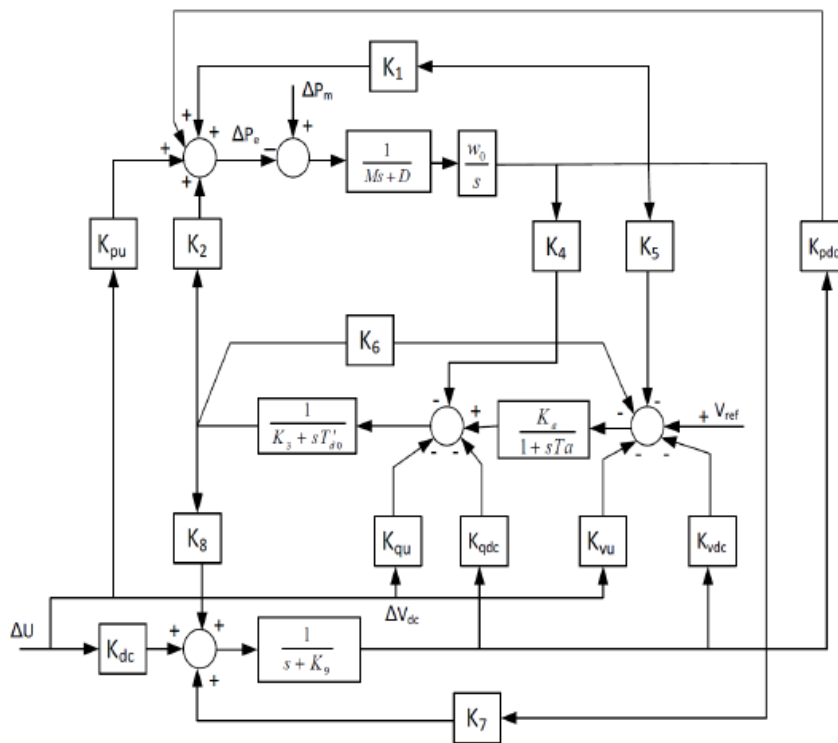
که در آن K_1 ، K_2 ، K_3 ، K_4 ، K_5 ، K_6 ، K_7 ، K_8 ، K_9 ، K_{pu} ، K_{qu} ، K_{vu} ثابت‌های خطی مدل دینامیکی می‌باشد. مدل فضای حالت و بلوک نموداری مدل دینامیک خطی شبکه تک ماشینه سیستم قدرت دارای STATCOM در

مرجع [۳۵] آمده است که در شکل (۳-۵) در صفحه بعد، نشان داده شده است.

۵-۳-۱- معادلات فضای حالت

همانطور که توضیح داده شده، مدل هفرون فلیپس سیستم تک ماشینه متصل شده به شین بی‌نهایت همراه با STATCOM از طریق خطی‌سازی سیستم قدرت غیرخطی حول نقطه کار مشخص به دست می‌آید. ضرایب این مدل از معادلات خطی شده و اطلاعات منحصر به فرد هر سیستم به دست می‌آید. در زیر معادلات فضای حالت آورده شده است.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (۴۱-۵)$$



شکل ۳-۵: بلوک نموداری مدل دینامیک خطی شبکه تک ماشینه سیستم قدرت دارای STATCOM [۳۵]

که در آن:

(۱) بردار متغیرهای حالت سیستم

(۲) بردار ورودی‌های سیستم

(۳) ماتریس حالت سیستم

(۴) ماتریس ورودی سیستم

معادلات (۴۲-۵) تا (۴۵-۵) هر یک از بردارها و ماتریس‌های سیستم خطی شده را نشان می‌دهد.

$$x = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{fd} \quad \Delta v_{dc}]^T \quad (۴۲-۵)$$

$$u = [\Delta c \quad \Delta\varphi]^T \quad (۴۳-۵)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & w_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & -\frac{K_{pdc}}{M} \\ -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{K_{qdc}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_{vdc}}{T_A} \\ K_7 & 0 & K_8 & 0 & -K_9 \end{bmatrix} \quad (۴۴-۵)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{K_{pc}}{M} & -\frac{K_{p\varphi}}{M} \\ -\frac{K_{qc}}{T'_{do}} & -\frac{K_{q\varphi}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_{vc}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\varphi}}{T_A} \\ K_{dc} & K_{d\varphi} \end{bmatrix} \quad (۴۵-۵)$$

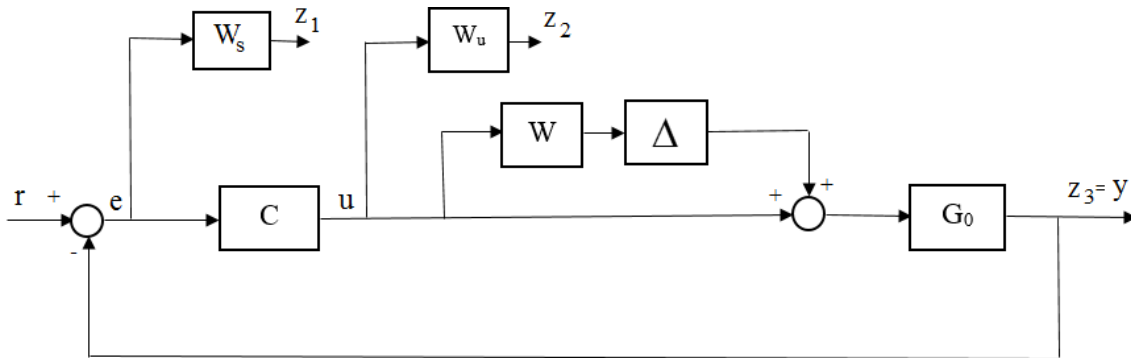
۵-۴- طرح کنترلی پیشنهادی

در این پایان نامه ساختار کنترلی پیشنهادی به صورت شکل (۴-۵) در نظر گرفته شده است. در اینجا برای توصیف سیستم واقعی آن را به صورت یک سیستم نامی همراه با عدم قطعیت ضربی ورودی که برای مدلسازی منابع وسیع عدم قطعیت دینامیکی استفاده می‌شود، نمایش داده‌ایم.

- مدل نامی سیستم $G_0(s)$
- کنترل کننده C
- خروجی مسئله Y
- Δ عدم قطعیت سیستم شامل عدم قطعیت ساختاریافته و عدم قطعیت بدون ساختار
- تابع وزنی کارایی $W_s(s)$
- تابع وزنی مربوط به تلاش کنترلی $W_u(s)$
- تابع وزنی مربوط نامعینی‌های سیستم $W(s)$

اهداف عملکردی سیستم با انتخاب توابع وزنی مناسب مطرح می‌شوند. در شکل (۴-۵)، $W_s(s)$ و $W_u(s)$

توابع وزنی نشان دهنده عملکرد ردیابی مورد نظر و سیگنال کنترل می‌باشند.



شکل ۴-۵: ساختار کنترلی پیشنهادی برای حل مسئله طراحی

۵-۴-۱- انتخاب تابع وزنی عملکرد ($W_s(s)$)

یکی از بخش‌های مهم در مسائل بهینه‌سازی مقاوم، انتخاب مناسب توابع وزنی است. روش‌های مختلفی برای انتخاب توابع وزنی ارائه شده است که ما در این بخش مراحل محاسبه تابع وزنی عملکرد مورد استفاده در این پایان‌نامه را توضیح خواهیم داد.

اگر مدل مطلوب یک تابع تبدیل متمم حساسیت به شکل زیر بیان گردد:

$$T_{id}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (۴۶-۵)$$

با توجه به وجود رابطه جبری بین تابع حساسیت و تابع مکمل حساسیت می‌توان نوشت:

$$S_{id}(s) = 1 - T_{id}(s) \quad (۴۷-۵)$$

بنابراین تابع حساسیت برابر خواهد شد با:

$$S_{id}(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_n s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (۴۸-۵)$$

لذا به منظور تضمین کارایی نامی $\|W_s S\|_\infty < 1$ تابع وزنی مطلوب کارایی را می‌توان از عکس رابطه

فوق تعیین نمود:

$$W_s(s) = a \frac{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s} \quad (۴۹-۵)$$

که a ضریب تنظیم است و بیانگر اهمیت نسبی معیار ردیابی نسبت به دیگر اهداف تعریف شده در سیستم است. به دلیل مشکلات محاسباتی معمولاً تحقق شرط $|S(0)| = 0$ امکان‌پذیر نیست و بنابراین مقدار کوچک ε در نظر گرفته می‌شود که $|S(0)| \leq \varepsilon$. در این حالت نیز قطب تابع وزنی بسیار نزدیک به صفر خواهد شد و نیز یک قطب دور به آن اضافه می‌کنیم تا اکیدا سره گردد [۳۷].

۵-۴-۲- انتخاب تابع وزنی نامعینی در مدل (W(s))

همانطور که می‌دانیم مدل نامی تنها تخمینی از رفتار حقیقی سیستم در واقعیت است. به منظور اعمال دینامیک های مدل نشده، می‌توان از نامعینی ضربی $1 + W(s)\Delta(s)$ در ورودی استفاده نمود. همانطور که قبلا بیان شد در این نوع نامعینی، $\Delta(s)$ نرمالیزه شده است و میزان نامعینی در فرکانس‌های مختلف در تابع وزنی $W(s)$ ظاهر می‌شود. با توجه به اینکه دینامیک‌های مدل نشده غالبا در فرکانس‌های بالا بیشتر خودنمایی می‌کنند، می‌توان از یک فیلتر بالاگذر به عنوان کران بالای نامعینی استفاده کرد.

$$G_p(s) = G_0(s)[1 + W(s)\Delta(s)] \Rightarrow W(s)\Delta(s) = \frac{G_p(s)}{G_0(s)} - 1 \rightarrow \left| \frac{G_p(j\omega)}{G_0(j\omega)} - 1 \right| < |W_2(j\omega)|$$

۵-۴-۳- انتخاب تابع وزنی سیگنال تلاش کنترلی (W_u(s))

یکی دیگر از معیارهای عملکرد سیستم پس‌خورد واحد به صورت زیر است.

$$\|W_u(s)\|_{\infty} = \|W_u KS\|_{\infty} < 1 \quad (5-50)$$

این معیار در واقع تفسیر فیزیکی کوچک بودن تلاش کنترلی است. به منظور تحقق این معیار تابع تبدیل U بایستی کوچکتر از معکوس تابع وزنی $W_u(s)$ باشد. در عمل معمولا این تابع وزنی در حالت ساده برابر مقداری ثابت که متناسب با حد اشباع عملگر است انتخاب می‌گردد.

$$W_u(s) = const \quad (5-51)$$

۵-۵- تعریف مسئله بهینه‌سازی

در تعریف مسئله بهینه‌سازی، با مفروض گرفتن تابع $f: A \rightarrow R$ ، که در آن R مجموعه اعداد حقیقی است. به دنبال یافتن عنصری از X_{opt} در A هستیم. چنین فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی یا مسئله

برنامه‌ریزی ریاضی خوانده می‌شود. بسیاری از مسائل جهان واقع می‌تواند در این چهارچوب عمومی مدل شود. نوعاً، A زیرمجموعه‌ای از فضای اقلیدسی R^n است که اغلب با مجموعه‌ای از قیود، یعنی معادلات و نامعادلاتی که اعضای A باید آنها را محقق کند، مشخص می‌شود. دامنه f مجموعه انتخاب یا فضای جستجو خوانده می‌شود، درحالی‌که عناصر A ، جواب‌های ممکن یا قابل دستیابی خوانده می‌شوند. تابع f ، عموماً تابع هدف خوانده می‌شود. جواب ممکن‌ی که تابع هدف را ماکزیمم کند و یا اگر هدف مینیمم‌سازی باشد، آنرا مینیمم کند، جواب بهینه خوانده می‌شود. شکل استاندارد مسأله بهینه‌سازی (پیوسته) به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } x \quad f(x) \\ & \text{Subject to } \quad g_i(x) \leq 0, \quad i=1, \dots, m \\ & \quad \quad \quad h_i(x) \leq 0 \quad i=1, \dots, p \end{aligned}$$

به طوری که:

$$\begin{aligned} f(x) : R^n &\rightarrow R && \text{تابع مورد نظر ماست که می‌خواهیم بر روی } \mathcal{X} \text{ کمینه شود.} \\ g_i(x) &\leq 0 && \text{محدودیت نابرابری نامیده می‌شود.} \\ h_i(x) &= 0 && \text{محدودیت تساوی نامیده می‌شود.} \end{aligned}$$

طبق قرارداد، شکل استاندارد یک مسأله به حداقل رساندن را توصیف می‌کند. یک مسأله به حداکثر رساندن می‌تواند با منفی کردن تابع هدف به دست آید. برای حل مسائل بهینه‌سازی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. تقسیم بندی کلی این روش‌ها به این ترتیب می‌باشد که روش‌های موجود را به دو دسته تقسیم بندی می‌کنند. که این دو دسته عبارتند از:

(۱) روش‌های کلاسیک یا روش‌های ریاضی (بر پایه محاسبات گردیان)

(۲) روش‌های هوشمند یا فراابتکاری (بر پایه تشکیل جمعیت)

دسته اول یعنی روش‌های کلاسیک یا ریاضی، به مجموعه روش‌هایی اطلاق می‌شود که بر پایه محاسبات

گردد. مشتق تابع به جواب بهینه می‌رسند. دسته دوم روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی روش‌های هوشمند می‌باشند که به الگوریتم‌های فراابتکاری نیز معروف می‌باشند. این الگوریتم‌ها با الگویی در رفتار طبیعت یک روشی مبتنی با جمعیت (متشکل از ذرات) دارند. بطوری که با تشکیل جمعیت و جستجوی آن در مجموعه جواب‌های مسئله به سمت جواب بهینه رفته و آن را می‌یابند. این الگوریتم‌ها ماهیتی تصادفی دارند و به همین دلیل جواب قطعی به ما نمی‌دهند. ولی از آنجا که در جستجو بهینه سراسری بهتر از روش‌های کلاسیک عمل می‌کنند و دچار بهینه محلی نمی‌شوند همواره در مسائل غیرمحدب از آنها استفاده می‌شود. از آنجایی که مسئله طراحی کنترل کننده مقاوم پیشنهادی این پایان نامه نیز از دسته مسائل غیر محدب بشمار می‌آید، در این پایان نامه نیز از الگوریتم هوشمند برای حل آن استفاده شده است. الگوریتم مورد استفاده در این پایان نامه، الگوریتم هوشمند یادگیری بر مبنای آموزش می‌باشد که در ادامه به تشریح آن خواهیم پرداخت.

