

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود
گروه کنترل
پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی کنترل مقاوم به روش جایابی قطب برای سیستم کنترل ولتاژ و سیستم
کنترل فرکانس نیروگاهی با در نظر گرفتن پایداری ساز سیستم قدرت

فرید یزدانی

استاد راهنما
دکتر علیرضا الفی

آذر ۱۳۹۴

تقدیم به:

چشمه‌های جوشان محبت

جلوه‌های مهر و عطف الهی

بندگان‌های پر مهر زندگیم

پدر و مادر عزیزم

که در تمام مراحل زندگی، به من راه و رسم درست زیستن را آموختند.

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش‌ها و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گران-
قدر و دلسوزم، جناب آقای دکتر علیرضا الفی، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب فرید یزدانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/کنترل دانشکده

مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی کنترل مقاوم به روش جایی

قطب برای سیستم کنترل ولتاژ و سیستم کنترل فرکانس نیروگاهی با در نظر گرفتن

پایدارساز 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » 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 بافتهای 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 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 فارسی

در این پایان نامه یک رویکرد بهینه در طراحی سیستم کنترل مقاوم با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. مساله کنترل مقاوم را به مساله کنترل زیر بهینه تبدیل خواهیم کرد. از آنجایی که سیستم را به صورت خطی تغییرناپذیر با زمان در نظر می‌گیریم، مساله کنترل بهینه همان مساله تنظیم‌کننده درجه دوم خطی می‌باشد. هدف از بکارگیری این شیوه از کنترل، تضمین پایداری و کارائی سیستم حلقه بسته با حضور کلیه عدم قطعیت‌های ممکن است. بعد از شناسائی موثرترین پارامترهای کنترل‌کننده‌های سیستم قدرت، براساس این پارامترها کنترل بهینه مقاوم طراحی و تست می‌شود.

کلید-واژه: سیستم کنترل ولتاژ، سیستم کنترل فرکانس، پایدارساز سیستم قدرت، کنترل مقاوم

فهرست مطالب

فصل اول	۱
۱-۱ اهداف تحقیق	۳
۲-۱ مروری بر کارهای گذشته	۴
۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۷
فصل دوم	۹
۱-۲ مساله کنترل بهینه	۱۱
۲-۲ معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن	۱۱
۳-۲ مساله تنظیم‌کننده درجه دوم خطی	۱۲
۴-۲ کنترل مقاوم سیستم‌های خطی	۱۵
۱-۴-۲ عدم قطعیت سازگار	۱۵
۲-۴-۲ عدم قطعیت ناسازگار	۱۷
فصل سوم	۲۱
۱-۳ مقدمه	۲۲
۳-۲ نمایش سیستم‌های تحریک ماشین سنکرون در مطالعات سیستم قدرت	۲۳
۱-۲-۳ تحریک کننده	۲۵
۲-۲-۳ تنظیم کننده ولتاژ	۲۵
۳-۲-۳ مبدل ولتاژ پایانه و جبرانگر بار	۲۵
۴-۲-۳ پایدارساز سیستم قدرت	۲۶
۵-۲-۳ مدارهای محدودکننده و حفاظتی	۲۶

۲۷	نکات مربوط به سیستم تحریک	۳-۳
۲۷	ملاحظات مربوط به ژنراتور سنکرون	۱-۳-۳
۲۷	ملاحظات مربوط به سیستم قدرت	۲-۳-۳
۲۷	سیستم تحریک استاتیک-نوع ST	۴-۳
۲۸	مدل سیستم تحریک استاتیک نوع ST1A	۱-۴-۳
۳۰	ساده سازی سیستم تحریک	۲-۴-۳
۳۲	بدست آوردن مدل فضای حالت	۳-۴-۳
۳۴	مطالعه قوام پارامترهای سیستم تحریک ST1A	۵-۳
۴۳	طراحی کنترل مقاوم	۶-۳
۴۳	طراحی کنترل مقاوم سیستم تحریک بر اساس پارامتر K_A	۱-۶-۳
۴۷	اعمال کنترل مقاوم به سیستم	۷-۳
۵۱	نتیجه گیری	۸-۳
۵۳	فصل چهارم	
۵۵	مقدمه	۴-۱
۵۵	انواع پایدارسازهای سیستم قدرت	۲-۴
۵۶	ورودی سرعت	۱-۲-۴
۵۷	ورودی توان	۲-۲-۴
۵۷	ورودی فرکانس	۳-۲-۴
۵۸	پایدارسازهای دیجیتالی	۴-۲-۴
۵۸	ساختار پایدارساز سیستم قدرت	۳-۴

۵۸	۴-۴	پایدارساز سیستم قدرت مدل <i>PSS 1A</i>
۵۹	۵-۴	مدل فضای حالت پایدارساز سیستم قدرت <i>IEEE PSS 1A</i>
۶۲	۶-۴	مطالعه قوام پارامترهای <i>PSS 1A</i>
۶۴	۷-۴	طراحی کنترل مقاوم
۶۸	۸-۴	اعمال کنترل مقاوم به سیستم
۷۲	۹-۴	نتیجه‌گیری
۷۳		فصل پنجم
۷۵	۱-۵	مقدمه
۷۵	۲-۵	اهمیت کنترل فرکانس
۷۷	۳-۵	نقش توربین در کنترل فرکانس نیروگاه
۷۷	۴-۵	روشهای کنترل فرکانس
۷۷	۱-۴-۵	سیستم کنترلی وابسته به توربین
۷۹	۲-۴-۵	سیستم کنترلی وابسته به دیگ بخار
۸۰	۳-۴-۵	سیستم کنترلی وابسته به دیگ بخار و توربین
۸۱	۵-۵	سیستم گاورنر نیروگاه
۸۲	۱-۵-۵	گاورنر سرعت ثابت
۸۳	۲-۵-۵	گاورنر با مشخصه افقی سرعت
۸۴	۶-۵	مدل فضای حالت گاورنر
۸۴	۵-۷	طراحی کنترل مقاوم
۸۷	۸-۵	نتیجه‌گیری

فصل ششم.....	۸۹
۱-۶ نتیجه‌گیری.....	۹۱
۲-۶ پیشنهادات.....	۹۲
پیوست الف.....	۹۳
۱-۷ واحدهای تولید.....	۹۳
۱-۱-۷ ژنراتورهای سنکرون.....	۹۴
۲-۱-۷ اکسایترها و تنظیم‌کننده‌های اتوماتیک ولتاژ.....	۹۵
مراجع.....	۱۰۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۳ : مقدار قراردادی پارامترهای سیستم تحریک نیروگاه ۳۴
- جدول ۲-۳ : مقادیر ویژه ماتریس حالت به ازای مقادیر نامی ۳۵
- جدول ۳-۳ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_R ۳۵
- جدول ۴-۳ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_C ۳۶
- جدول ۵-۳ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_B ۳۷
- جدول ۶-۳ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر K_A ۳۸
- جدول ۷-۳ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_A ۳۹
- جدول ۸-۳ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر K_F ۴۰
- جدول ۹-۳ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_F ۴۱
- جدول ۱۰-۳ : مقادیر ویژه سیستم کنترل شده بهینه مقاوم و سیستم کنترل نشده ۴۸
- جدول ۱۱-۳ : مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم بهینه به ازای تغییر پارامتر K_A ۴۸
- جدول ۱۲-۳ : مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم به ازای تغییر پارامترهای T_C, T_B, K_A, K_F ۴۹
- جدول ۱۳-۳ : مقادیر ویژه سیستم کنترل نشده بازای تغییر پارامترهای T_C, T_B, K_A, K_F ۵۰
- جدول ۱-۴ : مجموعه اطلاعات پارامترهای PSS ۶۰
- جدول ۲-۴ : مقادیر ویژه ماتریس حالت به ازای مقادیر نامی ۶۲
- جدول ۳-۴ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_2 ۶۳
- جدول ۴-۴ : تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_5 ۶۴
- جدول ۵-۴ : مقادیر ویژه سیستم کنترل شده بهینه مقاوم و سیستم کنترل نشده ۶۸
- جدول ۶-۴ : تغییر مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم بهینه به ازای تغییر پارامتر T_5 ۶۸
- جدول ۷-۴ : تغییر مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم به ازای تغییر پارامترهای T_2, T_4, T_5 ... ۷۰

جدول ۴-۸: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت نامی بازای تغییر پارامترهای T_2 و T_4 ، T_5	۷۰
جدول ۵-۱: مقادیر ویژه سیستم نامی و سیستم کنترل شده مقاوم	۸۶
جدول ۵-۲: مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم بهینه به ازای تغییر پارامتر T_{G2}	۸۶
جدول ۵-۳: مقادیر ویژه سیستم کنترل نشده بازای تغییر پارامتر T_{G2}	۸۶
جدول ۱-۱: فهرست اختصارات	۹۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۳: بلوک دیاگرام سیستم تحریک برای ژنراتور سنکرون [۱] ۲۴
- شکل ۲-۳: بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحریک ماشین سنکرون [۱۹] ۲۵
- شکل ۳-۳: مبدا ولتاژ پایانه به همراه جبران‌ساز بار [۱۹] ۲۶
- شکل ۴-۳: یکسوساز تمام پل کنترل شده سه فاز الف: مدار معادل ب: مشخصه‌ی جریان ولتاژ [۲] ... ۲۸
- شکل ۵-۳: تحریک کننده با یکسوساز قابل کنترل و منبع پتانسیل نوع $STIA$ [۱۹] ۳۰
- شکل ۶-۳: بلوک دیاگرام ساده شده سیستم تحریک ۳۲
- شکل ۷-۳: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_R ۳۶
- شکل ۸-۳: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_C ۳۷
- شکل ۹-۳: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_B ۳۸
- شکل ۱۰-۳: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر K_A ۳۹
- شکل ۱۱-۳: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_A ۴۰
- شکل ۱۲-۳: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر K_F ۴۱
- شکل ۱۳-۳: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_F ۴۲
- شکل ۱۴-۳: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامتر K_A ۴۹
- شکل ۱۵-۳: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامترهای T_C, T_B, K_A, K_F ۵۱
- شکل ۱-۴: حلقه کنترلی برای سیستم تنظیم کننده ولتاژ الف) بلوک دیاگرام ب) دیاگرام فازوری [۲] ۵۶
- شکل ۲-۴: مولفه‌های اصلی یک PSS [۲] ۵۸
- شکل ۳-۴: پایدارساز سیستم قدرت با یک ورودی-مدل $PSSIA$ [۱۹] ۵۹
- شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام هفرون-فیلیپس از مدل تک ماشین متصل به باس بینهایت [۲۵] ۶۰
- شکل ۵-۴: مقایسه پاسخ PSS به ازای پارامترهای متفاوت ۶۱