۵-۵-۱- الگوریتم یادگیری بر مبنای آموزش

الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای آموزش- یادگیری یکی از الگوریتم‌های جدید بهینه‌سازی تکاملی است که برای اولین بار این الگوریتم در مرجع [۴۱] مطرح شده است. این الگوریتم بر اساس مدل‌سازی تدریس معلم در کلاس درس بنا نهاده شده است. معلم در کلاس درس با بیان مطالب درسی نقش بسزایی در یادگیری دانش‌آموزان دارد و بهتر یاد گرفتن دانش‌آموزان بستگی به نوع بیان معلم دارد. علاوه بر تأثیر معلم مرور مطالب درسی بین خود دانش‌آموزان نیز موجب یادگیری بهتر مطالب درسی می‌گردد. این ایده اساس الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای آموزش- یادگیری در حل مسائل بهینه‌سازی است. به عبارت دیگر، مشابه بسیاری دیگر از روش‌های هوشمند، روش بهینه‌سازی بر مبنای آموزش- یادگیری (TLBO) نیز یک روش جمعیت محور می‌باشد. که در این روش این جمعیت به عنوان یک کلاس درس در نظر گرفته می‌شود و از

تأثیر معلم بر دانش‌آموزان برای رسیدن به جواب بهینه استفاده می‌شود. در واقع در این روش، یادگیری دانش‌آموزان (هر یک از اعضای جمعیت) از دو روش صورت می‌پذیرد:

(۱) یادگیری از طریق معلم (فاز معلم)

(۲) یادگیری از برخورد و رابطه با سایر دانش‌آموزان (فاز دانش‌آموزان).

در ادامه الگوریتم روش TLBO به صورت مختصر و مرحله‌ای آمده است:

۱- مسئله بهینه‌سازی تعریف و پارامترهای بهینه‌سازی مقداردهی اولیه می‌شود. در واقع در این مرحله تعداد دانش‌آموزان، تعداد نسل‌ها، تعداد متغیرهای بهینه‌سازی و محدودیت‌های آن‌ها مشخص شده و مسئله مورد نظر به صورت یک مسئله کمینه‌سازی تعریف می‌شود.

۲- جمعیت مقداردهی اولیه می‌شود.

۳- فاز یادگیری از طریق معلم اجرا می‌شود. در واقع در این مرحله بهترین دانش‌آموز به عنوان معلم انتخاب شده و مقادیر سایر دانش‌آموزان با توجه به آن و از رابطه زیر اصلاح می‌شود.

$$differ = r(X_{teacher} - T_f M) \quad (36-3)$$

$$X_{new} = X_{old} + differ \quad (37-3)$$

که در رابطه بالا X_{new} مقدار اصلاح شده دانش‌آموز، r عددی تصادفی بین صفر و یک، $X_{teacher}$ بهترین دانش‌آموز یا معلم، T_f یک عدد تصادفی از مجموعه $\{1, 2\}$ و M متوسط همه دانش‌آموزان می‌باشد.

۴- فاز یادگیری از طریق دانش‌آموزان اجرا می‌شود. در این مرحله برای اصلاح دانش‌آموز i ام، دو دانش‌آموز به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و وضعیت دانش‌آموز i ام از طریق الگوریتم زیر اصلاح می‌شود.

For $i = 1 : P_n$

Randomly select two learners X_i and X_j , where $i \neq j$

If $f(X_i) < f(X_j)$

$$X_{\text{new},i} = X_{\text{old},i} + r_i(X_i - X_j)$$

Else

$$X_{\text{new},i} = X_{\text{old},i} + r_i(X_j - X_i)$$

End If

End For

که در الگوریتم فوق P_n تعداد کل جمعیت (دانش‌آموزان) و $f(X_i)$ مقدار تابع هدف دانش‌آموز i ام و

r_i یک عدد تصادفی بین صفر و یک می‌باشد.

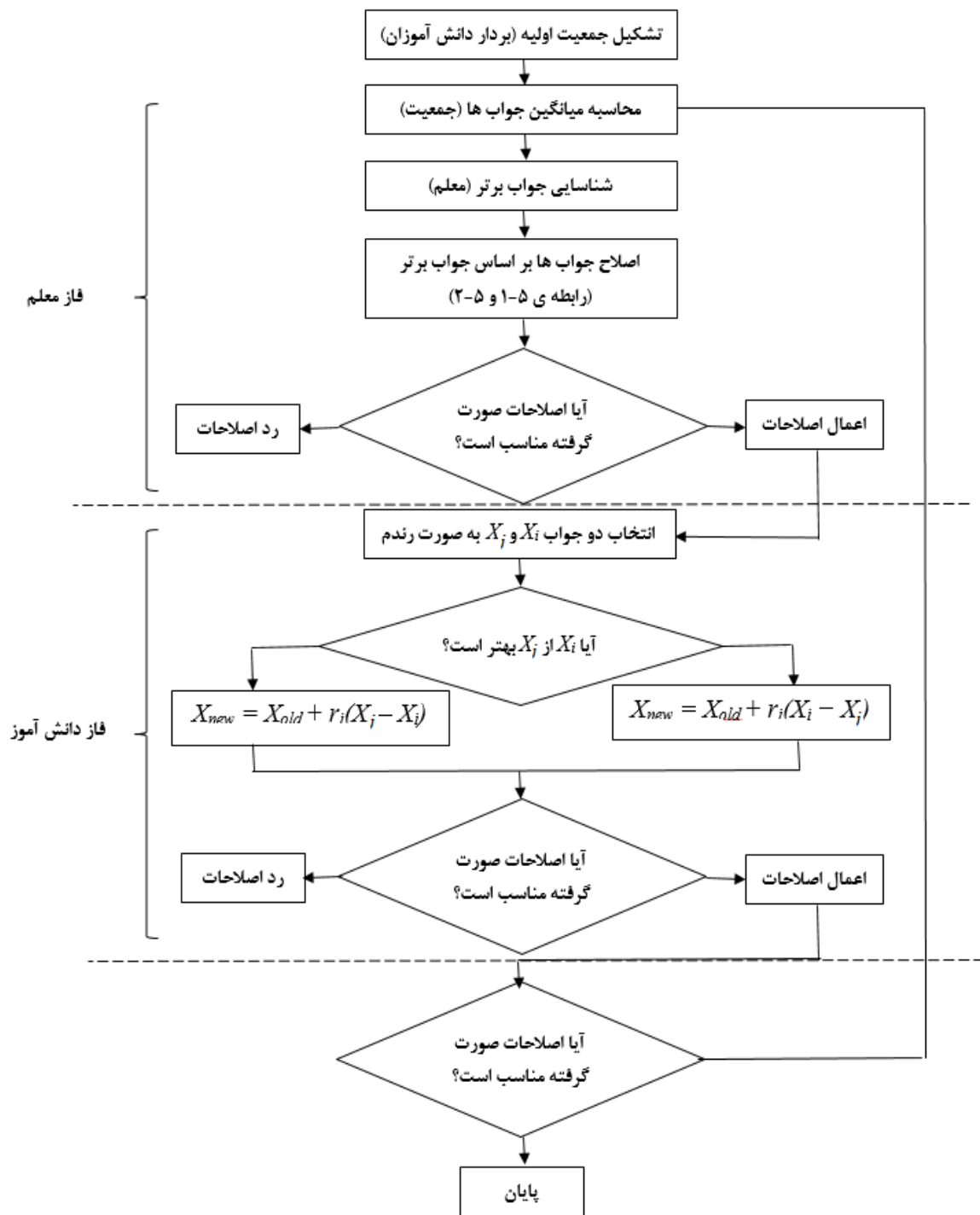
۵- در صورت رسیدن به عدد نسل تعیین شده الگوریتم پایان می‌یابد در غیر این صورت بازگشت به

مرحله سوم.

دقت شود در مراحل سوم و چهارم در صورتی تغییرات ایجاد شده در هر دانش‌آموز اعمال می‌شود که

مقدار تابع هدف جدید آن بهبود یافته باشد. الگوریتم این روش در شکل ۵-۵ در صفحه بعد، نشان داده

شده است.



شکل ۵-۵: فلوچارت الگوریتم روش بهینه‌سازی بر مبنای آموزش - یادگیری

شبه سازی و نتایج

۶-۱- مقدمه

در این فصل شبیه‌سازی مسئله مورد نظر و نتایج بدست آمده ارائه می‌گردد. در ابتدا در بخش دوم این فصل سیستم مورد مطالعه و عدم قطعیت‌های در نظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی بیان شده و سپس کنترل کننده پیشنهادی و بعد از آن نحوه کدگذاری و تعریف عضو در الگوریتم هوشمند ارائه خواهد شد. در ادامه در بخش سوم این فصل نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی آورده شده و تحلیل و بررسی روی نتایج بدست آمده صورت خواهد گرفت.

۶-۲- شبیه سازی و مطالعه موردی

در این قسمت شبیه‌سازی و مطالعه موردی صورت گرفته ارائه خواهد شد.

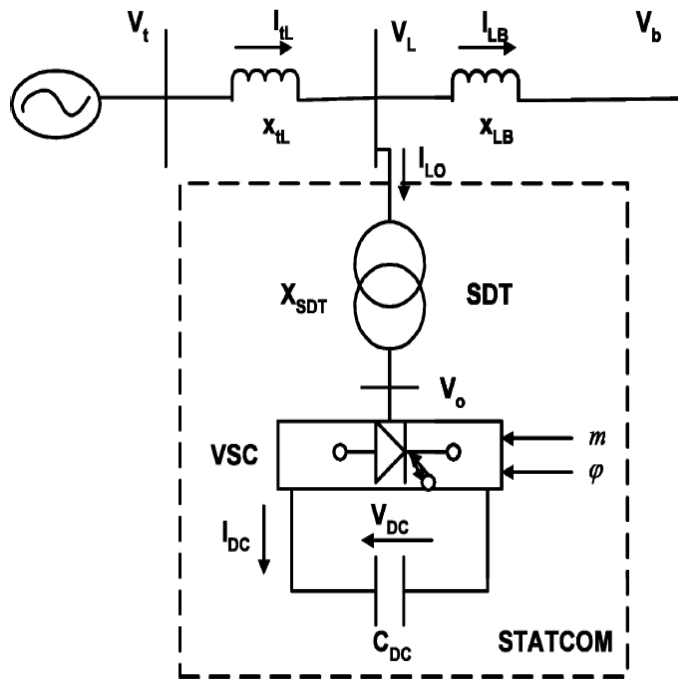
۶-۲-۱- اطلاعات سیستم مورد مطالعه

همانطور که پیشتر گفته شد، سیستم مورد مطالعه برای تحلیل پایداری شبکه در این پایان‌نامه، سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت است که در فاصله میان خط انتقال متصل‌کننده ژنراتور با شین بی‌نهایت تجهیز STATCOM متصل شده است. در رابطه با مدل‌سازی شبکه به تفصیل در فصل قبلی صحبت شد. اطلاعات مربوط به شبکه مورد استفاده در جدول (۶-۱) آورده شده است.

جدول ۶-۱: اطلاعات مربوط به سیستم مورد مطالعه [۴۲]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
H	3	X_{tL}	0.3	x_d	1
D	4	X_{LB}	0.3	x'_d	0.3
X_q	0.6	T_A	0.01	T'_{do}	6.3

1	C_{dc}	10	K_A	0.15	X_{SDT}
---	----------	----	-------	------	-----------



شکل ۶-۱: شبکه تک ماشینه دارای STATCOM [۴۳]

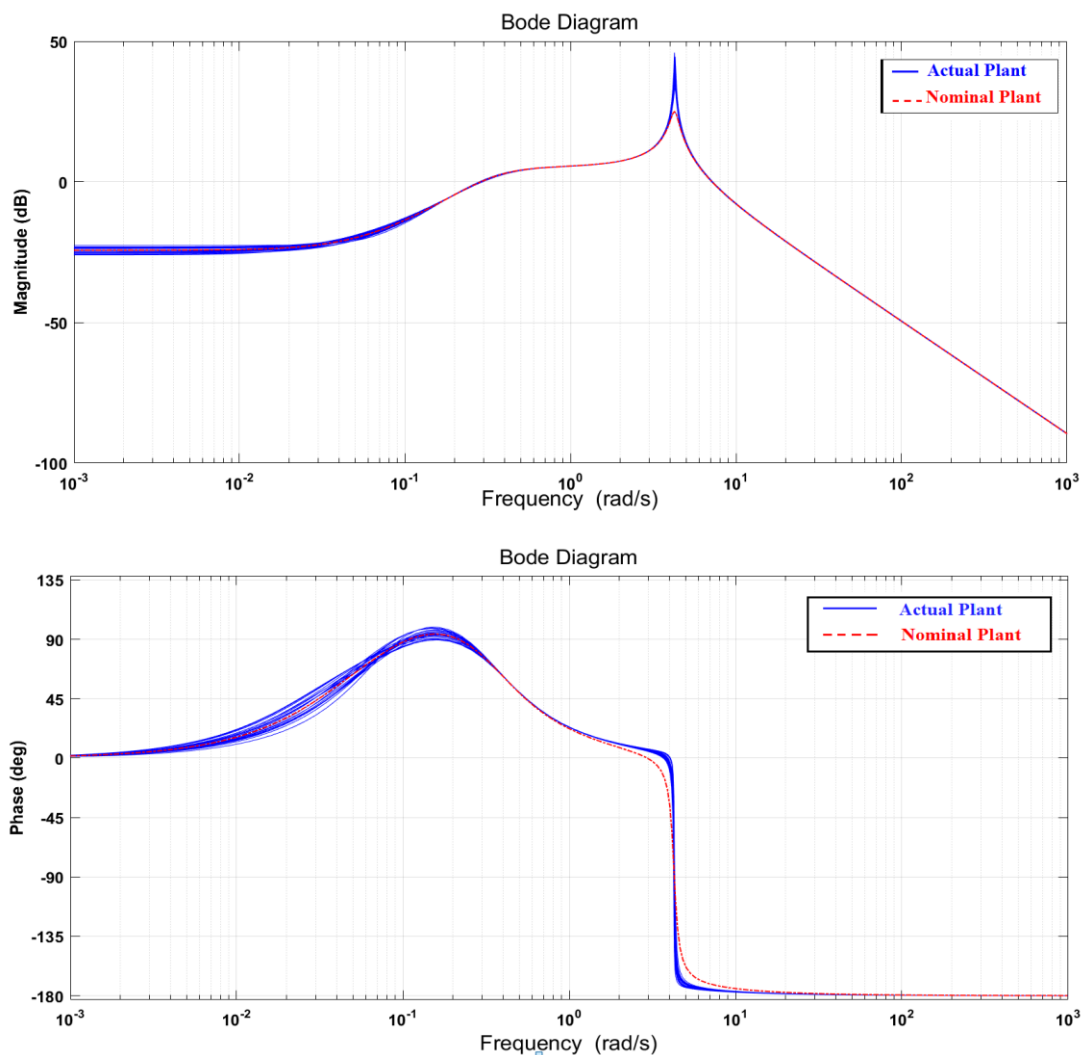
شکل (۶-۱) شبکه تک ماشینه دارای STATCOM را نشان می‌دهد. با توجه به ساختار کنترلی پیشنهادی برای حل مسئله طراحی که در شکل (۵-۴) فصل گذشته، تابع تبدیل سیستم نامی به صورت رابطه (۶-۱) می‌باشد.

$$G_0(s) = \frac{33.32s^3 + 3337s^2 + 465.3s + 14.43}{s^4 + 0.9739s^3 + 18.52s^2 + 9.798s + 2.369} \quad (6-1)$$