- شکل ۴-۶: مدل ساده شده پایدارساز سیستم قدرت PSS۱A ۶۱
- شکل ۴-۷: تغییرات سرعت (a) مدل بلوک دیاگرام PSS (b) مدل فضای حالت PSS ۶۲
- شکل ۴-۸: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده بازای تغییر T_2 ۶۳
- شکل ۴-۹: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده بازای تغییر T_5 ۶۴
- شکل ۴-۱۰: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامتر T_5 ۶۹
- شکل ۴-۱۱: پاسخ سیستم نامی و سیستم کنترل شده مقاوم در حضور عدمقطعیت T_5 ۶۹
- شکل ۴-۱۲: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامترهای T_2 و T_4 ، T_5 ۷۱
- شکل ۴-۱۳: پاسخ سیستم نامی و سیستم کنترل شده مقاوم در حضور عدمقطعیت T_2 و T_4 ، T_5 .. ۷۱
- شکل ۵-۱: نمودار بلوکی کنترل وابسته به توربین ۷۹
- شکل ۵-۲: نمودار بلوکی کنترل وابسته به دیگ بخار ۸۰
- شکل ۵-۳: نمودار بلوکی کنترل وابسته به دیگ بخار و توربین ۸۱
- شکل ۵-۴: موقعیت گاورنر در ژنراتور با سیستم بار منفرد [۱۶] ۸۱
- شکل ۵-۵: الف-سیستم کنترل سرعت توربین با گاورنر سرعت ثابت ب- پاسخ واحد تولید [۱۶] ... ۸۲
- شکل ۵-۶: گاورنر واحدهای تولیدی با فیدبک حالت ماندگار [۱۶] ۸۳
- شکل ۵-۷: بلوک دیاگرام توربین و گاورنر [۳۰] ۸۴
- شکل ۵-۸: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامتر T_{G2} ۸۷
- شکل ۱-۱: بلوک دیاگرام واحد تولید [۲] ۹۳
- شکل ۱-۲: سیستمهای تحریک رایج [۲] ۹۷
- شکل ۱-۳: بلوک دیاگرام سیستم تحریک و AVR و PSS [۲] ۹۹
- شکل ۱-۴: المان جبرائگر بار همراه با مقایسه کننده [۲] ۱۰۰
- شکل ۱-۵: پاسخ ولتاژ دینامیک به تغییر پله در مقدار مرجع ۱۰۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱ اهداف تحقیق

در سیستم‌های قدرت، منابع اولیه انرژی الکتریکی ژنراتورهای سنکرون می‌باشند. مساله پایداری سیستم قدرت در وهله اول حفظ سنکرونیسم ماشین‌های سنکرون بهم پیوسته می‌باشد. همچنین پایداری وابسته به چندین جزء دیگر مانند سیستم‌های تحریک^۱، گاورنرها^۲، پایدارسازهای سیستم قدرت^۳، بارها، ادوات FACT می‌باشد. بنابراین فهم ویژگی و مدل کردن عملکرد آنها از اهمیت اساسی در بررسی پایداری سیستم‌های قدرت برخوردار است.

امروزه با رشد سریع سیستم‌های قدرت الکتریکی، بیشتر این سیستم‌ها نزدیک حد پایداریشان کار می‌کنند، بنابراین مطالعات پایداری وسیعی باید انجام شود. برای اطمینان از درستی مطالعات و منعکس کردن رفتار واقعی سیستم هنگامی که در فرم مختلط کار می‌کنند، به مدل دقیقی از المان‌های سیستم نیاز است. از آنجایی که عدم قطعیت در اطلاعات سیستم قدرت اجتناب ناپذیر است، باید در این مطالعات تاثیر عدم قطعیت را نیز همواره در نظر بگیریم.

معمولا طراحی کنترل‌کننده‌ها در شرایط نامی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت انجام می‌شود. در روند طراحی کنترل‌کننده‌ها همواره به علت اطلاعات ناقص از سیستم و دستیابی محدود به اطلاعات این سیستم‌ها، عدم قطعیت در مدل و پارامترها وجود دارد.

هدف از این تحقیق طراحی کنترل مقاوم برای سیستم کنترل ولتاژ و سیستم کنترل فرکانس نیروگاهی و همچنین پایدارساز سیستم قدرت، برای مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در می‌باشد. بر اثر عوامل زیادی مانند شرایط محیطی، فرسودگی قطعات، خطای اپراتور پارامترهای سیستم‌های کنترلی طراحی شده برای یک سیستم قدرت از مقدار نامی خود فاصله می‌گیرند، این فاصله همان عدم قطعیت است که باعث ناپایداری در سیستم می‌شود و بر عملکرد یک سیستم قدرت تأثیر منفی می‌گذارد.

^۱ Excitation System

^۲ Governor

^۳ Power system stabilizer (PSS)

بنابراین وجود یک کنترل مقاوم ساده که با این عدم قطعیت‌ها مقابله کند احساس می‌شود.

۲-۱ مروری بر کارهای گذشته

سیستم‌های تحریک بدلیل اینکه نیروی محرکه الکتریکی ژنراتورها را کنترل می‌کنند، یکی از مهمترین المان‌های سیستم‌های قدرت بهم پیوسته در اندازه بزرگ هستند. بنابراین بر روی پایداری سیگنال کوچک یک سیستم قدرت اثر گذار هستند [۱] [۲]. به علت ترکیب اطلاعات غلط و دستیابی محدود به اطلاعات سیستم، عدم قطعیت در مدل و پارامترهای یک سیستم تحریک نمی‌تواند نادیده گرفته شود. بنابراین برای تضمین اطمینان و عملکرد دقیق ژنراتورهای سیستم قدرت، سیستم تحریک مقاوم در برابر عدم قطعیت لازم است. در [۳] اثر سیستم تحریک ژنراتور سنکرون بر روی پایداری سیگنال کوچک در یک سیستم ماشین متصل به باس بی‌نهایت بررسی شده است و نقش سیستم تحریک در پایداری سیگنال کوچک نشان داده شده است. این پایداری سازی نیازمند پارامترهای بهره تنظیم‌کننده ولتاژ به اندازه‌ی مشخصات تابع تبدیل است.

در [۴] کنترل گذرا نوسانات تقویت‌شده برای یک سیستم قدرت بررسی شده است. ابتدا طرح کنترل با استفاده از یک مدل ماشین کلاسیک برای یک سیستم n -ژنراتور ایجاد شده است، سپس به مدل ماشین، دینامیک‌های گاورنر توربین افزوده شده است. استراتژی‌های کنترلی پیشنهاد شده خطی هستند و برای مدل کلاسیک فقط به زاویه نسبی محلی و سرعت نیاز است، همچنین اگر مدل ماشین شامل دینامیک‌های توربین گاورنر باشد، برای طراحی کنترل‌کننده به اندازه‌گیری توان مکانیکی نیاز داریم. با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف نشان داده می‌شود که کنترل‌کننده طراحی شده در برابر تغییرات بار و پارامترها و تغییرات توپولوژی سیستم قدرت مقاوم است.

قوام^۱ سیستم تحریک برای حفظ پایداری سیستم ضروری است. در [۵] برای سیستم تحریک

^۱ Robustness

ژنراتور سنکرون با استفاده از تئوری کنترل H_∞ و نظریه خطی سازی فیدبک یک کنترل کننده مقاوم و نامتمرکز طراحی شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کنترل کننده طراحی شده نه تنها عملکرد دینامیکی سیستم قدرت را بهبود می بخشد، بلکه پایداری سیستم را نیز افزایش می دهد.

در [۶] روش ماتریس خطی نامساوی^۱ برای طراحی کنترل کننده تحریک نامتمرکز مقاوم در سیستم های قدرت استفاده شده است. نتیجه حاصل شده خطی است که امکان اجرای آسان را فراهم می کند. در [۷] برای بهبود فضای حالت و پایداری گذرا سیستم تحریک ژنراتور کنترل کننده مقاوم طراحی شده است.

علاوه بر سیستم های تحریک، قوام برای سیستم های کنترلی دیگر از جمله سیستم کنترل گاورنر توربین نیز در نظر گرفته می شود. در [۸] هدف یک کنترل پیوسته مقاوم برای پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا است. سیگنال کنترل بوسیله دو کنترل کننده تولید می شود، کنترل کننده اولی برای اغتشاشات کوچک و دومی برای اغتشاشات بزرگ است. هر دو کنترل کننده ساختار یکسان دارند و فقط در میزان سازی^۲ پارامترها باهم تفاوت دارند.

در [۹] نیز از روش LMI برای طراحی کنترل گاورنر توربین در سیستم های قدرت چند ماشینه برای پایداری نامتمرکز مقاوم استفاده شده است. روش پیشنهادی بسیار موثر است و به آسانی می توان نیازمندی های اضافی طراحی را در نظر گرفت.

همچنین کنترل مقاوم برای طراحی پایداری سیستم قدرت در نظر گرفته می شود. ابتدا بعضی محققین با استفاده از روش LMI و بوسیله قراردادن قطب های سیستم در یک ناحیه مناسب در صفحه مختلط برای یک مجموعه از عوامل معین و شرایط سیستم، PSS مقاوم را طراحی کردند. در نتیجه تحت این مجموعه از شرایط، پاسخ سیستم تعدیل شده مناسب، تضمین می شود [۱۰].

در [۱۱] برای پایداری کردن یک سیستم قدرت دو PSS طراحی و استفاده شده است. در این

^۱ linear matrix inequalities (LMI)

^۲ tuning

مقاله به توضیح و مقایسه روش‌های مختلف از قبیل نظریه جبرانگر فاز کلاسیک، سنتز μ ، و روش LMI برای هماهنگ کردن دو PSS برای یک سیستم قدرت ۵ماشینه استفاده شده است. در این مقاله بدلیل اینکه سیستم حلقه باز یک حالت ناپایدار دارد و فقط با استفاده از یک پایدارساز سیستم قدرت نامی نمی‌تواند پایدار شود، بنابراین هم از کنترل‌کننده‌های متمرکز و هم نامتمرکز استفاده شده است. در مرجع [۱۲] طراحی چند هدفه بهینه برای پایدارسازهای سیستم قدرت چند ماشینه مقاوم از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این مقاله از $CPSS$ ^۱ استفاده شده است. در این کار توابع هدف برای بهینه‌سازی یک مجموعه از توابع شامل ضریب میرایی و نرخ تعدیل فرمول‌بندی شده‌اند. روش دیگر استفاده از الگوریتم ژنتیک همراه با آنالیز پرونی استاندارد برای مشخص کردن مشخصات دینامیکی مهم سیستم و استفاده از آن‌ها برای طراحی کنترل مقاوم برای PSS . در این مقاله برای تنظیم پایدارسازهای سیستم قدرت در شرایط کاری متفاوت یک روش کنترل مقاوم بر پایه الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است [۱۳].