۶-۲-۲- عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده

عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده برای سیستم مورد مطالعه، هم شامل عدم قطعیت ساختاریافته و هم شامل عدم قطعیت بدون ساختار می‌باشد، که عدم قطعیت ساختاریافته یا به عبارتی عدم قطعیت

پارامتریک بر روی پارامترهای x'_d و T'_{d0} که به ترتیب راکتانس گذرا محور d ژنراتور سنکرون و ثابت زمانی مدار باز دیده شده از دو سر سیم پیچ تحریک ژنراتور می‌باشند، در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت بدون ساختار به واسطه دینامیک مدل نشده سیستم واقعی با حذف دورترین قطب از مبدا که در نقطه ۱۰۰- بوده است، در نظر گرفته شده است. شکل (۶-۲) نمودار بودی سیستم نامعین و سیستم نامی را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲: نمودار بودی سیستم نامعین و سیستم نامی

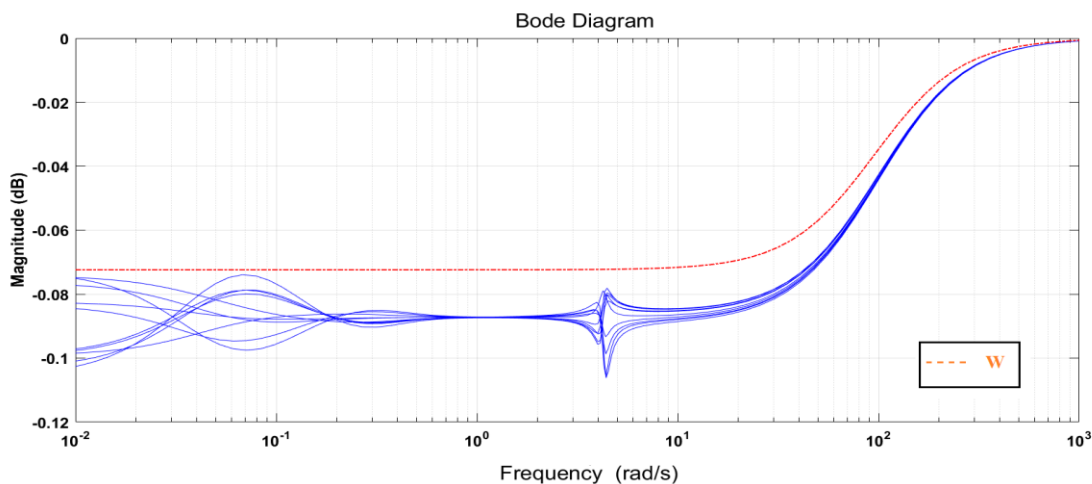
۳-۲-۶- تابع وزنی نامعینی ضربی

طبق توضیحاتی که در فصل گذشته داده شد، برای محاسبه تابع تبدیل نامعینی سیستم کافی است کران بالای شکل (۳-۶) در صفحه بعد را تعیین کنیم. برای این منظور مناسب است که تابع وزنی نامعینی ضربی به صورت رابطه (۲-۶) در نظر گرفته شود.

$$W = \frac{s^2 + 199.2s + 9917}{s^2 + 200s + 10000} \quad (2-6)$$

۴-۲-۶- تابع وزنی کارایی

فرض می‌کنیم کارایی مطلوب در سیستم در حوزه زمان با مشخصاتی از جمله زمان نشست کمتر از ۱ ثانیه و فراجهدشی کمتر از ۲۰ درصد در نظر گرفته شود. در نهایت ضریب میرایی $\zeta = 0.5$ و فرکانس طبیعی $\omega_n = 10 \text{ rad/s}$ می‌باشد. برای رسیدن به عملکرد مطلوب تابع وزنی به صورت رابطه (۳-۶) انتخاب می‌شود.



شکل ۳-۶: نامعینی محاسبه شده برای سیستم

$$W_s = a \frac{(s^2 + 10s + 100)}{(s + 0.05)(s + 10)(0.002s + 1)} \quad (3-6)$$

۶-۳- طراحی کنترل کننده توسط سنتز μ

۶-۳-۱- طراحی کنترل کننده اولیه

در این روش حل، مستقیماً مدل نامعین سیستم به کار برده می‌شود. بدین منظور از ساختار نامعین سیستم استفاده نموده و بلوک کنترل کننده را از سیستم جدا نموده و سیستم را به فرم عمومی تنظیم تبدیل می‌کنیم. تابع وزنی کارایی مورد استفاده در این طراحی به صورت رابطه (۶-۴) در نظر گرفته شده که برای ضریب تنظیم $a=1$ ، کنترل کننده سنتز μ را در ۶ تکرار بدست آوردیم که خلاصه طراحی در شکل (۶-۴) در صفحه بعد دیده می‌شود. واضح است که روش سنتز μ کنترل کننده‌ای از مرتبه ۱۸ طراحی کرده است، که بیشینه مقدار تکین ساختار یافته را از مقدار $1/232$ به مقدار $1/114$ کاهش داده است.

$$W_s = \frac{(s^2 + 10s + 100)}{(s + 0.05)(s + 10)(0.002s + 1)} \quad (4-6)$$

۶-۳-۲- بهبود طراحی

چون بیشینه μ همچنان بزرگتر از یک است، لذا کارایی مقاوم تضمین نخواهد شد. بدین منظور با در نظر گرفتن ضریب تنظیم $a=0.005$ می‌توان کنترل کننده مناسب سنتز μ را بدست آورد. در این حالت روش سنتز μ کنترل کننده‌ای از مرتبه ۱۳ طراحی کرده است. مقدار μ کوچکتر از ۱ شده است بنابراین به کارایی مقاوم دست یافته‌ایم. خلاصه طراحی در این حالت در شکل (۶-۵) دیده می‌شود.

$$W_s = 0.005 \frac{(s^2 + 10s + 100)}{(s + 0.05)(s + 10)(0.002s + 1)} \quad (5-6)$$

کنترل کننده طراحی شده به شکل چند جمله‌ای گویا بوده که به فرم برداری زیر نشان داده می‌شود.

$$C(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (6-6)$$

$$N(s) = [0 \quad 2.02 \quad 1494.49 \quad 279356.46 \quad 19514092.50 \quad 491394412.29 \\ 4246573763.52 \quad 14475288772.88 \quad 49542560627.60 \\ 88225967863.99 \quad 88457576480.73 \quad 35281904107.16 \\ 3236690544.63 \quad 88649035.05]$$

$$D(s) = [1 \quad 823.94 \quad 203250.19 \quad 23316442.06 \quad 1433100147.46 \\ 48685259698.40 \quad 822456865482.60 \\ 5505790946278.88 \quad 10221634291613.7 \quad 9421501234526.63 \\ 2376340148609.30 \quad 233884199590.12 \quad 9344102758.05 \\ 123761648.16]$$

Iteration Summary

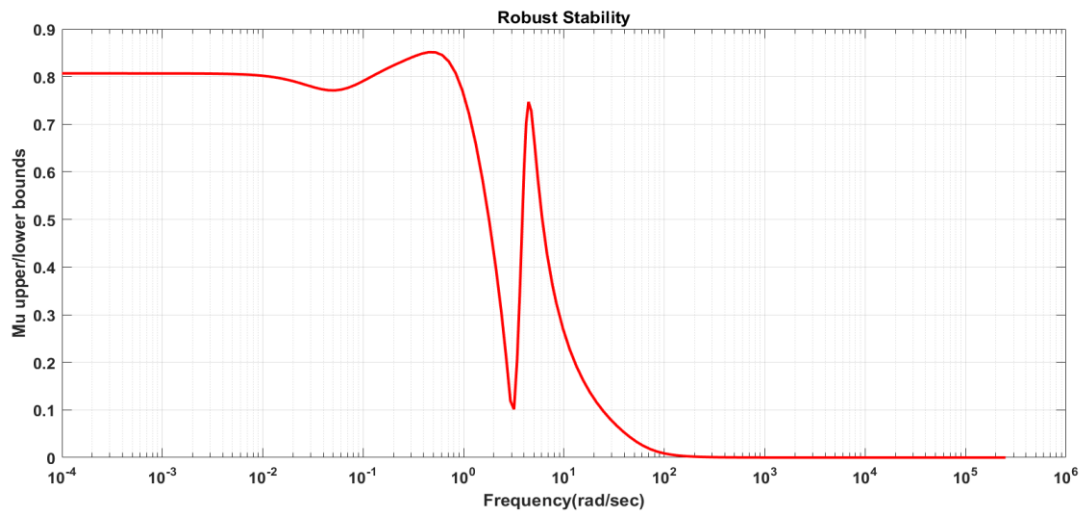
Iteration #	2	3	4	5	6
Controller Order	12	18	18	18	18
Total D-Scale Order	4	10	10	10	10
Gamma Acheived	1.233	1.114	1.165	1.205	1.228
Peak mu-Value	1.232	1.114	1.163	1.203	1.226

شکل ۶-۴: نتیجه طراحی روش D-K

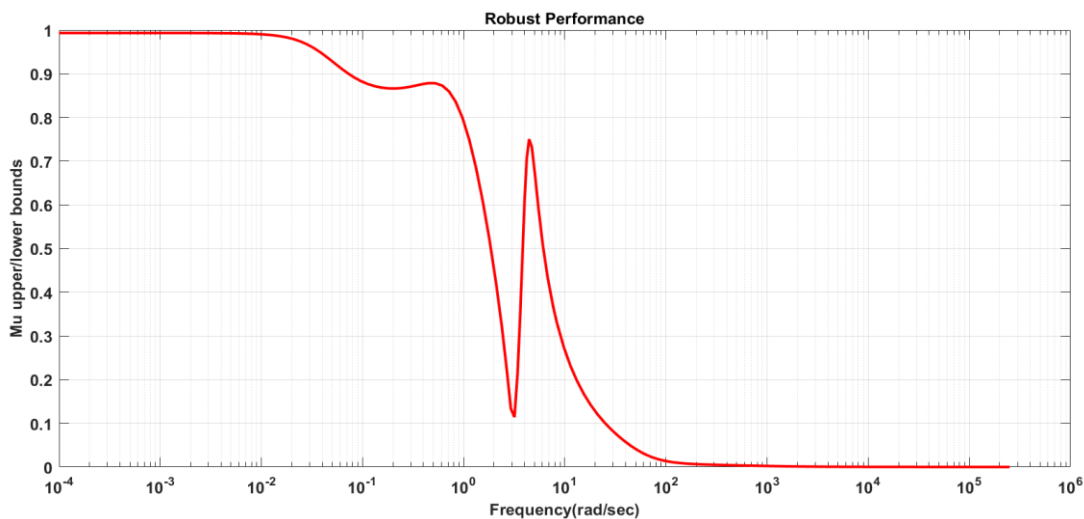
Iteration Summary

Iteration #	2	3	4	5	6
Controller Order	13	15	17	17	17
Total D-Scale Order	4	6	8	8	8
Gamma Acheived	0.994	0.998	1.001	1.000	1.000
Peak mu-Value	0.990	0.992	0.994	0.994	0.993

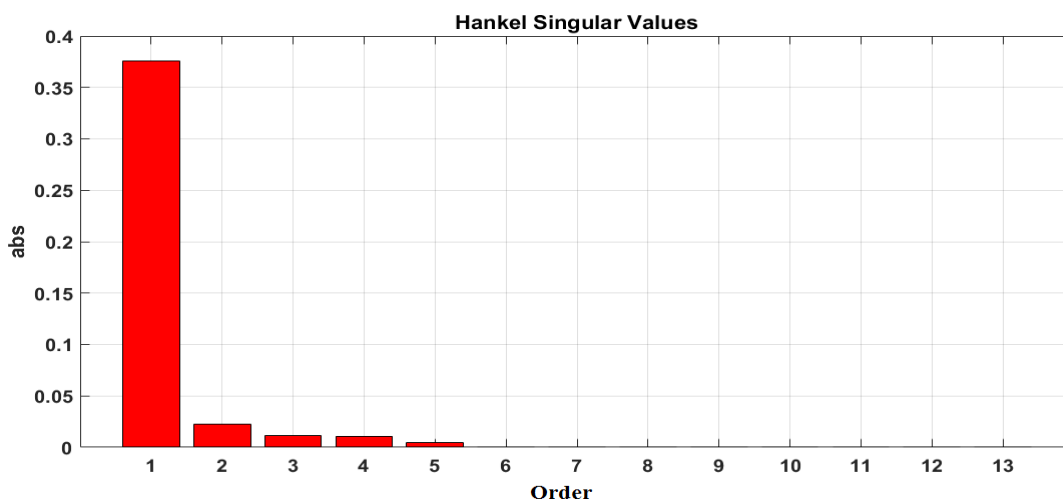
شکل ۶-۵: نتیجه طراحی روش D-K بهبود یافته



شکل ۶-۶: پایداری مقاوم کنترل کننده سنتز μ بهبود یافته با ضریب تنظیم $a=0.005$



شکل ۶-۷: کارایی مقاوم کنترل کننده سنتز μ بهبود یافته با ضریب تنظیم $a=0.005$



شکل ۶-۸: نمودار مقادیر نرم هنکل کنترل کننده حاصل از سنتز μ

۶-۳-۳- طراحی کنترل کننده کاهش یافته

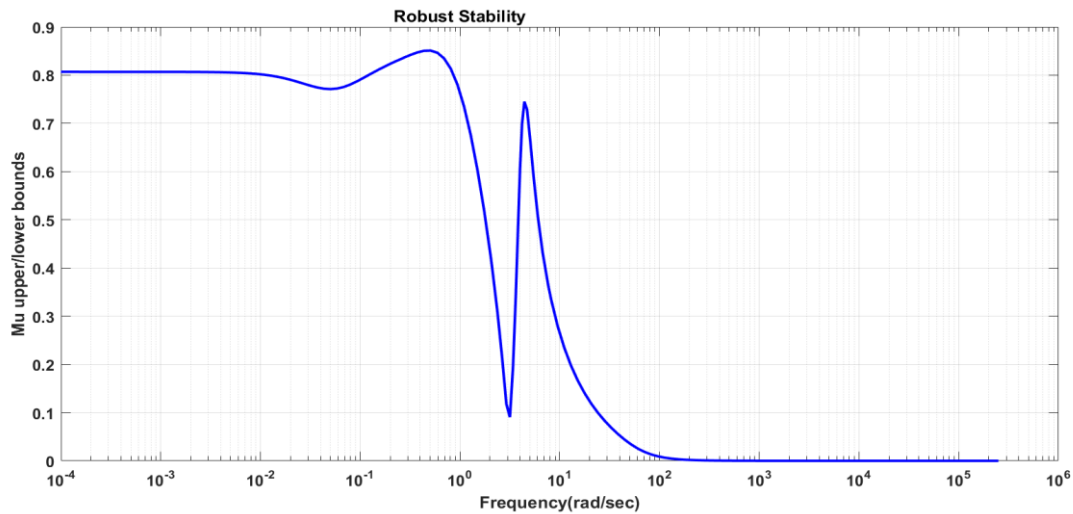
کنترل کننده طراحی شده در بخش قبل دارای مرتبه ۱۳ است. بدین منظور از روش تخمین مقادیر تکین هنکل استفاده می‌کنیم. در این نظریه کنترل، مقادیر ویژه سیستم بیانگر پایداری آن است. چنانچه در هنگام کاهش مرتبه مدل، حالت‌های با انرژی بیشتر حذف نشوند، رفتار و مشخصات سیستم بهتر حفظ و منتقل