در [۱۴] ابتدا طراحی تنظیم‌کننده خطی بهینه توضیح داده شده‌است. در این مقاله یک روش جدید برای محاسبه Q به روش حرکت دادن مقادیر ویژه غالب به سمت چپ محور موهومی تا جایی که کنترل‌کننده اجازه می‌دهد، استفاده شده است. سپس این روش برای طراحی کنترل بهینه یک سیستم قدرت استفاده شده است. در این مقاله سه مورد به صورت مجزا بررسی شده است، ابتدا کنترل تحریک، سپس کنترل گاورنر بهینه (با و بدون کمک فنر) و در مورد سوم کنترل بهینه تحریک به همراه گاورنر. می‌توان نتیجه گرفت که کنترل‌های بهینه از کنترل تحریک نامی اثر گذارتر است. همچنین بهترین راه برای پایدار کردن یک سیستم قدرت کنترل تحریک بهینه به همراه کنترل گاورنر بهینه بدون کمک فنر است.

^۱ Conventional speed-based lead-lag PSS

۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در ادامه این فصل ابتدا مروری بر کارهای انجام شده داریم سپس توضیح کلی در مورد واحدهای تولید و کنترل‌کننده‌های آن ارائه می‌شود. در فصل دوم در مورد روند طراحی کنترل بهینه بحث می‌کنیم. ابتدا مساله کنترل بهینه، معادله همیلتن-جاکوبی بلمن و مساله تنظیم‌کننده درجه دوم خطی شرح داده می‌شود. برای طراحی کنترل مقاوم سیستم‌های خطی، عدم قطعیت را به دو بخش سازگار و ناسازگار تقسیم می‌کنیم، سپس روند طراحی کنترل مقاوم را برای هر دو عدم قطعیت به صورت کامل توضیح می‌دهیم.

در فصل سوم ابتدا در مورد وظایف سیستم تحریک، نحوه ارتباط آن با سایر اجزاء سیستم قدرت و اجزاء تشکیل‌دهنده صحبت می‌کنیم، سپس مدل سیستم تحریک استاتیک *STIA* انتخاب، ساده‌سازی و مدل فضای حالت را بدست می‌آوریم. برای مدل فضای حالت بدست آمده موثرترین پارامتر شناسایی و بر اساس آن کنترل مقاوم را طراحی و تست می‌کنیم.

در فصل چهارم ابتدا به معرفی پایدارساز سیستم قدرت، وظایف، نحوه‌ی عملکرد، انواع و اجزای تشکیل‌دهنده آن می‌پردازیم. سپس بر اساس مدل فضای حالت بدست آمده از بلوک دیاگرام پایدارساز سیستم قدرت مدل *PSS 1A*، موثرترین پارامتر شناسایی و کنترل مقاوم را طراحی می‌کنیم.

در فصل پنجم ابتدا در مورد اهمیت و روش‌های کنترل فرکانس توضیحاتی ارائه می‌دهیم. در ادامه سیستم گاورنر نیروگاه را توضیح می‌دهیم و با انتخاب مدل ساده شده‌ای از گاورنر روند طراحی کنترل مقاوم را شرح می‌دهیم. در فصل ششم نتایج و پیشنهادات ارائه می‌شود.

فصل دوم

کنترل مقاوم سیستم‌های خطی

در این فصل به چگونگی طراحی کنترل بهینه مقاوم می‌پردازیم. نتایج کنترل بهینه را از اصل ساده‌ای به نام اصل بهینگی^۱ بدست می‌آوریم. این اصل را برای سیستم‌های غیرخطی کلی بکار برده و معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن^۲ (HJB) را برای حل مساله کنترل بهینه بدست می‌آوریم، که این معادله برای اثبات پایداری مقاوم سیستم تحت کنترل استفاده خواهد شد. علاوه بر این، از معادله HJB در بدست آوردن معادله ریکاتی برای حل مساله LQR ^۳ سیستم‌های خطی نیز استفاده می‌شود. بر خلاف معادله HJB ، معادله ریکاتی به شرط پایدارپذیری، همیشه حل پذیر است. از این رو اگر سیستم پایدارپذیر باشد، جواب مساله LQR وجود دارد.

۱-۲ مساله کنترل بهینه

برای سیستم غیرخطی خودگردان با زمان به فرم کلی زیر:

$$\dot{x} = f(x, u)$$

که $x \in \mathbb{R}^n$ و $u \in \mathbb{R}^m$ به ترتیب متغیرهای حالت و ورودی‌های کنترل و $f(0, 0)$ تابع

غیرخطی است که شرط عمومی برای داشتن جواب معادله دیفرانسیل را دارا می‌باشد. مساله کنترل بهینه را با هدف یافتن قانون کنترل به قسمی که تابعی هزینه زیر حداقل گردد، تعریف می‌کنیم:

$$J(x, t) = \int_t^{t_f} L(x, u) dt$$

که در آن t زمان فعلی، t_f زمان نهایی، $x = x(t)$ حالت فعلی و $L(x, u)$ تابع هدف می‌باشد.

۲-۲ معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن

معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن به صورت زیر است:

هر قسمت از منحنی مسیر بهینه، یک مسیر بهینه است^۱

^۲ Hamilton-Jacobi-Bellman

^۳ Linear Quadratic Regulator

$$-\frac{\partial J^*}{\partial t} = \min_{u(t) \in R^m} \left\{ L(x, u) + \left(\frac{\partial J^*}{\partial x} \right)^T f(x, u) \right\}$$

برای سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان با افق بی‌نهایت ($t_f = \infty$)، $J^*(x, t)$ مستقل از

زمان است. از این رو معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\min_{u(t) \in R^m} \left\{ L(x, u) + \left(\frac{\partial J^*}{\partial x} \right)^T f(x, u) \right\} = 0$$

۳-۲ مساله تنظیم‌کننده درجه دوم خطی

مساله LQR را برای سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان به صورت $\dot{x} = Ax + Bu$ در نظر

می‌گیریم. هدف یافتن کنترل بهینه است طوری که تابع هزینه درجه دوم

$$J(x, t) = \int_t^{t_f} (x^T Qx + u^T Ru) d\tau$$

حداقل گردد که در آن $Q = Q^T \geq 0$ ماتریس متقارن و مثبت نیمه معین و $R = R^T > 0$

ماتریس متقارن و مثبت معین می‌باشد.

برای یافتن پاسخ مساله LQR ، فرض می‌کنیم حداقل هزینه، درجه دوم باشد:

$$J^*(x, t) = x^T S(t)x$$

که در آن $S(t) = S(t)^T \geq 0$ ماتریس متقارن، مثبت نیمه معین و تابع زمان است. با استفاده

از معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن، کنترل بهینه u^* در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$-x^T \dot{S}(t)x = \min_{u(t) \in R^m} \left\{ x^T Qx + u^T Ru + 2x^T S(t)(Ax + Bu) \right\}$$

برای محاسبه $\min_{u(t) \in R^m} \left\{ x^T Qx + u^T Ru + 2x^T S(t)(Ax + Bu) \right\}$ ، مشتق

از معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن، کنترل بهینه u^* در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$2Ru^* + 2B^T S(t)x = 0$$

بنابراین کنترل بهینه عبارتست از:

$$u^* = -R^{-1} B^T S(t)x$$

با استفاده از معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن داریم:

$$-x^T \dot{S}(t)x = x^T (Q - S(t)BR^{-1}B^T S(t) + S(t)A + A^T S(t))x$$

به بیان دیگر، $S(t)$ در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$\dot{S}(t) = -(S(t)A + A^T S(t) + Q - S(t)BR^{-1}B^T S(t))$$

رابطه فوق، معادله ریکاتی نامیده می‌شود که بسیار ساده‌تر از معادله همیلتن-جاکوبی-بلمن می‌باشد.

قضیه ۲-۱:

برای مساله LQR با

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$J(x) = \int_0^{\infty} (X^T Qx + u^T Ru) d\tau$$

اگر $R > 0$, $Q \geq 0$ و همچنین (A, B) پایدارپذیر باشد، آنگاه مساله حل‌پذیر بوده و برابر است با

$$u^* = -R^{-1} B^T Sx$$

که S حل یکتای مثبت و معین معادله جبری ریکاتی زیر است:

$$SA + A^T S + Q - SBR^{-1}B^T S = 0$$

اثبات: [۱۵].

هدف مساله LQR رساندن حالت سیستم به صفر می‌باشد. با این حال در برخی مسائل عملی،

هدف رساندن خروجی به مقدار ثابت است. برای چنین کاربردهایی مساله LQR را بدین صورت داریم:

برای سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad [۱۵]$$

با خروجی مطلوب y_d ، هدف یافتن کنترل بهینه‌ای است که $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_d$ گردد. برای

حل این مساله ابتدا بایستی حالت مطلوب $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_d$ و ورودی $\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = u_d$ را بیابیم.

بدیهی است که باید x_d, u_d, y_d در معادلات حالت و خروجی صدق کنند، یعنی:

$$\dot{x}_d = Ax_d + Bu_d$$

$$y_d = Cx_d + Du_d$$

چون x_d ثابت است، $\dot{x}_d = 0$ داریم:

$$0 = Ax_d + Bu_d$$

$$y_d = Cx_d + Du_d$$

با y_d داده شده، معادلات فوق را برای x_d و u_d حل می‌کنیم. چنانچه حلی برای x_d و

u_d وجود نداشته باشد، هدف $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_d$ دست یافتنی نیست. بنابراین فرض کنید که حل

وجود دارد، یعنی معادله خطی

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_d \end{bmatrix}$$

حل دارد. برای سیستم تک ورودی-تک خروجی، x_d و u_d به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ y_d \end{bmatrix}$$

در مرحله بعد با تعریف متغیرهای جدید به صورت

$$\Delta x(t) = x(t) - x_d$$

$$\Delta u(t) = u(t) - u_d$$

$$\Delta y(t) = y(t) - y_d$$

معادلات حالت و خروجی را برای متغیرهای $\Delta x, \Delta u, \Delta y$ بدست می‌آوریم:

$$\Delta \dot{x} = \dot{x} - \dot{x}_d = \dot{x} = Ax + Bu = A\Delta x + B\Delta u + Ax_d + Bu_d = A\Delta x + B\Delta u$$

$$\Delta y = y - y_d = Cx + Du - Cx_d + Du_d = C\Delta x + D\Delta u$$

معادلات حالت و خروجی برای متغیرهای Δx و Δu و Δy با همان ماتریس‌های (A, B, C, D) تشکیل می‌شوند:

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

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u$$

می‌توانیم کنترلی را بیابیم که تابعی هزینه زیر حداقل گردد.

$$J(\Delta x, t) = \int_t^f (\Delta x^T Q \Delta x + \Delta u^T R \Delta u)$$

پس از یافتن کنترل بهینه Δu^* ، u_d^* ، Δu^* را در نظر می‌گیریم که کنترل بهینه سیستم اصلی است.