می‌گردد. مقدار تکین هنکل را می‌توان به صورت زیر تعبیر نمود:

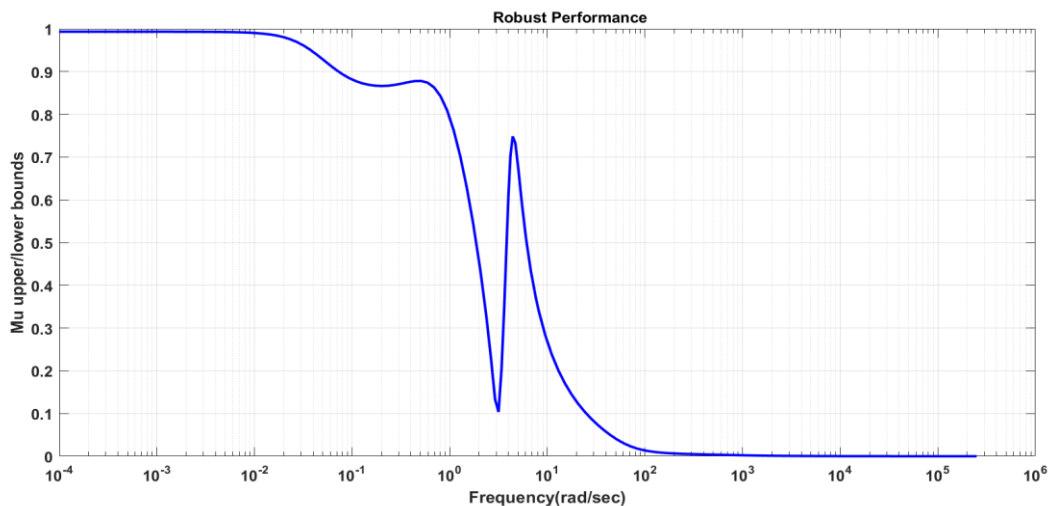
$$\sigma_H = \sqrt{\lambda_i(PQ)} \quad (7-6)$$

که در این رابطه P, Q گرامیان رویت‌پذیری و کنترل‌پذیری هستند. به منظور کاهش مرتبه آن مقادیر نرم هنکل آن را رسم می‌نمائیم. همانطور که در شکل (۶-۸) در صفحه قبل، مشاهده می‌شود مقادیر استثنایی هنکل کنترل‌کننده از درجه ۶ به بعد قابل چشم‌پوشی هستند. بنابراین می‌توان کنترل‌کننده را به مرتبه ۵ کاهش دهیم.

$$K_{D-K_Reduce}(s) = \frac{2.02s^4 + 1.961s^3 + 20.01s^2 + 12.68s + 0.9391}{s^5 + 85.02s^4 + 2837s^3 + 800s^2 + 68.94s + 1.31}$$



شکل ۶-۹: پایداری مقاوم کنترل‌کننده سنتز μ کاهش یافته با ضریب تنظیم $a=0.005$



شکل ۶-۱۰: کارایی مقاوم کنترل کننده سنتز μ کاهش یافته با ضریب تنظیم $a=0.005$

۶-۴- طراحی کنترل کننده بهینه H_∞

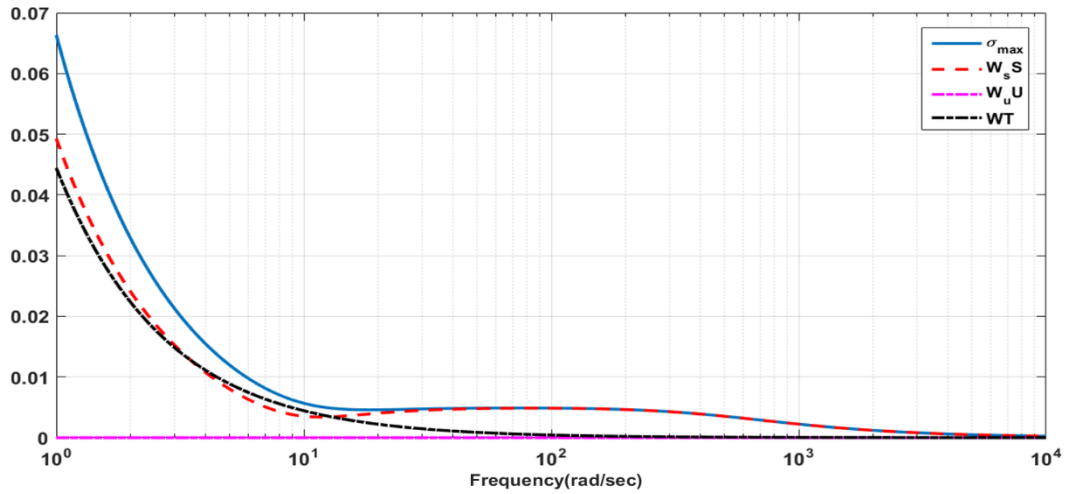
هدف از این بخش دستیابی به کنترل کننده‌ای از روش H_∞ است که ضمن تضمین پایداری مقاوم در سیستم، کارایی مناسبی داشته باشد. کنترل کننده طراحی شده در این بخش نیز از مرتبه ۹ بوده و به شکل برداری زیر می‌باشد.

$$C(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (۹-۶)$$

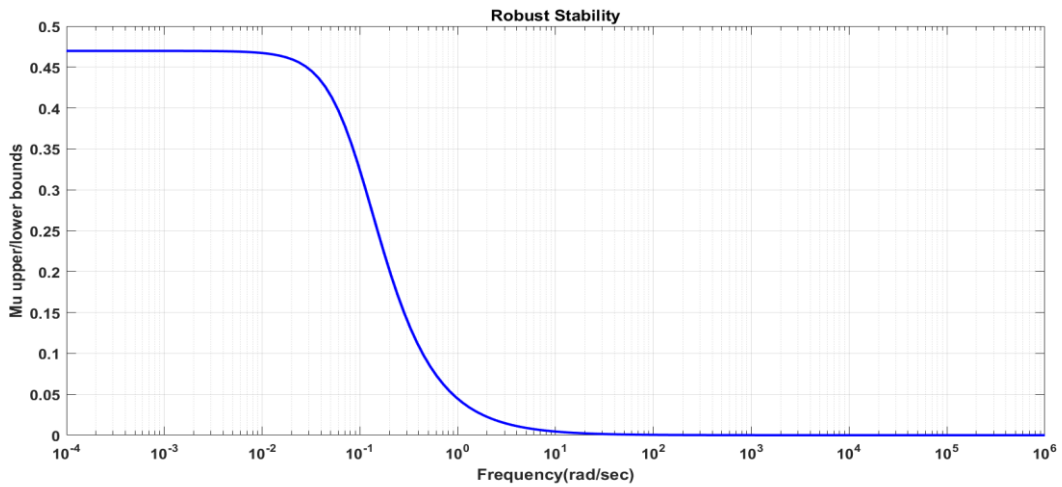
$$N(s) = \begin{bmatrix} 0 & 50.42 & 32767.85 & 5287005.47 & 276694745.36 \\ 2593021973.91 & 7243197853.54 & 43994701192.77 \\ 22506113815.20 & 5286410437.87 \end{bmatrix}$$

$$D(s) = [1 \quad 34129.30 \quad 27156748.58 \quad 6268236520.95]$$

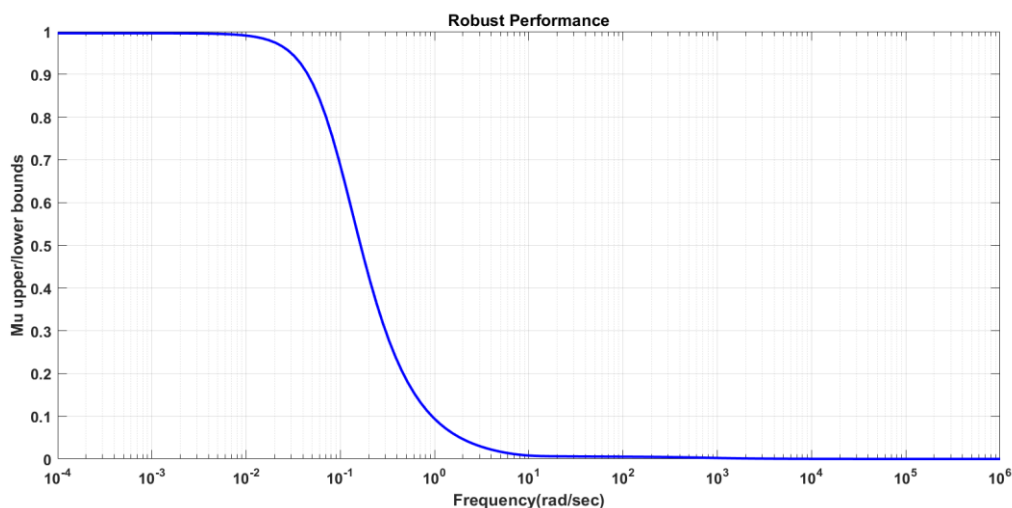
591801158022.65 21942221484734.3 169380847343132
 31573664133049.9 1873485643983.98 35775773740.21]



شکل ۶-۱۱: منحنی مقادیر تکین سیستم حلقه بسته و پاسخ فرکانسی آن به ازای $W_u = 0.001$



شکل ۶-۱۲: پایداری مقاوم کنترل کننده طراحی شده از روش H_∞



شکل ۶-۱۳: کارایی مقاوم کنترل کننده طراحی شده از روش H_∞

۶-۵- کنترل کننده پیشنهادی

کنترل کننده پیشنهادی بصورت یک کنترل کننده ساختار ثابت مرتبه دوم در نظر گرفته شده است. رابطه

(۶-۱۰) رابطه ریاضی کنترل کننده پیشنهادی را ارائه می دهد.

$$\frac{K_1 s^2 + K_2 s + K_3}{K_4 s^2 + K_5 s + 1} \quad (۶-۱۰)$$

۶-۵-۱- تعریف مسئله طراحی و نحوه کد گذاری الگوریتم هوشمند

همانطور که پیشتر اشاره شد مسئله طراحی کنترل کننده پیشنهادی بصورت یک مسئله بهینه سازی

مطرح شده است. متغیرهای مسئله مورد نظر ضرایب کنترل کننده ساختار ثابت پیشنهادی می باشند. شکل

(۶-۱۴) ساختار اعضا جمعیت الگوریتم هوشمند را نشان می دهد که در آن G_1, G_2, G_3, G_4 و G_5 ضرایب

کنترل بوده و هر یک به ترتیب K_1, K_2, K_3, K_4 و K_5 در نظر گرفته شده اند. اهداف کنترلی، بهینه کردن

معیار عملکرد مقاوم و شروط مسئله برآورده سازی شرط پایداری مقاوم و حدود مجاز برای ضرایب کنترل کننده پیشنهادی می باشد. بدین ترتیب روابط زیر بیان کننده تعریف ریاضی مسئله مورد نظر می باشد.

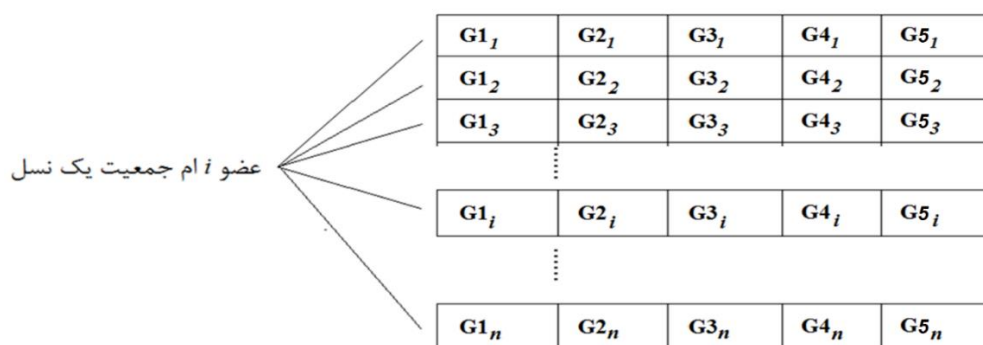
$$\text{Min}_X \|M(s)\|_{\mu} , \quad X = [G1, G2, G3, G4, G5]$$

$$\text{Subject to: } \|M_{11}(s)\| < 1$$

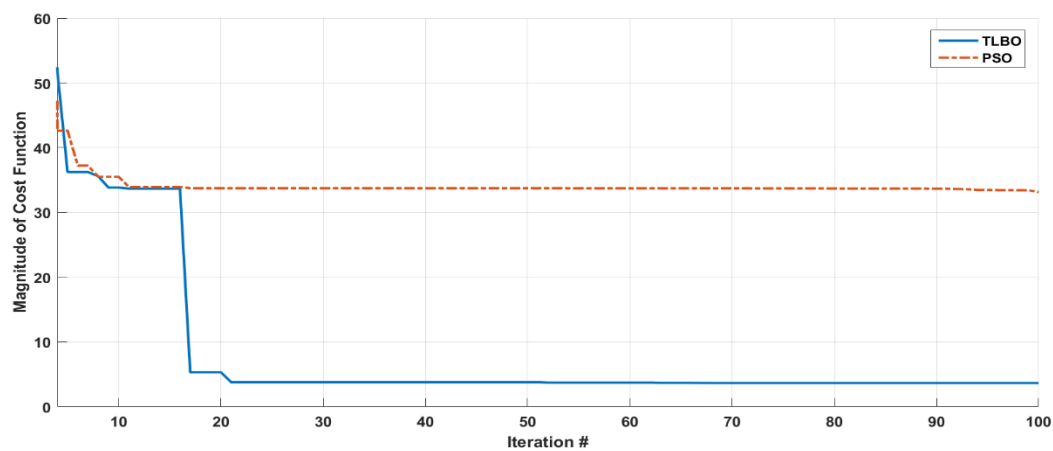
$$X < 10$$

$$0 < X$$

در روابط بالا $\|M(s)\|_{\mu}$ معرف عملکرد مقاوم کنترل کننده پیشنهادی و $\|M_{11}(s)\|$ معرف پایداری مقاوم کنترل کننده پیشنهادی می باشد.



شکل ۶-۱۴: ساختار اعضای جمعیت الگوریتم هوشمند



شکل ۶-۱۵: مقایسه مقدار تابع هزینه بهترین جواب دو الگوریتم TLBO و PSO در تکرارهای مختلف

۶-۶- مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی

در این قسمت نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی را ارائه خواهیم داد. در این پایان نامه از دو الگوریتم تکاملی TLBO و PSO برای حل مسئله طراحی کنترل کننده پیشنهادی استفاده شده است. برای هر دو الگوریتم سعی شد شرایط مشابه را در نظر بگیریم تا معیار ارزیابی عملکردی آنها با یکدیگر صحیح باشد. بدین ترتیب تعداد اعضا برای هر کدام ۱۰ عضو و تعداد تکرار نیز برای هر کدام برابر با ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. مسئله را در چندین بار مختلف و هر بار با استفاده از جمعیت اولیه مشابه توسط هر دو الگوریتم حل کردیم. در نهایت بهترین نتیجه بدست آمده برای هر کدام در نظر گرفته شده و در این قسمت ارائه می‌شود. به ترتیب رابطه (۱۱-۶) و (۱۲-۶) کنترل کننده طراحی شده از الگوریتم‌های تکاملی TLBO و PSO را نشان می‌دهد.

$$K_{TLBO} = 7.8698e-9 \frac{s}{s+0.1493} \quad (11-6)$$

$$K_{PSO}(s) = \frac{75.31(s^2 + 0.12s + 5.8)}{(s + 0.01)(s + 1383)} \quad (12-6)$$

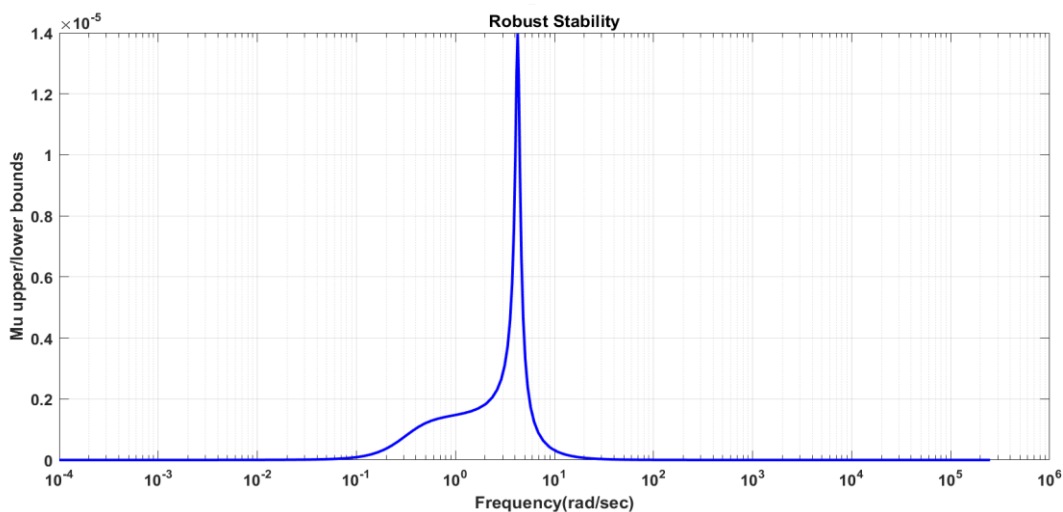
شکل (۱۵-۶) در صفحه قبل، روند جستجوی جواب بهینه برای دو الگوریتم TLBO و PSO را نشان می‌دهد. محور افقی شماره تکرار الگوریتم و محور عمودی مقدار تابع هزینه می‌باشد. به ترتیب منحنی ممتد و نقطه چین، مقدار تابع هزینه بهترین جواب هر کدام از الگوریتم‌های TLBO و PSO در هر تکرار را نشان می‌دهند.

۶-۶-۱- بررسی عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم

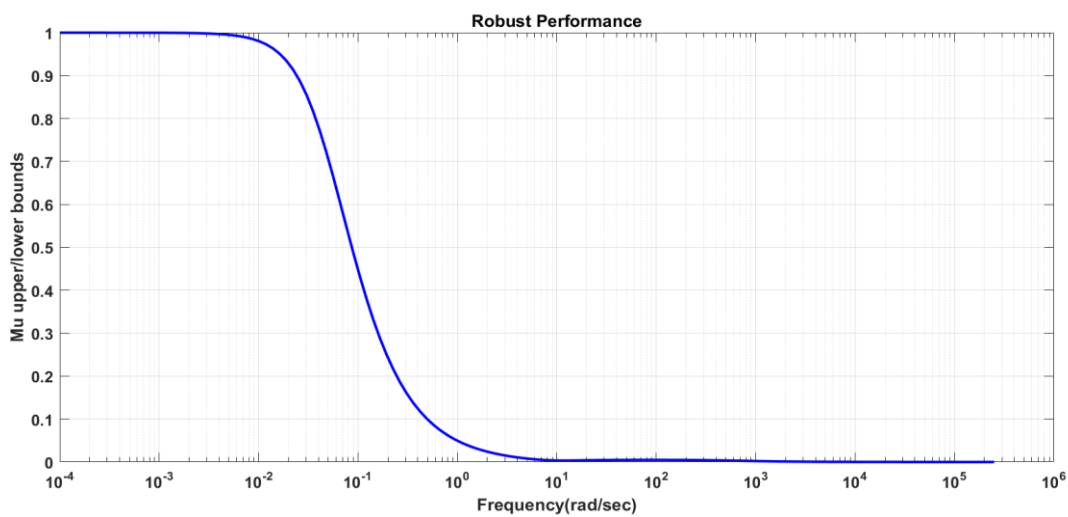
در این قسمت در ابتدا به بررسی عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم کنترل کننده‌های طراحی شده توسط دو الگوریتم TLBO و PSO می‌پردازیم و سپس معیارهای عملکردی مقاوم کنترل کننده‌های طراحی شده از

روش‌های مختلف را با هم مقایسه خواهیم کرد.

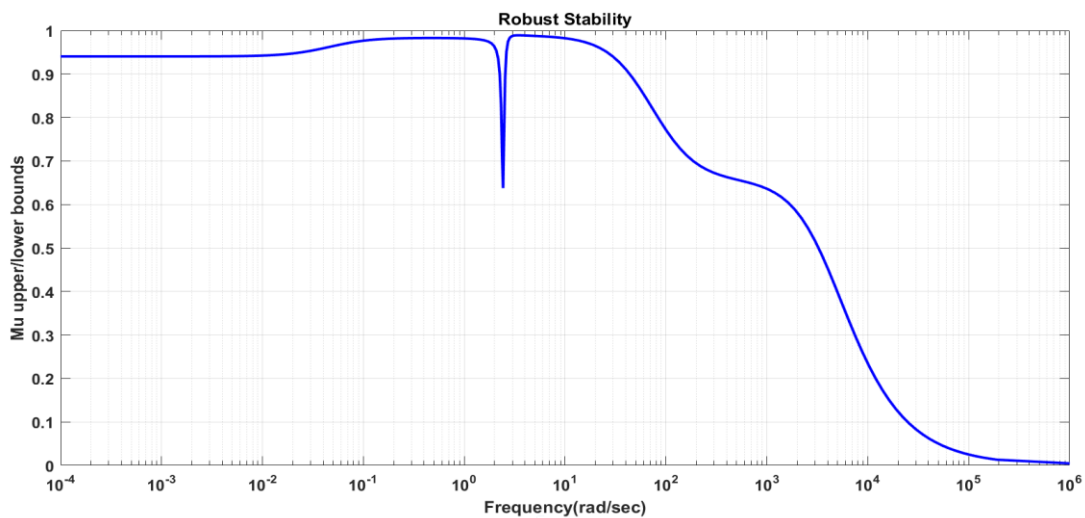
شکل‌های (۱۶-۶) و (۱۷-۶) به ترتیب معیارهای پایداری و کارایی مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش TLBO و شکل‌های (۱۸-۶) و (۱۹-۶) نیز به ترتیب معیارهای پایداری و کارایی مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش PSO را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود کنترل‌کننده طراحی توسط هر دو الگوریتم، شرط پایداری مقاوم را دارا می‌باشند.



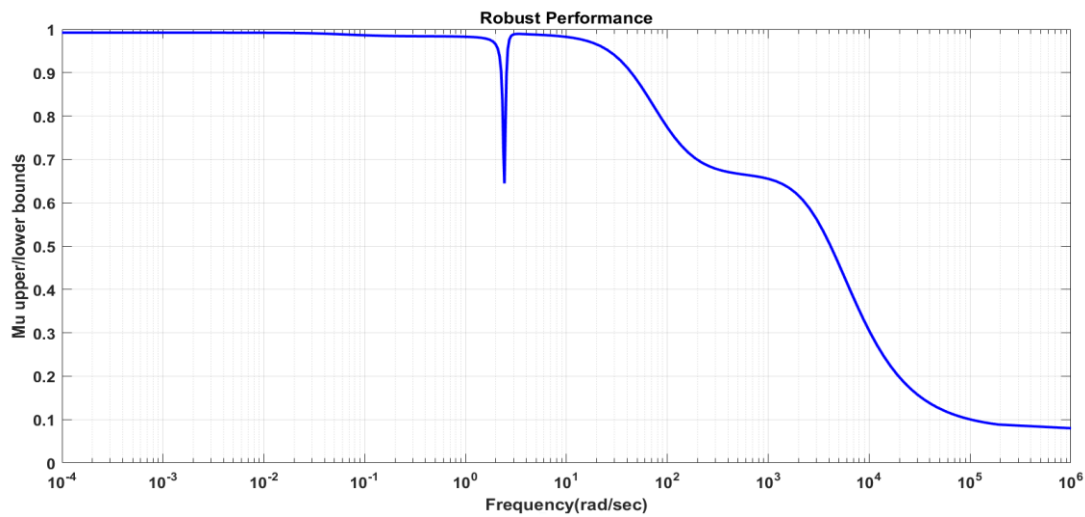
شکل ۱۶-۶: پایداری مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده از روش TLBO



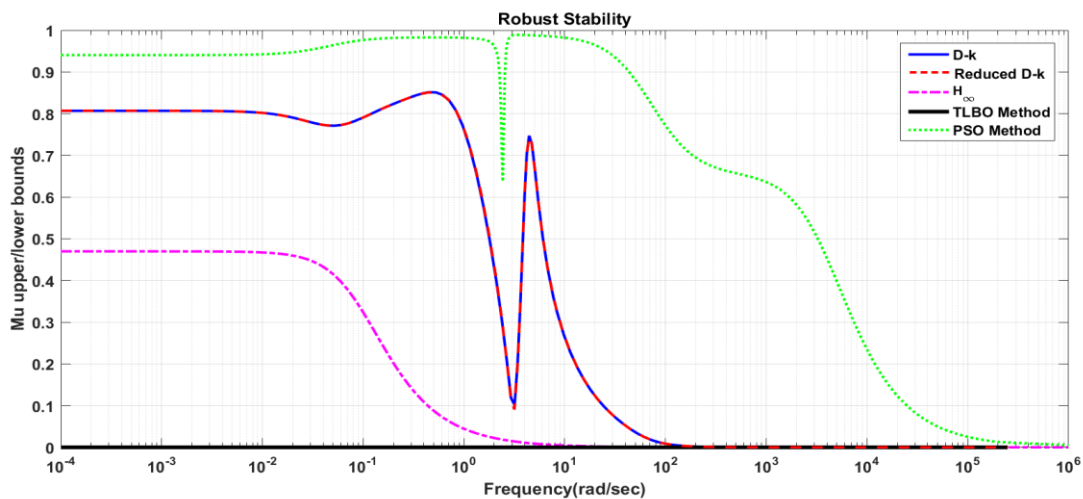
شکل ۶-۱۷: کارایی مقاوم کنترل کننده طراحی شده از روش TLBO



شکل ۶-۱۸: پایداری مقاوم کنترل کننده طراحی شده از روش PSO

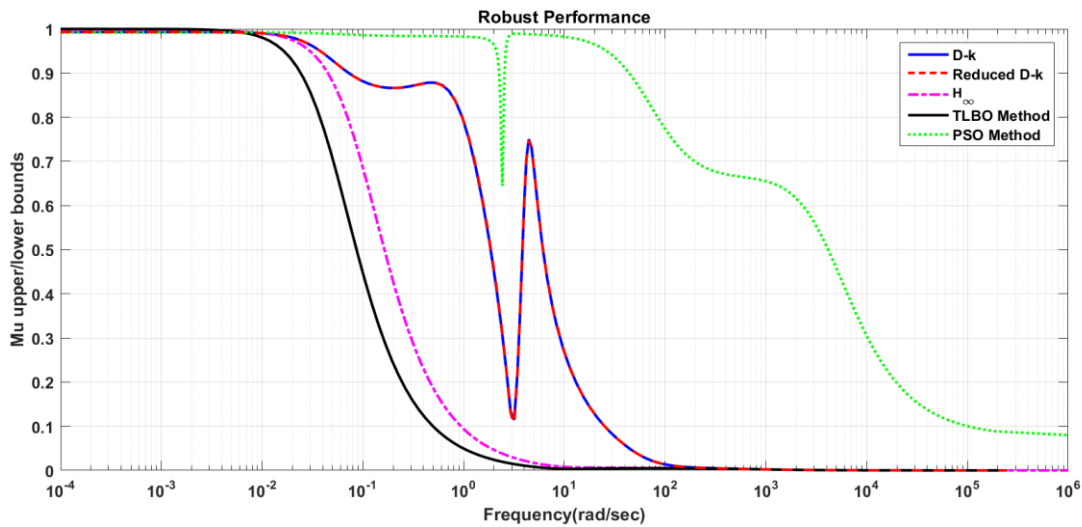


شکل ۶-۱۹: کارایی مقاوم کنترل کننده طراحی شده از روش PSO

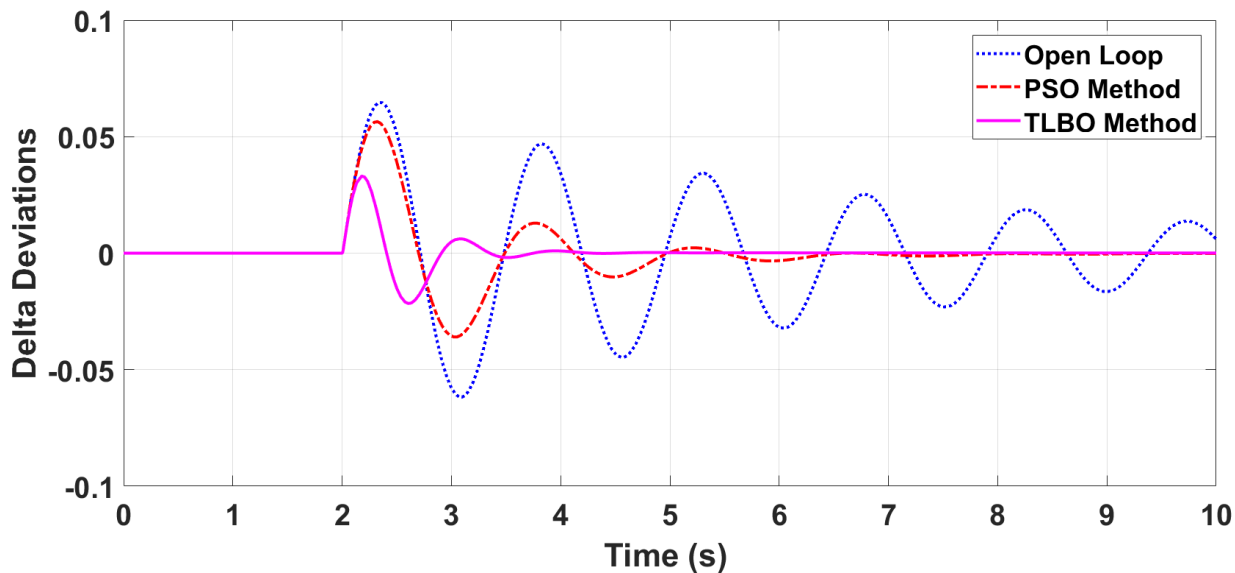


شکل ۶-۲۰: بررسی پایداری مقاوم کنترل کننده‌های طراحی شده از روش‌های مختلف

در ادامه به بررسی معیارهای کارایی و پایداری مقاوم برای کنترل‌های طراحی شده از روش‌های سنتز μ ، سنتز μ کاهش یافته، H_∞ ، PSO و TLBO خواهیم پرداخت. به ترتیب شکل‌های (۶-۲۰) و (۶-۲۱) معیار پایداری و کارایی مقاوم کنترل کننده‌های طراحی شده از پنج روش مختلف استفاده شده در این پایان‌نامه را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است کنترل کننده طراحی شده از روش TLBO از پایداری و کارایی مقاوم مطلوب‌تر نسبت به بقیه کنترل کننده طراحی شده از دیگر روش‌ها برخوردار است.