۲-۴ کنترل مقاوم سیستم‌های خطی

در این بخش کنترل مقاوم سیستم‌های خطی تغییر ناپذیر با زمان به فرم کلی

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

را مطرح می‌کنیم که ماتریس‌های A و B عدم قطعیت دارند.

۲-۴-۱ عدم قطعیت سازگار

برای سیستم تحت کنترل به فرم کلی زیر:

$$\dot{x} = A(p)x + Bu$$

که در آن $p \in P$ بردار پارامتر نامعین است. ابتدا حالتی را بررسی می‌کنیم که شرط سازگاری برقرار باشد، یعنی عدم قطعیت در فضای برد B باشد. به بیان دیگر، $A(p) - A(p_0) = B\phi(p)$ که در آن $p_0 \in P$ مقدار نامی p است. برای سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان فوق، مساله کنترل بهینه همان مساله تنظیم‌کننده درجه دوم خطی می‌باشد. طبق قضیه ۲-۱، اگر سیستم پایداری‌پذیر باشد، جواب مساله LQR وجود دارد. در نتیجه فرضیات زیر را در نظر می‌گیریم:

فرض ۲-۱

مقدار نامی $p_0 \in P$ وجود دارد به قسمی که $(A(p_0), B)$ پایدارپذیر باشد.

فرض ۲-۲

برای هر $p \in P$ ماتریس $\phi(p)$ با ابعاد $m \times n$ وجود دارد به قسمی که

$$A(p) - A(p_0) = B\phi(p) \quad (۱-۲)$$

و $\phi(p)$ محدود باشد.

با فرض ۲-۲، دینامیک‌های سیستم را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{x} = A(p_0)x + Bu + B\phi(p)x \quad (۲-۲)$$

اولین هدف، حل مساله کنترل مقاوم به منظور پایدارسازی سیستم با عدم قطعیت می‌باشد.

۲-۴-۱-۱ مساله کنترل مقاوم

قانون کنترل پسخورد $u = Kx$ را چنان می‌یابیم که سیستم حلقه بسته

$$\dot{x} = A(p_0)x + Bu + B\phi(p)x = A(p_0)x + BKx + B\phi(p)x$$

برای هر $p \in P$ پایدار مجانبی باشد.

مساله کنترل مقاوم فوق را به صورت مستقیم حل نمی‌کنیم. روش پیشنهادی، حل غیرمستقیم

مساله با تبدیل آن به مساله کنترل بهینه است. چون در اینجا سیستم‌های خطی را در نظر می‌گیریم،

مساله کنترل بهینه همان مساله LQR می‌باشد.

۲-۴-۱-۲ مساله LQR

برای سیستم نامی

$$\dot{x} = A(p_0)x + Bu$$

قانون کنترل پسخورد $u = Kx$ را چنان می‌یابیم که تابعی هزینه

$$\int_0^{\infty} (x^T Fx + x^T x + u^T u) dt \quad (۳-۲)$$

حداقل گردد که در آن F کران بالای عدم قطعیت $\phi(p)^T \phi(p)$ است؛ یعنی برای هر $p \in P$

$$\phi(p)^T \phi(p) \leq F \quad (۴-۲)$$

فرض ۲-۲ با محدود بودن $\phi(p)$ ، وجود این کران بالا را تضمین می‌کند. هر F که در رابطه (۴-۲) صدق کند می‌تواند در مساله LQR استفاده گردد. برای حل مساله LQR ابتدا معادله جبری ریکاتی را بر حسب S حل می‌کنیم (توجه کنید $R = R^{-1} = I$).

$$A(p_0)^T S + SA(p_0) + F + I - SBB^T S = 0 \quad (5-2)$$

پس جواب مساله LQR به صورت $u = -B^T Sx$ می‌باشد. قضیه زیر نشان می‌دهد که می‌توانیم مساله کنترل مقاوم را با حل مساله LQR بدست آوریم.

قضیه ۲-۲

مساله کنترل مقاوم ۲-۴-۱ با مفروضات ۱-۲ و ۲-۲ حل پذیر می‌باشد. علاوه بر این، جواب مساله LQR ، جواب مساله کنترل مقاوم می‌باشد.

اثبات [۱۵].

۲-۴-۲ عدم قطعیت ناسازگار

با در نظر گرفتن سیستم $\dot{x} = A(p)x + Bu$ با در نظر گرفتن فرضیات زیر، هدف حل مساله کنترل مقاوم زیر برای پایدارسازی سیستم با عدم قطعیت می‌باشد:

فرض ۳-۲

مقدار نامی $p_0 \in P$ وجود دارد به قسمی که سیستم $(A(p_0), B)$ پایدارپذیر باشد.

فرض ۴-۲

$A(p)$ محدود است.

۱-۲-۴-۲ مساله کنترل مقاوم

قانون کنترل پسخورد $u = Kx$ را چنان می‌یابیم که سیستم حلقه بسته

$$\dot{x} = A(p)x + Bu = A(p)x + BKx \quad (6-2)$$

برای هر $p \in P$ پایدار مجانبی باشد.

برای حل این مساله کنترل مقاوم، ابتدا عدم قطعیت $A(p) - A(p_0)$ را به دو بخش سازگار و ناسازگار تجزیه می‌کنیم. این کار را می‌توان با شبه‌معکوس B^+ ، ماتریس B انجام داد. اگر B یک

ماتریس بلند^۲ از مرتبه کامل باشد، آنگاه $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$. با فرض

$$A(p) - A(p_0) = BB^+(A(p) - A(p_0)) + (I - BB^+)(A(p) - A(p_0)) \quad (7-2)$$

بخش سازگار $BB^+(A(p) - A(p_0))$ و بخش ناسازگار $(I - BB^+)(A(p) - A(p_0))$

می‌باشد. F و H را به‌عنوان کران‌های بالایی عدم قطعیت به‌صورت زیر تعریف کنید:

$$(A(p) - A(p_0))^T B^{+T} B^+(A(p) - A(p_0)) \leq F \quad (8-2)$$

$$\alpha^{-2} (A(p) - A(p_0))^T (A(p) - A(p_0)) \leq H \quad (9-2)$$

که در آن $\alpha \geq 0$ پارامتر طراحی است. توجه کنید F تعریف شده در رابطه (۸-۲) مشابه F

تعریف شده در رابطه (۴-۲) است. همانند بخش ۲-۴-۱، روش ما حل غیرمستقیم مساله کنترل مقاوم

فوق با تبدیل آن به مساله LQR می‌باشد.

۲-۲-۴-۲ مساله LQR

قانون کنترل پس‌خورد $u = Kx$ و $v = Lx$ را برای سیستم کمکی

$$\dot{x} = A(p_0)x + Bu + \alpha(I - BB^+)v \quad (10-2)$$

چنان می‌یابیم که تابعی هزینه

$$\int_0^\infty (x^T (F + \rho^2 H + \beta^2 D)x + u^T u + \rho^2 v^T v) dt \quad (11-2)$$

حداقل گردد که در آن $\alpha, \beta, \rho \geq 0$ پارامترهای طراحی هستند.

در این مساله LQR ، بخش v کنترل الحاقی است که برای مقابله با عدم قطعیت ناسازگار بکار

برده می‌شود. توجه کنید اگر شرط سازگاری برقرار باشد، پارامترهای طراحی به‌صورت $\beta = 1, \alpha = 0$

^۱ Pseudo-inverse

^۲ Tall Matrix ($A_{m \times n} \rightarrow m \gg n$)

و $\rho = 0$ انتخاب می‌شوند. در این حالت، مساله LQR ۲-۲-۴-۲ به مساله LQR ۲-۱-۴-۲ تبدیل می‌شود. پارامترهای طراحی چنان انتخاب می‌شوند که شرط کافی در قضیه زیر برقرار باشد.

جواب مساله LQR برابر است با

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = -\tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T S x \quad (۱۲-۲)$$

که در آن S حل مثبت معین و یکتای معادله جبری ریکاتی زیر است:

$$S\tilde{A} + \tilde{A}^T S + \tilde{Q} - S\tilde{B}\tilde{R}^{-1}\tilde{B}^T S = 0$$

در این مساله

$$\tilde{A} = A(p_0) \quad (۱۳-۲)$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} B & \alpha(I - BB^+) \end{bmatrix} \quad (۱۴-۲)$$

$$\tilde{Q} = F + \rho^2 H + \beta^2 I \quad (۱۵-۲)$$

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \rho^2 I \end{bmatrix} \quad (۱۶-۲)$$

از آنجا که

$$\begin{aligned} \tilde{B}\tilde{R}^{-1}\tilde{B}^T &= \begin{bmatrix} B & \alpha(I - BB^+) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \rho^{-2} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B^T \\ \alpha(I - BB^+) \end{bmatrix} \\ &= BB^T + \alpha^2 \rho^{-2} (I - BB^+)^2 \end{aligned}$$

معادله ریکاتی عبارتست از:

$$SA(p_0) + A(p_0)^T S + F + \rho^2 H + \beta^2 I - S(BB^T + \alpha^2 \rho^{-2} (I - BB^+)^2) S = 0$$

قانون کنترل برابر است با

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B^T S \\ -\alpha \rho^{-2} (I - BB^+) S \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} K \\ L \end{bmatrix} x \quad (۱۷-۲)$$

قضیه زیر رابطه بین مساله کنترل مقاوم ۱-۲-۴-۲ و مساله LQR ۲-۲-۴-۲ را بیان می‌کند.

قضیه ۳-۲

اگر بتوان ρ, β, α را چنان انتخاب کرد که جواب مساله LQR ۲-۲-۴-۲ ، $u = Kx$ و

$v = Lx$ در شرط

$$\beta^2 I - 2\rho^2 L^T L > 0 \quad (۱۸-۲)$$

صدق کند، آنگاه $u = Kx$ جواب مساله کنترل مقاوم ۱-۲-۴-۲ می باشد.

اثبات: [۱۵].

قضیه ۴-۲

فرض کنید $u = Kx$ و $v = Lx$ جواب مساله LQR ۲-۲-۴-۲ باشند. اگر شرط سازگاری

$$\beta^2 I - 2\rho^2 L^T L < 0$$

برقرار نباشد، برای هر ρ, β, α و به ازای γ به اندازه کافی بزرگ داریم

اثبات: [۱۵].