شکل ۶-۲۱: بررسی کارایی مقاوم کنترل کننده‌های طراحی شده از روش‌های مختلف



شکل ۶-۲۲: تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش

۶-۶-۲- بررسی عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش

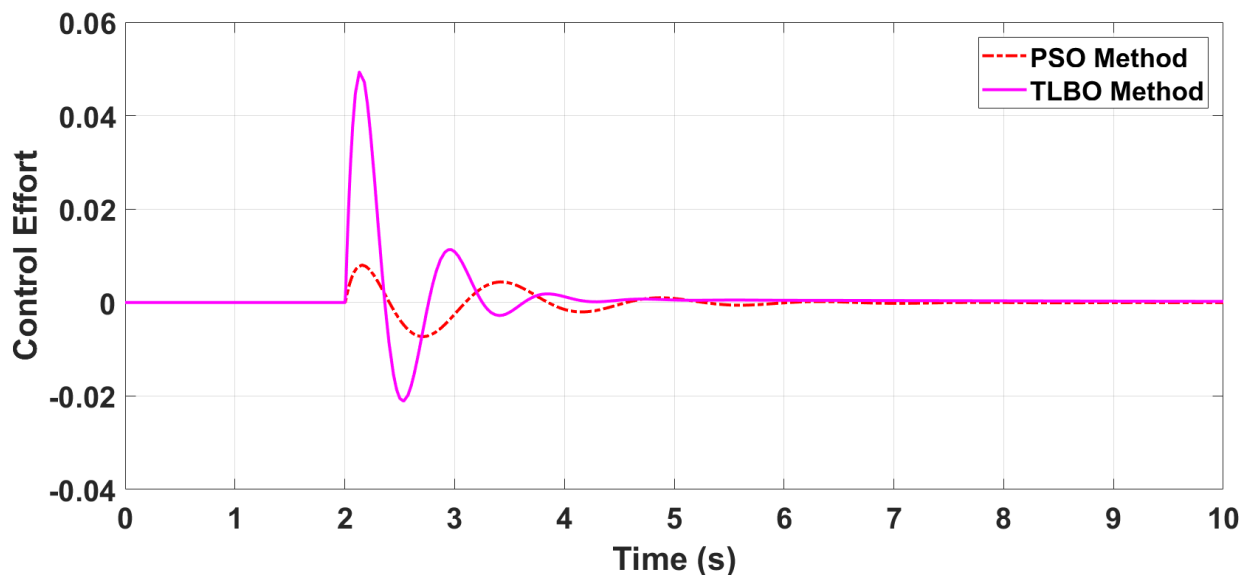
در این قسمت به بررسی عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش می‌پردازیم. اغتشاش را به صورت یک تغییر ناگهانی در توان الکتریکی با دامنه ۰/۱ پریونیت که در ثانیه دوم شبیه‌سازی اعمال می‌شود، در نظر می‌گیریم.

شکل (۶-۲۲) تغییرات سیگنال زاویه بار سیستم را در طول دوره شبیه‌سازی برای سیستم حلقه بسته و حلقه باز نشان می‌دهد. همانطور که از روی شکل مشخص است، کنترل‌کننده پیشنهادی به خوبی نوسانات سیستم را میرا و پایداری آن را بهبود بخشیده است.

شکل (۶-۲۳) تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، تلاش کنترلی در کنترل‌کننده طراحی شده با روش TLBO بیشتر از کنترل‌کننده طراحی شده از روش PSO می‌باشد. مقدار مساحت زیر نمودار قدر مطلق سیگنال تلاش کنترلی به ترتیب برای کنترل‌کننده های طراحی شده از روش PSO و TLBO برابر با ۰/۷۷ و ۰/۲۸ می‌باشند.

۶-۶-۳- بررسی عملکرد سیستم در تغییر پارامتر سیستم

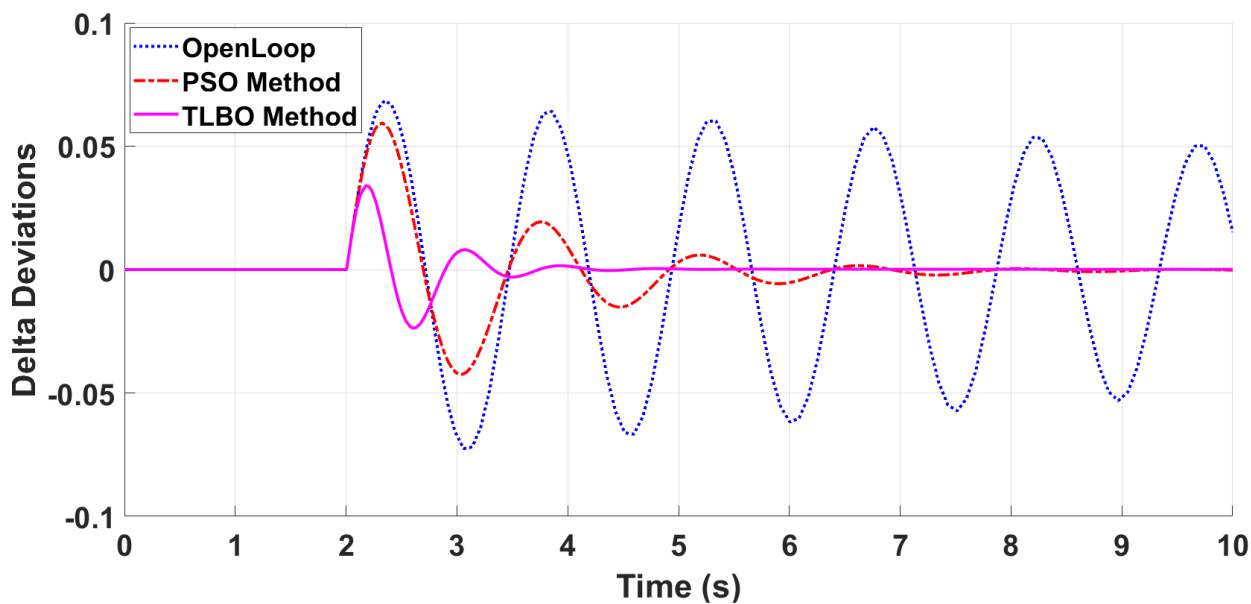
در این قسمت به بررسی عملکرد سیستم نسبت به تغییر در ضریب میرایی سیستم می‌پردازیم. در این قسمت نیز برای تحلیل پایداری همانند قسمت قبل به سیستم اغتشاش می‌دهیم با این تفاوت که در ابتدا



شکل ۶-۲۳: تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش

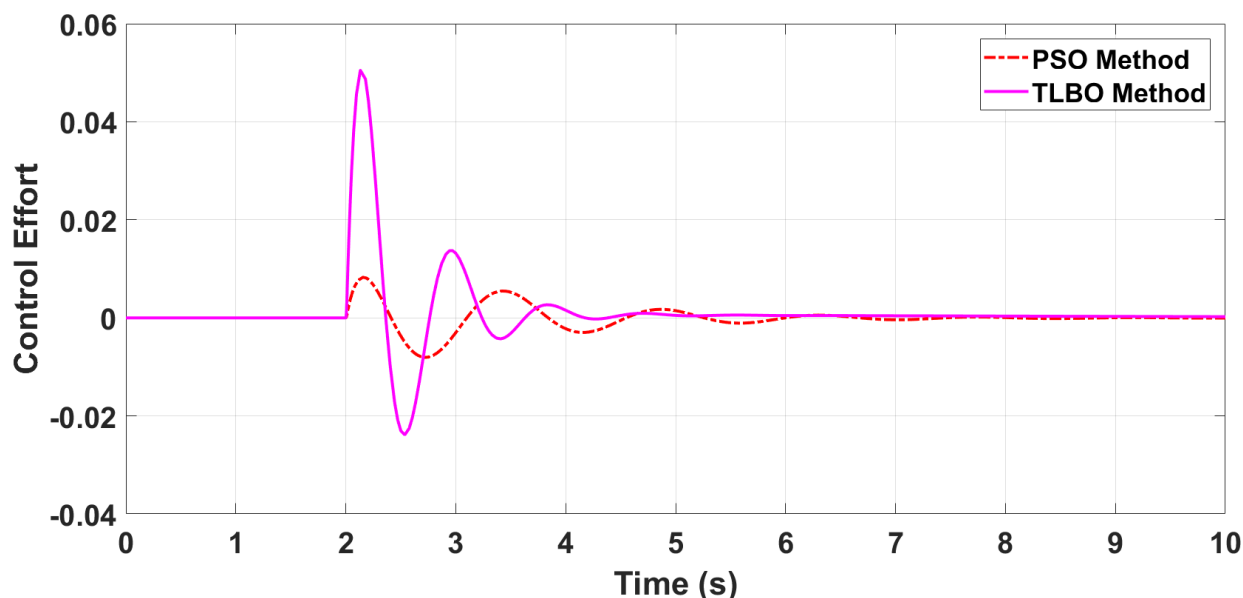
مقدار ضریب میرایی سیستم را تغییر داده و سپس شبیه‌سازی اغتشاش صورت خواهد گرفت. به ترتیب شکل‌های (۶-۲۴) تا (۶-۲۹) تغییرات سیگنال زاویه بار و تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش را برای سیستم در حالت‌های کاهش ضریب میرایی به ۰ و ۲ و افزایش آن به ۶ را نشان می‌دهد.

در شکل (۶-۲۴) مشخص است که با کم کردن ضریب میرایی سیستم از ۴ به ۲ نوسانات سیستم پس از بروز اغتشاش بیشتر شده است. با در نظر گرفتن ضریب میرایی صفر برای سیستم مشاهده می‌شود که سیستم ناپایدار شده و نوسانات سیستم پس از وقوع اغتشاش برای سیستم حلقه باز دیگر میرا نمی‌شوند. این در حالی است که کنترل‌کننده پیشنهادی در هر دو حالت بخوبی نوسانات سیستم را میرا می‌کند. با افزایش ضریب میرایی سیستم از ۴ به ۶، میرایی سیستم حلقه باز به علت افزایش ضریب میرایی سیستم بهبود می‌یابد و در این حالت نیز سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده TLBO پاسخ بهتری به ما می‌دهد.

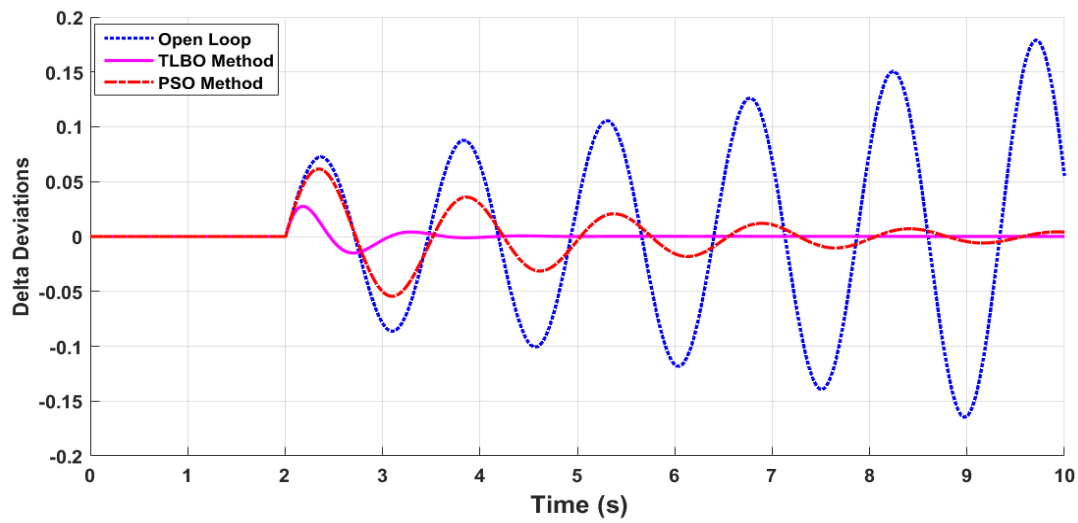


شکل ۶-۲۴: تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی دو

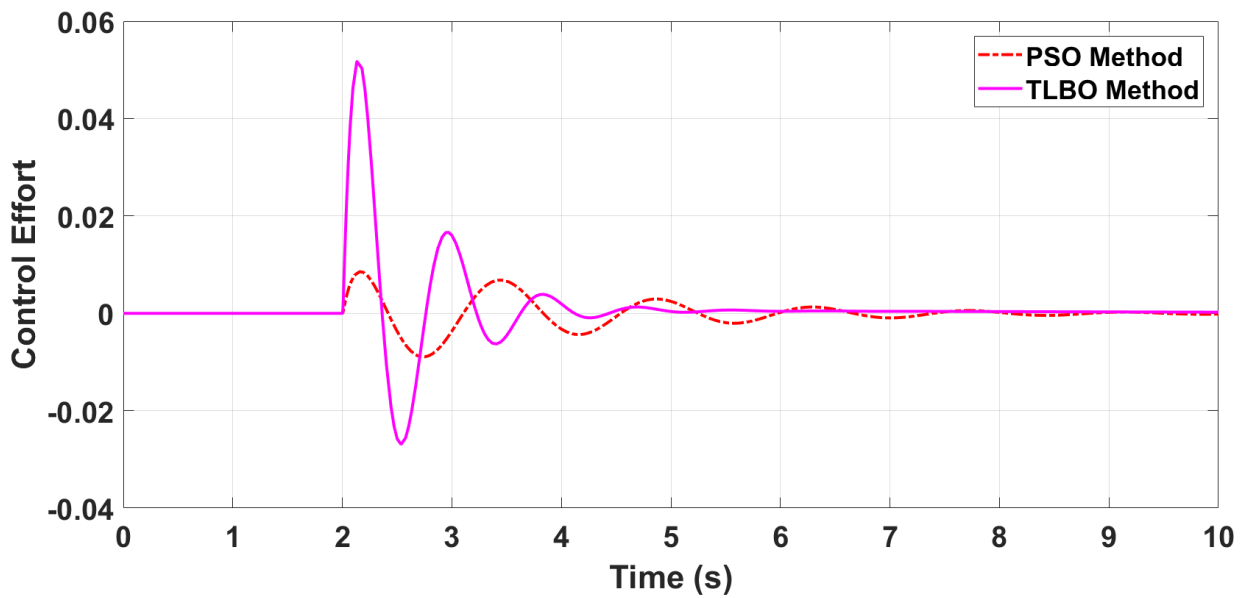
شکل (۶-۲۵) در صفحه بعد، تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی دو را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، در این حالت نیز تلاش کنترلی در کنترل کننده طراحی شده با روش TLBO بیشتر از کنترل کننده طراحی شده از روش PSO می‌باشد. مساحت زیر نمودار قدر مطلق سیگنال تلاش کنترلی به ترتیب برای کنترل کننده‌های طراحی شده از روش TLBO و PSO برابر با ۰/۸۴ و ۰/۳۵ می‌باشند. با توجه به مقدار بدست آمده در قسمت قبل مشاهده می‌شود. تلاش کنترلی در این قسمت بیشتر شده است که این موضوع به علت کم شدن میرایی ذاتی سیستم می‌باشد.