در این فصل طراحی کنترل مقاوم برای سیستم‌های خطی توضیح داده شد. ابتدا حالتی که شرط سازگاری برقرار باشد بررسی گردید. برای عدم قطعیت سازگار، تا زمانی که سیستم پایداری پذیر باشد کنترل مقاوم وجود دارد. شرط پایداری پذیری، شرط لازم است، زیرا در غیر اینصورت کنترل وجود ندارد. اگر شرط را از پایداری پذیری به کنترل پذیری ارتقاء دهیم، آنگاه نه تنها می توانیم سیستم را پایدار کنیم، بلکه می توانیم قطب‌ها را به سمت چپ هر عدد حقیقی غیر منفی که پایداری را افزایش می دهد، جایابی کنیم. در هر دو حالت، پاسخ با حل مساله LQR بدست می آید. اگر شرط سازگاری برقرار نباشد، مساله کنترل مقاوم بسیار دشوارتر می گردد. در واقع، نتایج زیادی درباره عدم قطعیت ناسازگار وجود ندارد.

فصل سوم

سیستم‌های تحریک

۱-۳ مقدمه

وظیفه اصلی سیستم تحریک، تأمین جریان مستقیم سیم‌پیچ تحریک ماشین سنکرون است. بعلاوه سیستم تحریک، با کنترل ولتاژ تحریک (در نتیجه جریان تحریک)، وظایف کنترل و حفاظت را

که در عملکرد مناسب یک سیستم قدرت موثر است، اجرا می‌کند. وظایف کنترل، شامل کنترل ولتاژ و توان راکتیو و تقویت پایداری سیستم است. توابع حفاظتی این اطمینان را فراهم می‌آورند که از حدود توانایی ماشین سنکرون، سیستم تحریک و دیگر تجهیزات تجاوز نشود [۱۶]. با توجه به نوع تغذیه منبع تولید میدان DC مورد نیاز برای سیم‌پیچ تحریک ژنراتور، سیستم‌های تحریک در ۳ نوع زیر طبقه‌بندی می‌شوند [۱۷].

۱. سیستم‌های تحریک جریان مستقیم: از یک ژنراتور جریان مستقیم با یک کموتاتور به عنوان منبع تحریک ژنراتور سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲. سیستم‌های تحریک جریان متناوب: از یک ژنراتور متناوب به همراه یکسوسازهای چرخان یا ساکن برای تولید جریان مستقیم مورد نیاز میدان ماشین سنکرون استفاده می‌کند.

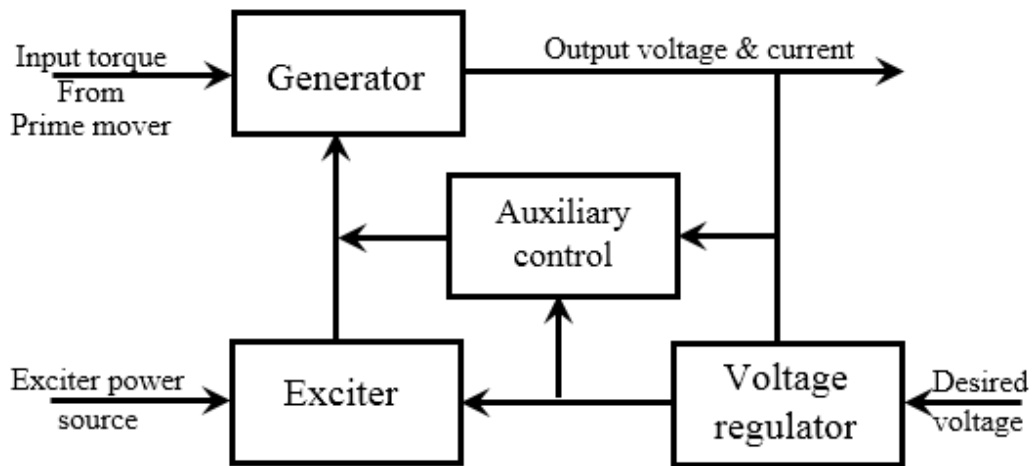
۳. سیستم‌های تحریک جریان استاتیک: در آن‌ها توان منبع تحریک از طریق ترانسفورمرها یا سیم‌پیچ اضافی ژنراتورها و همراه با یکسوساز تامین می‌شود.

یکی از عوامل موثر بر پایداری سیگنال کوچک، سیستم تحریک ماشین می‌باشد. سیستم‌های تحریک متفاوت، اثرات مختلفی بر روی پایداری خواهند داشت. به عنوان مثال در [۱۸]، اثر سیستم‌های تحریک خودتحریک و تحریک مستقل بر روی پایداری سیگنال کوچک در یک سیستم چند ماشینه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم تحریک مستقل نسبت به سیستم خود تحریک در برابر یک اغتشاش یکسان، مشخصه‌های دینامیکی بهتری دارد.

سیستم تحریک موثرترین حلقه کنترلی در ایجاد و کنترل نوسانات سیگنال کوچک توان الکتریکی می‌باشد.

۲-۳ نمایش سیستم‌های تحریک ماشین سنکرون در مطالعات سیستم قدرت

شکل ۱-۳ چگونگی ارتباط میان سیگنال‌های ژنراتور و مولفه‌های تحریک را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۳: بلوک دیاگرام سیستم تحریک برای ژنراتور سنکرون [۱]

در شکل ۲-۳ بلوک دیاگرام کلی از سیستم کنترل تحریک ماشین سنکرون را مشاهده می‌کنیم. سیستم کنترل تحریک دارای زیر سیستم‌هایی شامل مبدل ولتاژ به همراه جبران‌ساز بار^۱، مولفه‌های کنترل تحریک، تحریک‌کننده، و در بسیاری از موارد دارای یک پایدارساز سیستم قدرت می‌باشد. در این میان مولفه کنترل تحریک شامل تابع‌های تنظیم‌کننده^۱ و پایدار کننده تحریک می‌باشد. همچنین سیگنال‌های V_{OEL} و V_{UEL} به عنوان محدود کننده‌های فوق تحریک و زیر تحریک به صورت ورودی کنترل تحریک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با توجه به مطالب فوق، توابع معمول و ضروری سیستم‌های تحریک عبارتند از [۱۶]:

تحریک کننده^۲

تنظیم کننده

مبدل^۳ ولتاژ پایانه و جبرانگر بار^۴

پایدارساز سیستم قدرت

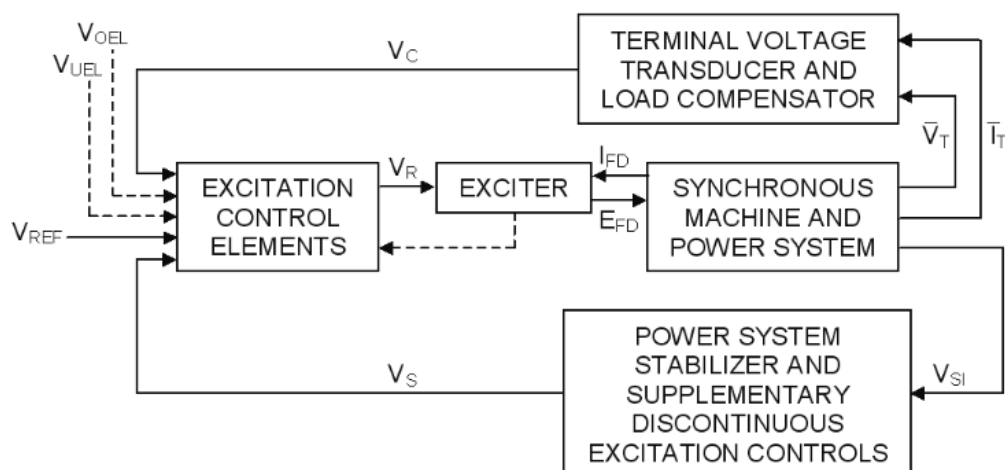
مدارهای محدودکننده و حفاظتی

^۱ Regulator

^۲ Exciter

^۳ Transducer

^۴ Load Compensator



شکل ۳-۲: بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحریک ماشین سنکرون [۱۹]

۳-۲-۱- تحریک کننده

تأمین کننده توان جریان مستقیم مورد نیاز سیم پیچ تحریک ماشین سنکرون است و بخش توان سیستم تحریک را تشکیل می دهد.

۳-۲-۲- تنظیم کننده ولتاژ

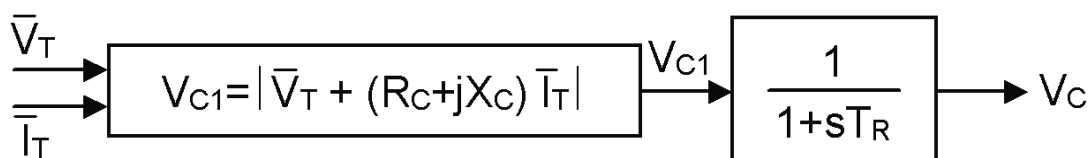
این بلوک با مقایسه سیگنال اندازه گیری شده V_{CI} ، سیگنال مرجع V_{ref} و سیگنال های کنترلی V_{OEL} و V_{UEL} و با اعمال عملگرهایی بر روی سیگنال خروجی از این مقایسه، ولتاژ تحریک، تحریک کننده را می سازد. همچنین این بلوک به همراه یک بلوک پایدارساز سیستم تحریک مورد استفاده قرار می گیرد. بلوک پایدارساز، به صورت یک کنترل کننده فیدبکی عمل می کند. ورودی پایدارساز، خروجی مدار تحریک کننده و خروجی آن به صورت یک سیگنال کنترلی اضافی وارد تنظیم کننده می شود. نکته ای که باید در مورد تنظیم کننده ها دقت شود، سرعت پاسخگویی آنها می باشد. به این معنا که در صورت بوجود آمدن تغییر در ورودی، سیستم تحریک تا زمانی که از تنظیم کننده دستوری دریافت نکند، پاسخ را تغییر نمی دهد. [۱]

۳-۲-۳- مبدل ولتاژ پایانه و جبرانگر بار

در شکل ۳-۳ بلوک دیاگرام کلی از این دو تابع را مشاهده می کنیم. بلوک سمت چپ نمایش

دهنده تابع جبران کننده بار می باشد. ورودی این بلوک سیگنال های اندازه گیری شده جریان I_T و ولتاژ V_T پایانه ژنراتور می باشد. معمولاً این اندازه گیری در پایانه ژنراتور انجام می شود، با این حال اگر V_T و I_T در نقطه ای در داخل یا خارج ماشین اندازه گیری شوند، بلوک جبران ساز مقدار ولتاژی که باید به ولتاژ پایانه اضافه شود و یا از آن کم شود را از طریق محاسبه امپدانس $Z_C = R_C + jX_C$ ، جبران می کند. در بسیاری از موارد مقدار R_C ناچیز است و از آن صرف نظر می شود. یادآوری می شود که اگر سیگنال های ولتاژ و جریان در پایانه ماشین اندازه گیری شوند، نیاز به جبران سازی نیست و مولفه های X_C و R_C مساوی صفر خواهند بود.

بلوک سمت راست تابع مبدل ولتاژ را نمایش می دهد. پس از ساختن سیگنال ولتاژ V_{C1} از سیگنال های پایانه ماشین، مبدل ولتاژ وظیفه ی یکسوسازی و آماده سازی آن برای اعمال به تنظیم کننده ولتاژ بر عهده دارد. ثابت زمانی T_R ، تاثیر یکسوسازی و فیلتر کردن ولتاژ پایانه ماشین سنکرون را نشان می دهد. مقدار T_R بسیار کوچک است.



شکل ۳-۳: مبدل ولتاژ پایانه به همراه جبران ساز بار [۱۹]

۴-۲-۳ پایدار ساز سیستم قدرت

تأمین کننده سیگنال ورودی اضافی به تنظیم کننده ولتاژ، برای میرا کردن نوسان های سیستم قدرت است. در فصل بعد اشاره خواهد شد که سیگنال های ورودی مرسوم شامل انحراف سرعت روتور، توان شتاب دهنده و انحراف فرکانس است.

۵-۲-۳ مدارهای محدود کننده و حفاظتی

شامل مجموعه ای وسیع از توابع کنترلی و حفاظتی برای اطمینان از این موضوع است که از

حدود توانایی کنترل کننده و ژنراتور تجاوز نشود. بعضی از توابع مرسوم شامل محدودکننده‌ی جریان تحریک، محدودکننده‌ی حداکثر تحریک، محدودکننده‌ی ولتاژ پایانه، تنظیم کننده و سیستم حفاظتی ولت بر هرتز و محدودکننده‌ی زیر تحریک است. معمولا این توابع شامل مدارهای مشخصی هستند و سیگنال‌های خروجی آن‌ها را می‌توان در محل‌های مختلف به صورت جمع کننده به سیستم تحریک اعمال کرد [۱۶].

۳-۳ نکات مربوط به سیستم تحریک

وظایف سیستم تحریک با توجه به ملاحظات مربوط به ژنراتور سنکرون و سیستم قدرت تعیین می‌شود.

۱-۳-۳ ملاحظات مربوط به ژنراتور سنکرون

وظیفه‌ی اصلی سیستم تحریک آن است که به منظور ثابت نگه داشتن ولتاژ پایانه ماشین هنگام تغییر خروجی، جریان تحریک ماشین سنکرون را در محدوده ظرفیت پیوسته ژنراتور، تأمین و به طور خودکار تنظیم کند. علاوه بر این سیستم تحریک باید قادر باشد با تنظیم تحریک منطبق با توانایی‌های لحظه‌ای و کوتاه مدت ژنراتور، در مقابل اغتشاش‌های گذرا عکس‌العمل نشان دهد [۱۶].

۲-۳-۳ ملاحظات مربوط به سیستم قدرت

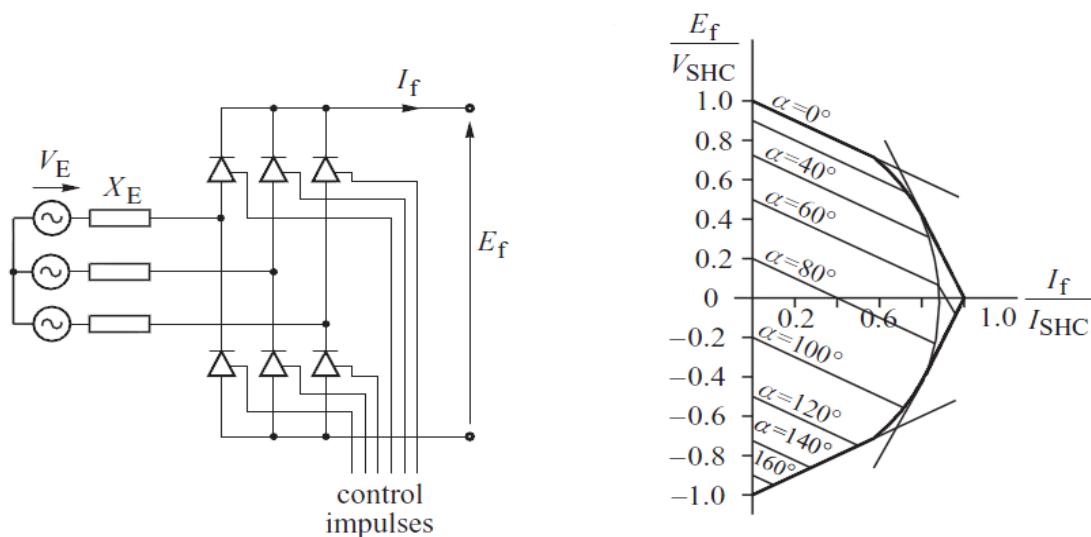
از دیدگاه سیستم قدرت، باید سیستم تحریک به کنترل موثر ولتاژ و تقویت پایداری شبکه کمک نماید. این سیستم باید قادر باشد به منظور تقویت پایداری گذرا سریعا به اغتشاش پاسخ دهد و به منظور تقویت پایداری اغتشاش کوچک، به تحریک ژنراتور، سیگنال مناسب را اعمال نماید [۲۰].

۴-۳ سیستم تحریک استاتیک-نوع *ST*

در این نوع از سیستم‌های تحریک، ولتاژ (همچنین جریان در سیستم‌های کمپوند) به سطح

مناسبی رسانده می‌شوند. یکسوسازها چه به صورت قابل کنترل و چه به صورت غیرقابل کنترل، فراهم-کننده جریان مستقیم مورد نیاز برای میدان ژنراتور می‌باشد. ولتاژ سقف تحریک‌کننده برای بسیاری از سیستم‌های تحریک بسیار بالاست. برای چنین سیستم‌هایی ممکن است مدارهای محدود کننده کمکی جریان میدان به منظور حفاظت از تحریک‌کننده و روتور ژنراتور استفاده شود. این مدارهای کمکی شامل المان‌های تاخیری و لحظه‌ای می‌باشند. ولی این نوع از سیستم‌های تحریک فقط محدودکننده‌های لحظه‌ای را شامل می‌شوند.

در سیستم‌های تحریک دارای یکسوساز سه‌فاز کنترل شده با ۶ تریستور، مشخصه خروجی یکسوساز وابسته به زاویه آتش α و مشخصه کموتاسیون سیستم به صورت شکل ۳-۴ خواهد بود. نکته‌ی مهم در این مشخصه قابلیت تولید ولتاژ منفی در خروجی تحریک‌کننده است. اگرچه ولتاژ خروجی ممکن است منفی شود ولی جهت شارش جریان همواره در یک جهت می‌باشد. با افزایش زاویه آتش، ولتاژ خروجی یکسوساز کنترل شده متناسب با $\cos \alpha$ همانند شکل ۳-۴ کاهش می‌یابد.



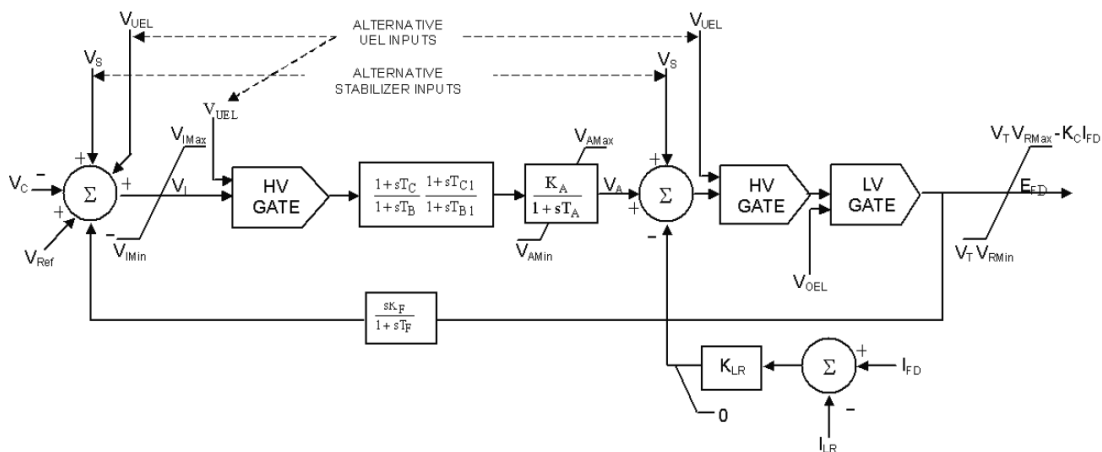
شکل ۳-۴: یکسوساز تمام پل کنترل شده سه فاز. الف: مدار معادل ب: مشخصه‌ی جریان ولتاژ [۲]

۱-۴-۳ مدل سیستم تحریک استاتیک نوع $STIA$

مدل سیستم تحریک استاتیک با یکسوساز قابل کنترل و منبع ولتاژ نوع $STIA$ در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است. در این سیستم‌ها توان تحریک از طریق ترانسفورمر ترمینال‌های ژنراتور (و یا

باس کمکی واحد) تامین می‌گردد و پس از آن از طریق یکسوساز قابل کنترل تنظیم می‌شود. ماکزیمم مقدار ولتاژی که در این چنین سیستم‌هایی در دسترس است، وابسته به ترمینال ژنراتور می‌باشد. در این نوع سیستم تحریک، ثوابت زمانی اصلی مربوط به تحریک کننده بسیار کوچک هستند و ممکن است پایدارسازی تحریک نیاز نباشد. به عبارت دیگر در این سیستم‌ها کاهش بهره گذرایی مطلوب است. این مدل ارائه شده تطابق بسیار خوبی در جهت کاهش بهره گذرا در مسیر مستقیم از طریق تنظیم ثوابت T_C و T_B در جایی که K_F برابر با صفر تنظیم شده است و یا در مسیر فیدبک با انتخاب مناسب پارامترهای T_F و K_F دارد. بهره تنظیم کننده ولتاژ و ثابت زمانی سیستم تحریک به ترتیب با K_A و T_A نمایش داده می‌شود. ثابت‌های زمانی T_{CI} و T_{B1} ، امکان افزایش بهره گذرا را فراهم می‌کند. در این حالت T_{CI} مایل است بزرگتر از T_{B1} باشد.