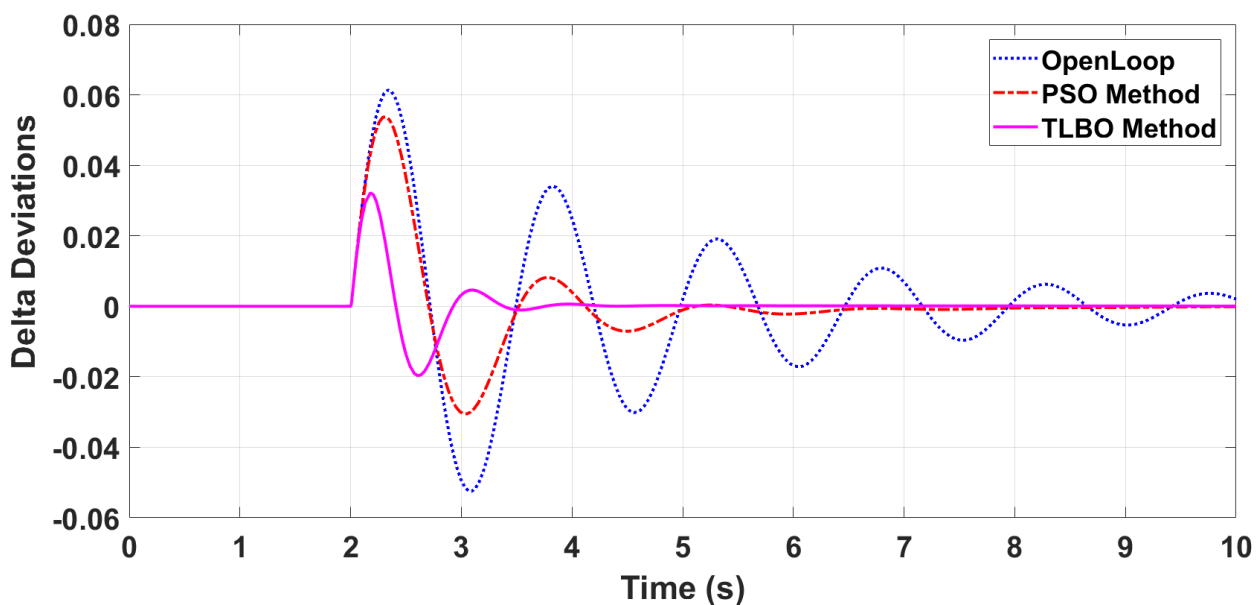
شکل ۶-۲۵: تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی دو



شکل ۶-۲۶: تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی صفر

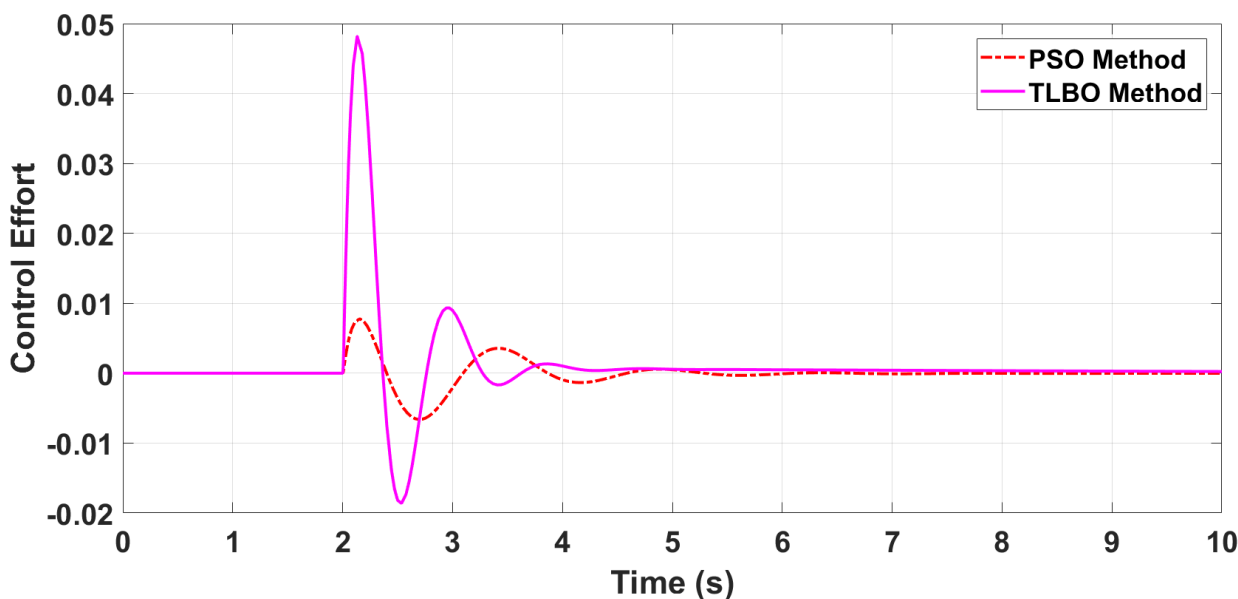


شکل ۶-۲۷: تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی صفر



شکل ۶-۲۸: تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی شش

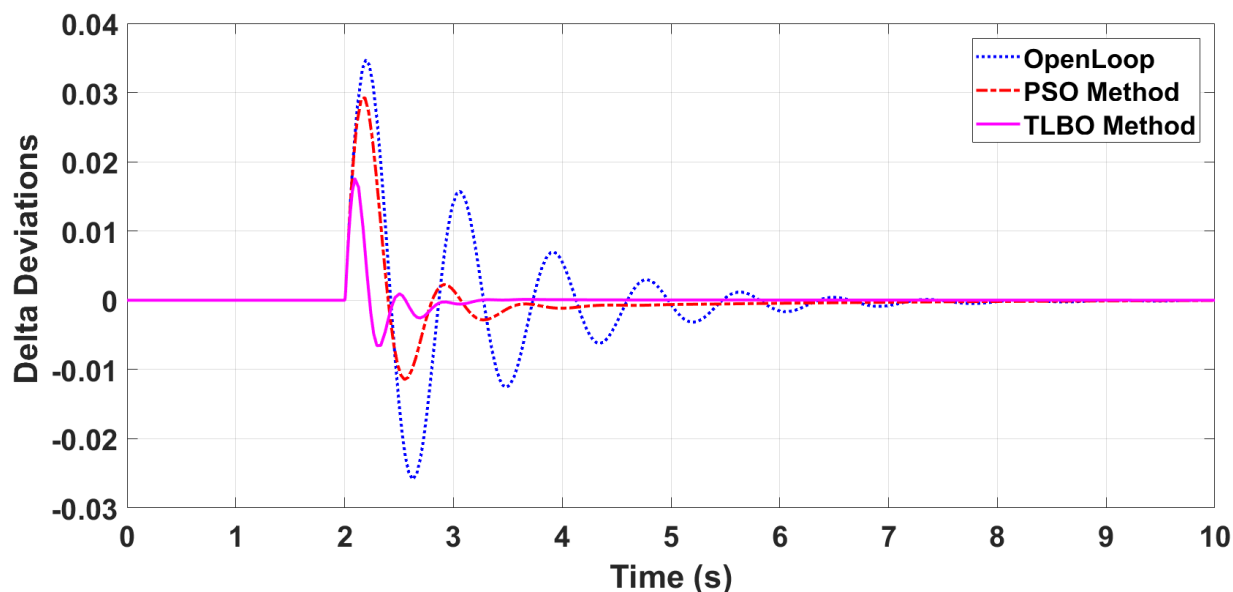
شکل (۶-۲۷) تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی صفر را نشان می‌دهد. در این حالت، مقدار مساحت زیر نمودار قدر مطلق سیگنال تلاش کنترلی به ترتیب برای کنترل‌کننده‌های طراحی شده از روش TLBO و PSO برابر با ۰/۹۳ و ۰/۴۶ می‌باشند که نسبت به دو حالت قبل بیشتر می‌باشد.



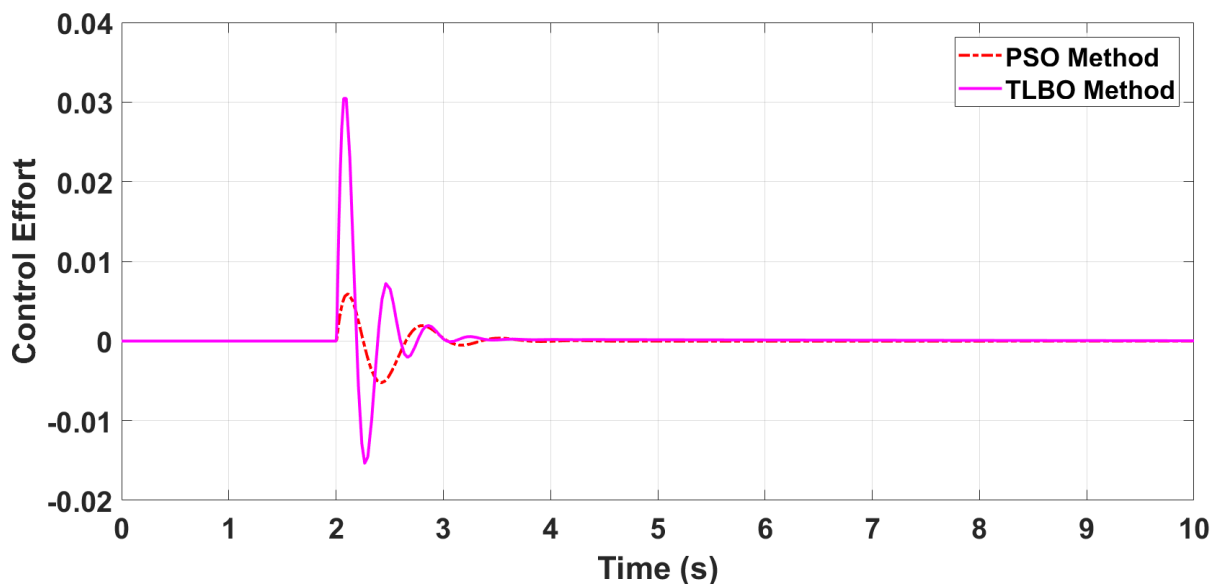
شکل ۶-۲۹: تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی شش

شکل (۶-۲۹) تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با ضریب میرایی شش را نشان می‌دهد. در این حالت، مقدار مساحت زیر نمودار قدر مطلق سیگنال تلاش کنترلی به ترتیب برای کنترل‌کننده‌های طراحی شده از روش TLBO و PSO برابر با $0/71$ و $0/24$ می‌باشند. این مقادیر تلاش کنترلی کمترین مقادیر بدست آمده نسبت به بقیه مقادیر تلاش کنترلی می‌باشد چرا که در این حالت سیستم دارای بیشترین میرایی نسبت به بقیه حالت‌های مورد آزمایش داراست.

حال در این قسمت به بررسی عملکرد سیستم نسبت به تغییر در ثابت اینرسی سیستم می‌پردازیم. در این قسمت نیز مانند حالت قبل عمل می‌کنیم. بدین صورت در ابتدا مقدار ثابت اینرسی سیستم را تغییر داده و سپس شبیه‌سازی اغتشاش صورت خواهد گرفت. به ترتیب شکل‌های (۶-۳۰) تا (۶-۳۳) تغییرات سیگنال زاویه بار و تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم در حالت‌های کاهش ثابت اینرسی به ۱ و افزایش آن به ۵ را نشان می‌دهد.