راهی که از طریق آن زاویه آتش یکسوساز پل بدست می‌آید و بر روی رابطه بین ورودی و خروجی تاثیرگذار است. با انتخاب بهره ساده برای K_A ، رابطه بین ورودی و خروجی خطی فرض می‌شود. برای بسیاری از سیستم‌ها، این رابطه یک رابطه خطی است ولی در تعداد محدودی از سیستم‌ها، رابطه مربوط به پل یکسوساز به صورت غیرخطی می‌باشد و مقدار بهره به صورت تابعی سینوسی و وابسته به ولتاژ منبع می‌باشد. از آنجا که بهره معمولا در مقدار زیادی تنظیم می‌شود، خطی‌سازی این مشخصه برای مدل‌سازی‌ها انجام می‌شود. در این مدل چه مشخصه خطی باشد و یا غیر خطی باشد، نمایش ولتاژ سقف همانند قبل می‌باشد.



شکل ۳-۵: تحریک کننده با یکسوسازساز قابل کنترل و منبع پتانسیل نوع ST/A [۱۹]

در بسیاری از موارد، کران‌های داخلی روی V_I قابل نظر کردن هستند. کران‌های ولتاژ میدان که توابعی از ولتاژ ترمینال و جریان میدان ماشین سنکرون هستند بایستی مدل‌سازی شوند. کران مثبت ولتاژ میدان به صورت تابعی خطی از جریان میدان ماشین سنکرون قابل نمایش است. کران منفی هم به طور مشابه، به مشخصه جریان وابسته است ولی علامت آن به واسطه انتخاب زاویه آتش و یا زاویه خاموشی تعیین می‌گردد. به علت قابلیت اعمال نیروی زیاد این سیستم‌ها، گاهی اوقات از محدودکننده جریان میدان، جهت محافظت تحریک‌کننده و روتور ژنراتور استفاده می‌شود. مقدار تنظیمی برای شروع محدوده کران، توسط جریان I_{LR} و بهره K_{LR} تعیین می‌گردد. به منظور در نظر نگرفتن این کران، K_{LR} بایستی برابر صفر در نظر گرفته شود.

در اکثر این نوع از سیستم‌های تحریک از پل تمام کنترل شونده استفاده می‌شود، ولی این مدل قابل اعمال به پل‌های نیم کنترل‌شونده که کران منفی ولتاژ میدان روی صفر تنظیم شود نیز می‌باشد. $(V_{R \min} = 0)$ [۱۹]

۳-۴-۲ ساده سازی سیستم تحریک

با در نظر گرفتن شرایط زیر مدل سیستم تحریک نمایش داده شده در شکل ۳-۵ را ساده می‌کنیم.

۱. بلوک‌های $\frac{1+sT_C}{1+sT_B}$ و $\frac{K_A}{1+sT_A}$ محرک استاتیک را نمایش می‌دهند در حالی که

مدار پایدارساز سیستم تحریک را نشان می‌دهد [۲۱]. $\frac{sT_F}{1+sT_F}$

۲. با توجه به ۳-۲-۳ مقادیر $R_c = 0$ ، $X_c = 0$ در نظر می‌گیریم در نتیجه $V_{C1} = \bar{V}_T$

است.

۳. سیگنال اصلی ورودی به سیستم تحریک (V_{C1}) ، ولتاژ خروجی مبدل ولتاژ است.

۴. در بلوک $\frac{1}{1+sT_R}$ ثابت زمانی T_R یک تأخیر پیوسته برای تنظیم کننده ولتاژ فراهم می کند.

این ثابت زمانی در بسیاری از سیستم ها خیلی کوچک یا تقریباً صفر در نظر گرفته می شود [۲۲].

۵. در اولین نقطه جمع کننده، V_C از ولتاژ مرجع تنظیم کننده ولتاژ (V_{Ref}) کم می شود و در صورتی که از پایدار ساز سیستم قدرت استفاده شده باشد، سیگنال خروجی آن (V_S) اضافه می گردد تا سیگنالی که سیستم تحریک را کنترل می کند، به وجود آید.

سیگنالی که سیستم تحریک را کنترل می کند $V_C - V_{Ref} - V_C =$

۶. خروجی محدود کننده زیر تحریک (V_{UEL}) و محدود کننده فوق تحریک (V_{OEL}) فقط در حالت بحرانی و غیرعادی نقش بازی می کنند. هنگامی که ژنراتور در حالت عادی کار می کند $V_{UEL} = 0$ است.

۷. سیگنال خروجی پایدار ساز سیستم قدرت (V_S)، در حالت ماندگار صفر است $V_S = 0$

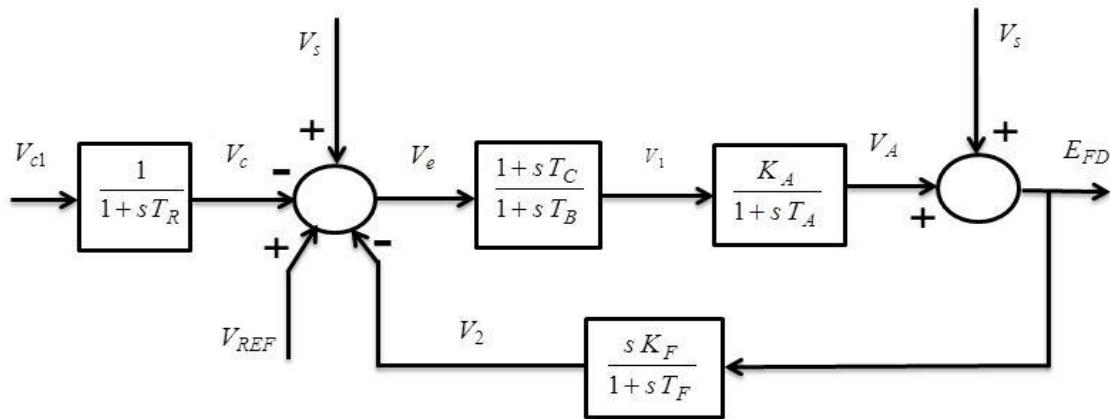
۸. در حالت ماندگار V_{Ref} دارای مقداری است که در وضعیت بارگذاری ماشین، سیگنال خطای لازم را برای ایجاد ولتاژ مورد نیاز تحریک (E_{fd}) ایجاد می کند.

۹. در مدل ساده شده مدارهای محدود کننده یعنی محدود کننده زیر تحریک، محدود کننده ولت بر هرتز و محدود کننده حداکثر تحریک، نمایش داده نشده اند. این مدارها معمولاً در حالت عادی نقش بازی نمی کنند و در مطالعات پایداری گذرا و سیگنال کوچک مدل نمی شوند اما ممکن است در مطالعات پایداری بلند مدت و ولتاژ مهم باشند.

۱۰. با توجه به اینکه مقادیر $T_{BI} = 0, T_{CI} = 0$ است بلوک $\frac{1+sT_{CI}}{1+sT_{BI}}$ در نظر گرفته

نمی شود. (به عبارت دیگر مقادیر T_{BI} و T_{CI} را مقادیر خیلی کوچک در نظر می گیریم که معادل صفر و قطب پایدار خیلی بزرگ هستند که عملاً بی تاثیر است)

۱۱. تعداد انتگرال گیرهای موجود، برابر متغیرهای حالت است.



۶-۳: بلوک دیاگرام ساده شده سیستم تحریک

۳-۴-۳ بدست آوردن مدل فضای حالت

با توجه به اینکه برای طراحی کنترل مقاوم نیاز به مدل فضای حالت داریم، ابتدا با توجه به

شکل ۶-۳ بردار ورودی‌های سیستم $U = [V_{C1} \ V_S \ V_{ref}]^T$ و بردار متغیرهای حالت سیستم

$X = [V_1 \ V_2 \ V_C \ V_A]$ و خروجی سیستم به صورت $Y = [E_{FD}]$ تعریف می‌کنیم. معادلات فضای

حالت به روش زیر بدست می‌آید.

$$V_C = \frac{1}{1+sT_R} V_{C1} \Rightarrow V_C + sT_R V_C = V_{C1} \Rightarrow \dot{V}_C = \frac{-1}{T_R} V_C + \frac{1}{T_R} V_{C1} \quad (1-3)$$

$$V_e = V_S - V_C + V_{Ref} - V_2 \Rightarrow \dot{V}_e = -\dot{V}_C - \dot{V}_2 \quad (2-3)$$

$$V_1 = \frac{1+sT_C}{1+sT_B} V_e \Rightarrow V_1 + sT_B V_1 = V_e + sT_C V_e \Rightarrow \dot{V}_1 = \frac{1}{T_B} (V_e + T_C \dot{V}_e - V_1)$$

$$\Rightarrow \dot{V}_1 = \frac{1}{T_B} (-V_C + V_S + V_{Ref} - V_2 - T_C \dot{V}_2 - T_C \dot{V}_C - V_1) \quad (3-3)$$

$$V_A = \frac{K_A}{1+sT_A} V_1 \Rightarrow V_A + sT_A V_A = K_A V_1 \Rightarrow \dot{V}_A = \frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{1}{T_A} V_A \quad (4-3)$$

$$E_{FD} = V_A + V_S \Rightarrow \dot{E}_{FD} = \dot{V}_A \Rightarrow \dot{E}_{FD} = \frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{1}{T_A} V_A \quad (5-3)$$

$$V_2 = \frac{sK_F}{1+sT_F} E_{FD} \Rightarrow V_2 + sT_F V_2 = sK_F E_{FD} \Rightarrow \dot{V}_2 = \frac{1}{T_F} (K_F \dot{E}_{FD} - V_2)$$

$$\Rightarrow \dot{V}_2 = \frac{1}{T_F} (K_F (\frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{1}{T_A} V_A) - V_2) \Rightarrow \dot{V}_2 = \frac{K_A K_F}{T_A T_F} V_1 - \frac{1}{T_F} V_2 - \frac{K_F}{T_A T_F} V_A \quad (6-3)$$

با جایگذاری (۱-۳) و (۶-۳) در معادله (۳-۳)

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \dot{V}_1 &= \frac{1}{T_B} (-V_C + V_S + V_{Ref} - V_2 - T_C \dot{V}_2 - T_C \dot{V}_C - V_1) \\
\Rightarrow \dot{V}_1 &= \frac{1}{T_B} [-V_C + V_S + V_{Ref} - V_2 - T_C (\frac{K_A K_F}{T_A T_F} V_1 - \frac{K_F}{T_A T_F} V_A - \frac{1}{T_F} V_2) - \\
&\quad T_C (\frac{-1}{T_R} V_C + \frac{1}{T_R} V_{Cl}) - V_1] \\
\Rightarrow \dot{V}_1 &= -\frac{1}{T_B} V_C + \frac{1}{T_B} V_S + \frac{1}{T_B} V_{Ref} - \frac{1}{T_B} V_2 - \frac{T_C K_A K_F}{T_B T_A T_F} V_1 + \\
&\quad \frac{T_C K_F}{T_B T_A T_F} V_A + \frac{T_C}{T_B T_F} V_2 + \frac{T_C}{T_B T_R} V_C - \frac{T_C}{T_B T_R} V_{Cl} - \frac{1}{T_B} V_1 \\
\Rightarrow \dot{V}_1 &= (-\frac{1}{T_B} - \frac{T_C K_A K_F}{T_B T_A T_F}) V_1 + (-\frac{1}{T_B} + \frac{T_C}{T_B T_F}) V_2 + (\frac{T_C}{T_B T_R} - \frac{1}{T_B}) V_C + \\
&\quad \frac{T_C K_F}{T_B T_A T_F} V_A + \frac{1}{T_B} V_S + \frac{1}{T_B} V_{Ref} - \frac{T_C}{T_B T_R} V_{Cl} \tag{۷-۳}
\end{aligned}$$