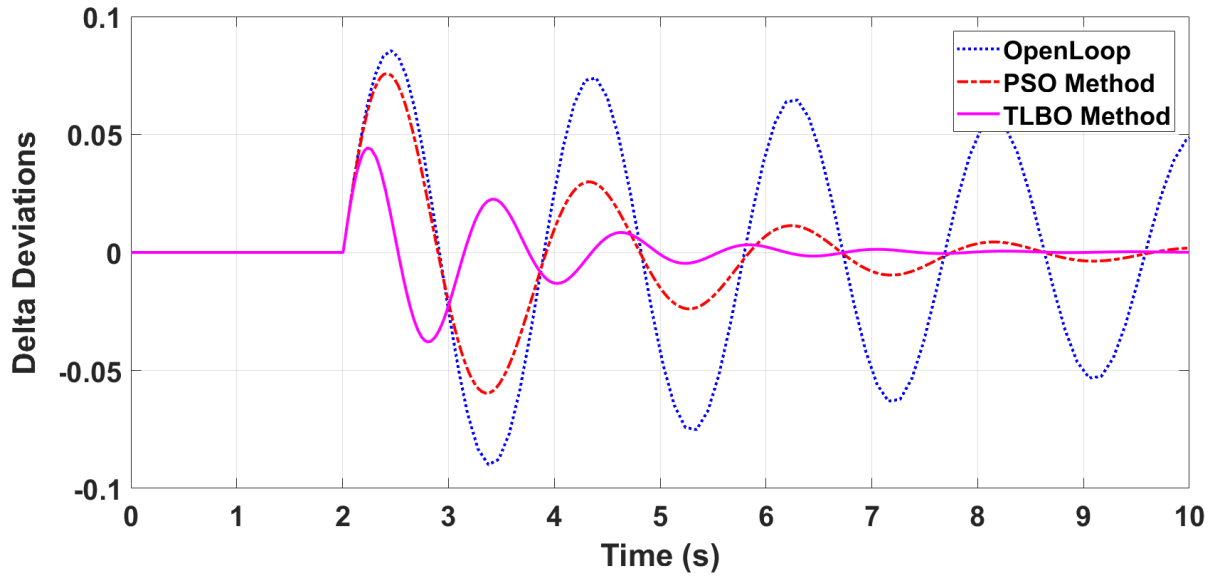
شکل ۳۰-۶: تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با $H=1$



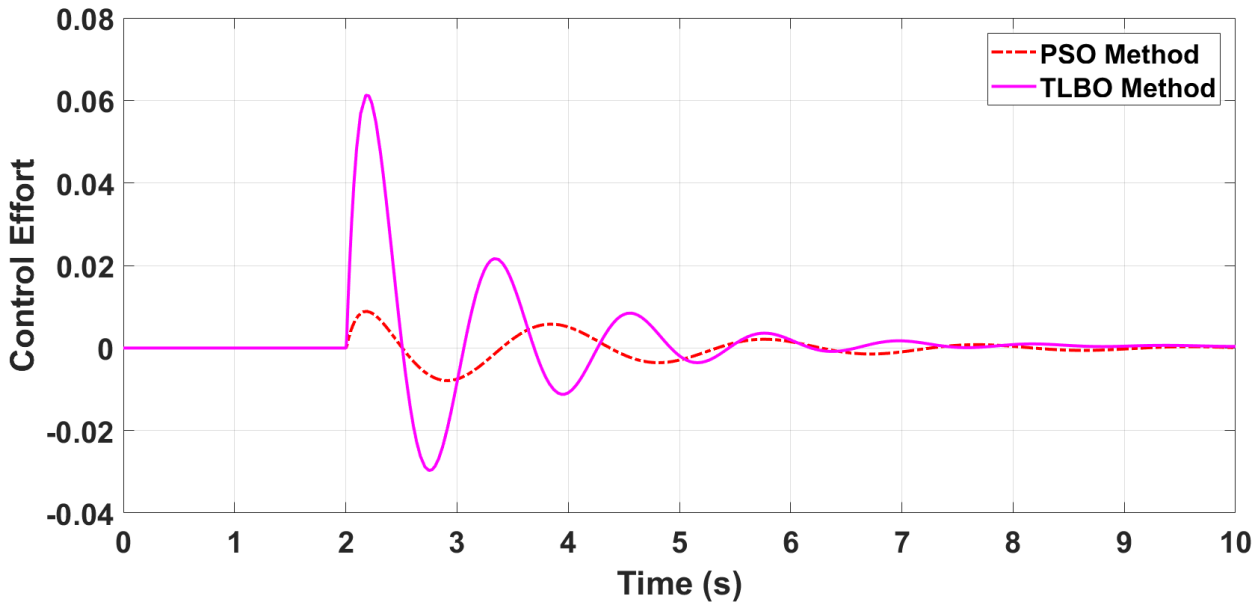
شکل ۳۱-۶: تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با $H=1$

در شکل (۳۰-۶) مشخص است که با کم کردن ثابت اینرسی سیستم از ۳ به ۱، سیستم حلقه بسته با کنترل کننده TLBO دارای فراجهدش کمتر و همچنین سرعت میرایی بالاتری نسبت به بقیه دارا می‌باشد. در شکل (۳۲-۶) با افزایش ثابت اینرسی سیستم از ۳ به ۵، نوسانات سیستم پس از وقوع اغتشاش برای سیستم حلقه باز و سیستم حلقه بسته با کنترل کننده PSO به کندی میرا می‌شود. در این حالت نیز

سیستم حلقه بسته با کنترل کننده TLBO پاسخ بهتری به ما می دهد.



شکل ۶-۳۲: تغییرات سیگنال زاویه بار پس از بروز اغتشاش برای سیستم با $H=5$



شکل ۶-۳۳: تغییرات سیگنال تلاش کنترلی پس از بروز اغتشاش برای سیستم با $H=5$

نتیجه‌گیری

۷-۱- مقدمه

امروزه به دلیل گسترده شدن شبکه‌های قدرت و در پی آن افزایش نوسانات و عدم قطعیت‌های موجود در این سیستم، نیاز به پایداری در آن امری غیرقابل اجتناب و حیاتی می‌باشد. استفاده از ادوات FACTs برای بهبود پایداری شبکه‌های قدرت امری موثر به شمار می‌آید. از جمله این ادوات می‌توان به تجهیز STATCOM اشاره کرد که در جهت افزایش پایداری و تنظیم ولتاژ شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور بهبود میرایی نوسانات در شبکه قدرت همواره نیازمند به طراحی کنترل‌کننده‌ای هستیم که ضمن پایداری سیستم، سطحی از کارایی را در حضور اغتشاش سیگنال‌ها، تداخلات نویزها، دینامیک‌های مدل نشده سیستم و تغییرات پارامترهای سیستم فراهم آورد. تحقق این نوع طراحی از کنترل‌کننده‌ها از روش کنترل مقاوم صورت می‌پذیرد.

در این پایان‌نامه به طراحی کنترل‌کننده مقاوم برای تجهیز STATCOM جهت دستیابی به سطح مطلوبی از پایداری در برابر نوسانات شبکه سیستم قدرت پرداخته شده است. طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی بر مبنای آنالیز سنتز μ و بر مبنای یک مسئله بهینه‌سازی مطرح شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی بصورت ساختار ثابت فرض شده و تضمین ضرایب کنترل‌کننده به عنوان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. برای حل مسئله پیشنهادی از الگوریتم تکاملی هوشمند یادگیری بر مبنای آموزش (TLBO) استفاده کرده‌ایم و طرح کنترلی پیشنهادی نیز با روش‌های سنتز μ D-K، سنتز μ D-K کاهش یافته و H_{∞} مقایسه شد. در نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، برتری کنترل‌کننده پیشنهادی قابل مشاهده می‌باشد. برای ادامه کار پیشرو می‌توان به سه مورد زیر اشاره کرد.

- (۱) به کارگیری دیگر روش‌های کنترل مقاوم و طراحی کنترل‌کننده بر مبنای آنها.
- (۲) استفاده از دیگر الگوریتم‌های هوشمند در جهت حل مسئله پیشنهادی و مقایسه نتایج.

۳) بررسی و طراحی کنترل کننده برای دیگر تجهیزات FACTs.

مراجع

- [1] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, USA, 1994.
- [2] E. Acha, C. R. Fuerte, H. Ambriz, C. Camach, "FACTs Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [3] Li Wang and Zon-Yan Tsai. Stabilization of generator oscillations using a pid statcon damping controllers and pid power system stabilizers. IEEE Engineering society, winter meeting, 1:616-621, 1999.
- [4] Marcelo G. Molina, Pedro E. Mercado, "Primary frequency control of multi-machine power systems with STATCOM-SMES" Electrical Power and Energy Systems vol. 44, pp 388–402, 2013
- [5] H.F. Wang and F.Li, "Design of STATCOM multivariable sampled regulator", IEEE conference on electric utility deregulation and power technologies, April 2000.
- [6] M.F.Kandlawala, "Investigation of dynamic behavior of power system installed with STATCOM", A thesis submitted to university of King Fahd University of Petroleum and Minerals, December 2001.
- [7] Y. Xu and F. Li, "Adaptive PI control of STATCOM for voltage regulation," IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 3, pp. 1002–1011, Jun. 2014
- [8] T. Eswaran, V. Suresh Kumar. "Particle swarm optimization (PSO)-based tuning technique for PI controller for management of a distributed static synchronous compensator for improved dynamic response and power quality" Journal of Applied Research and Technology, vol. 15, pp 173–189, 2017
- [9]- S.M. Abd-Elazim, E.S. Ali, "Imperialist competitive algorithm for optimal STATCOM design in a multimachine power system" Electrical Power and Energy Systems, vol 76, pp 136–146, 2016
- [10] Rajesh Gupta, Arindam Ghosh, "Frequency-Domain Characterization of Sliding Mode Control of an Inverter Used in DSTATCOM Application" IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: REGULAR PAPERS, VOL. 53, NO. 3, MARCH 2006
- [11] Sangram Keshari Routraya ,Niranjan Nayaka, Pravat Kumar Routa, "A Robust Fuzzy Sliding Mode Control Design for Current Source Inverter based STATCOM Application"

Procedia Technology 4, pp 342 – 349, 2012.

[12] K. Wang and M. L. Crow, "Power System Voltage Regulation via STATCOM Internal Nonlinear Control," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 3, pp. 1252-1262, 2011.

[13] Z.Yao, P.Kesimar, N.lacchivin and V.rajagopalan, "Nonlinear control for STATCOM based on differential algebra", IEEE specialist conference 1, pp 323- 334, 1998.

[14] Q. Su, W. Quan, W. Quan, G. Cai and J. Li, "Improved robust adaptive backstepping control approach on STATCOM for non-linear power systems," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 13, pp. 3428-3437, 9 7 2017.

[15] Yonghao Gui, Wonhee Kim, and Chung Choo Chung, "Passivity-Based Control With Nonlinear Damping for Type 2 STATCOM Systems" IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 31, NO. 4, Jul 2016.

[16] M. Bakhshi, M. H. Holakooie, A. Rabiee, "Fuzzy based damping controller for TCSC using local measurements to enhance transient stability of power systems" International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 85, pp. 12-21, Feb 2017.

[17] H. Werner, P. Korba, and T. C. Yang, "Robust tuning of power system stabilizers using LMI-techniques," IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 11, no. 1, pp. 147–152, Jan. 2003.

[18] A. H. M. A. Rahim, S. A. Al-Baiyat and H. M. Al-Maghrabi, "Robust damping controller design for a static compensator," in IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, no. 4, pp. 491-496, Jul 2002.

[19] M. M. Farsangi, Y. H. Song, W. L. Fang, X. F. Wang, "Robust FACTS control design using the H_{∞} loop-shaping method" - IEE Proceedings-Generation, IET, 2002.

[20] L. Sun and Y. Zhao, "A novel nonlinear adaptive robust control for multi-machine power system with STATCOM," 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Chongqing, pp. 63-67, 2017.

[21] A.H.M.A.Rahim, S.A.Al-Baiyat, F.M.Kandlawala, "A robust STATCOM controller for power system dynamic performance enhancement" IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, pp.887-892, July 2001.

[22] Y. Han, Y. O. Lee, and C. C. Chung, "Modified non-linear damping of internal

dynamics via feedback linearization for static synchronous compensator,” IET Gen. Transm. Distrib., vol. 5, no. 9, pp. 930–940, 2011.

[23] C. Li, J. Deng and X. P. Zhang, "Coordinated design and application of robust damping controllers for shunt FACTS devices to enhance small-signal stability of large-scale power systems," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 3, no. 4, pp. 399-407, Dec. 2017.

[24] A. H. M. A. Rahim and M. F. Kandlawala, “Robust STATCOM voltage controller design using loop-shaping technique,” Elect. Power Sys. Res., vol. 68, no. 1, pp. 61–74, Jan. 2004.

[25] M. El-Moursi and A. Sharaf, “Novel controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for voltage regulation and reactive power compensation,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 4, pp. 1985–1997, Nov. 2005.

[26] Y. YU, Chen, H. Yimgoduo, “STATCOM modelling and analysis in damping power system oscillations”, Energy conversion engineering conference and exhibit, 2000. (IECEC) 35th intersociety volume 2, page(s) 756- 762 vol.2, 24-28 July 2000.

[27] L. Cong and Y. Wang, “Co-ordinated control of generator excitation and STATCOM for rotor angle stability and voltage regulation enhancement of power systems,” Proc. Inst. Elect. Eng., Gen Transm. Distrib., vol. 149, no. 6, pp. 659–666, Nov. 2002.

[28] E. B. Martínez, C. Á. “Camacho Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection”, Journal of Applied Research and Technology, Vol. 15, Issue 1, pp. 36-44, Feb 2017.

[29] L. Wang and Z. Tsai. “Stabilization of generator Oscillations using a PID statcon damping controllers and power system stabilizers,” IEEE Engineering society, pp. 616-621, 1999.

[30] M. Beza and M. Bongiorno, "An Adaptive Power Oscillation Damping Controller by STATCOM with Energy Storage," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 1, pp. 484-493, 2015.

[31] C. Liu, Y. Hsu, "Design of a Self-Tuning PI Controller for a STATCOM Using Particle Swarm Optimization," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 2, pp. 484-493, Feb. 2010.

[32] M. A. Golkar and M. Zarringhalami, "Coordinated Design of PSS and STATCOM

Parameters for Power System Stability Improvement Using Genetic Algorithm," Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 8, no. 2, 2009.

[33] S.M. Abd Elazim, E.S. Ali, "Optimal SSSC design for damping power systems oscillations via Gravitational Search Algorithm, " International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 82, pp. 161–168, 2016.

[۳۴] کراری، مهدی، " دینامیک و کنترل سیستم های قدرت " انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، چاپ هفتم، ۱۳۹۴

[35] A. Safari*, A. Ahmadian, M. A. A. Golkar "Controller Design of STATCOM for Power System Stability Improvement Using Honey Bee Mating Optimization" University of Technology, Tehran, Iran, 2013.

[۳۶] خاکی صدیق، علی، " سیستم های کنترل خطی " انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ دوم، ۱۳۸۱

[۳۷] تقی راد، حمیدرضا، "طراحی کنترل مقاوم H_{∞} ، انتشارات خواجه نصیر، چاپ دوم، ۱۳۹۳

[38] D. W. Gu, P.H. Petkov and M. M. Konstantinov; "Robust Control Design with Matlab", 2nd edition. Springer, 2013

[39] J.C. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum; "Feedback Control Theory", Macmillan Publishing Co, 1990

[40] M. Green, D. J. N. Limebeer, "Linear Robust Control", Dover Publications, 2012.

[41] Rao, R. V., V. J. Savsani, and D. P. Vakharia. "Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems." Computer-Aided Design 43.3, p.p 303-315, 2011.

[42] M.A. Abido. "Analysis and assessment of STATCOM-based damping stabilizers for power system stability enhancement." Electric Power Systems Research, Vol. 73, pp. 177–185, 2005.

[43] H. F. Wang, "Phillips-Heffron model of power systems installed with STATCOM and applications," in IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 146, no. 5, pp. 521-527, Sep 1999.

Abstract

The aim of this study is a robust controller design of Static Synchronous Compensator (STATCOM) to achieve an optimal stability against power system oscillation. The design of proposed controller is based on μ -synthesis. Generally, D-K method is used to solve μ -synthesis. The weakness of this method is that it leads to a high-order controller. The proposed design method in this thesis is presented to cope with this weakness, based on an optimization problem and Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm is used to reduce controller's order. Finally, the stability and performance of the proposed controller is compared with other conventional controllers, and in the simulation results, the superiority of the proposed controller is observed.

Key word: Robust Control, μ -Synthesis, Static Synchronous Compensator, Dynamic Stability, Optimization Algorithm



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Control Engineering

**Robust controller design with μ -synthesis method for
compensator to improve power system oscillation
damping**

By: Mahsa Kashani

Dr. Alireza.Alfi

Jan 2018