با توجه به معادلات (۷-۳) و (۶-۳) و (۱-۳) و (۵-۳) داریم

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= (-\frac{1}{T_B} - \frac{T_C K_A K_F}{T_B T_A T_F}) V_1 + (-\frac{1}{T_B} + \frac{T_C}{T_B T_F}) V_2 + (\frac{T_C}{T_B T_R} - \frac{1}{T_B}) V_C + \\
&\quad \frac{T_C K_F}{T_B T_A T_F} V_A + \frac{1}{T_B} V_S + \frac{1}{T_B} V_{Ref} - \frac{T_C}{T_B T_R} V_{Cl} \\
\dot{V}_2 &= \frac{1}{T_F} (K_F (\frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{1}{T_A} V_A) - V_2) \Rightarrow \dot{V}_2 = \frac{K_A K_F}{T_A T_F} V_1 - \frac{1}{T_F} V_2 - \frac{K_F}{T_A T_F} V_A \\
\dot{V}_C &= \frac{-1}{T_R} V_C + \frac{1}{T_R} V_{Cl} \\
\dot{V}_A &= \frac{K_A}{T_A} V_1 - \frac{1}{T_A} V_A
\end{aligned}$$

در نتیجه معادلات فضای حالت را به صورت استاندارد زیر داریم:

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$Y = CX + DU$$

$$X = [V_1 \ V_2 \ V_C \ V_A]^T \quad U = [V_{Cl} \ V_S \ V_{Ref}]^T \quad Y = [E_{FD}]$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_B} - \frac{T_C K_A K_F}{T_B T_A T_F} & -\frac{1}{T_B} + \frac{T_C}{T_B T_F} & -\frac{1}{T_B} + \frac{T_C}{T_B T_R} & \frac{T_C K_F}{T_B T_A T_F} \\ \frac{K_A K_F}{T_A T_F} & -\frac{1}{T_F} & 0 & \frac{K_F}{T_A T_F} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_R} & 0 \\ \frac{K_A}{T_A} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{T_C}{T_B T_R} & \frac{1}{T_B} & \frac{1}{T_B} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$D = [0 \ 1 \ 0]$$

جدول ۳-۱: مقدار قراردادی پارامترهای سیستم تحریک نیروگاه

پارامتر	توصیف پارامتر	مقدار نوعی
T_R	Regulator input filter time constant	۰/۰۲
T_C	Transient time constant	۱
T_B	Transient time constant	۵
K_A	Regulator gain	۵۰
T_A	Regulator amplifies time constant	۰/۰۱
K_F	Regulator stabilizing circuit gain	۰/۱
T_F	Regulator stabilizing circuit time constant	۰/۷

۳-۵ مطالعه قوام^۱ پارامترهای سیستم تحریک ST1A

همانطور که در فصل ۲ گفته شد برای طراحی کنترل مقاوم باید از مهمترین پارامتر ماتریس

حالت استفاده کرد. در این بخش تأثیر وجود عدم قطعیت در پارامترهای سیستم تحریک را بررسی

^۱ Robustness

می‌کنیم تا مشخص شود کدام پارامتر بیشترین اثر را بر روی مقادیر ویژه سیستم دارد.

با توجه به مقادیر نامی پارامترهای سیستم تحریک $STIA$ (جدول ۳-۱) و ماتریس حالت A

مقادیر ویژه سیستم به صورت زیر است.

$$A = \begin{bmatrix} -143/0.571 & 0/0.857 & 9/8 & 2/8571 \\ 714/2857 & -1/4286 & 0 & -14/2857 \\ 0 & 0 & -50 & 0 \\ 5000 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix}$$

جدول ۳-۲: مقادیر ویژه ماتریس حالت به ازای مقادیر نامی

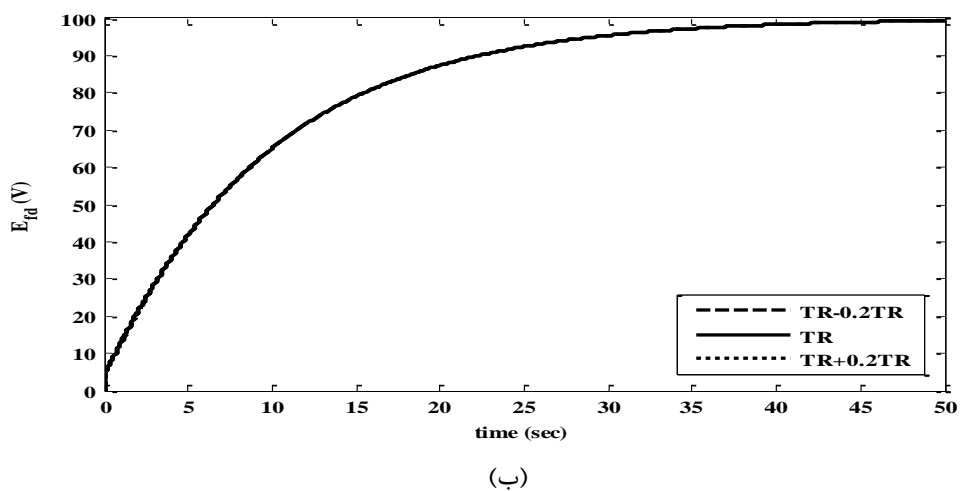
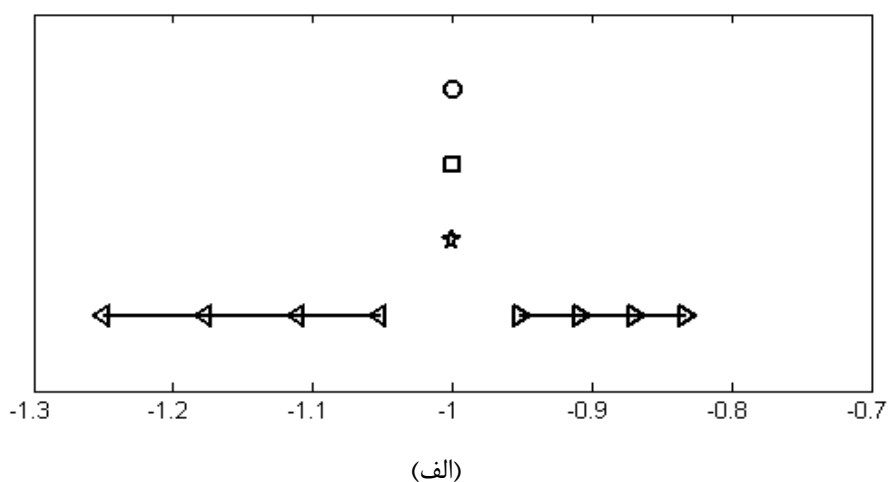
مقدار ویژه	قسمت حقیقی	قسمت موهومی
۱	-۲۴۳/۲۲۸۱	۰
۲	-۰/۱۰۱۶	۰
۳	-۱/۱۵۶۰	۰
۴	-۵۰	۰

۱. بررسی تأثیر تغییر پارامتر T_R بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۳-۳: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_R

مقدار ویژه	$T_R + 0/0.5T_R$	$T_R + 0/1.0T_R$	$T_R + 0/1.5T_R$	$T_R + 0/2.0T_R$
حالت ۱	-۲۴۳/۲۲۸۲	-۲۴۳/۲۲۸۲	-۲۴۳/۲۲۸۲	-۲۴۳/۲۲۸۲
حالت ۲	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶
حالت ۳	-۱/۱۵۶۰	-۱/۱۵۶۰	-۱/۱۵۶۰	-۱/۱۵۶۰

حالت ۴	-۴۷/۶۱۹۰	-۴۵/۴۵۴۵	-۴۳/۴۷۸۳	-۴۱/۶۶۶۷
مقدار ویژه	$T_R - 0.05T_R$	$T_R - 0.10T_R$	$T_R - 0.15T_R$	$T_R - 0.20T_R$
حالت ۱	-۲۴۳/۲۲۸۲	-۲۴۳/۲۲۸۲	-۲۴۳/۲۲۸۲	-۲۴۳/۲۲۸۲
حالت ۲	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶
حالت ۳	-۱/۱۵۶۰	-۱/۱۵۶۰	-۱/۱۵۶۰	-۱/۱۵۶۰
حالت ۴	-۵۲/۶۳۱۶	-۵۵/۵۵۵۶	-۵۸/۸۲۳۵	-۶۲/۵۰۰

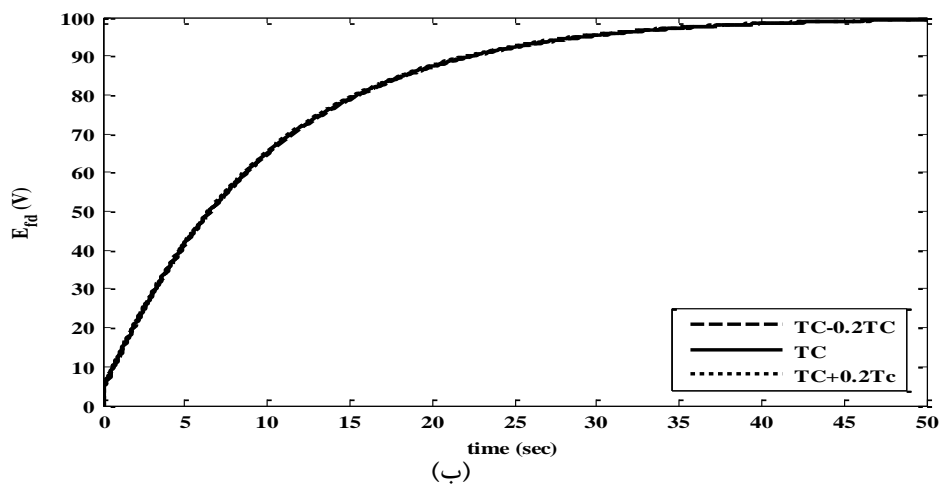
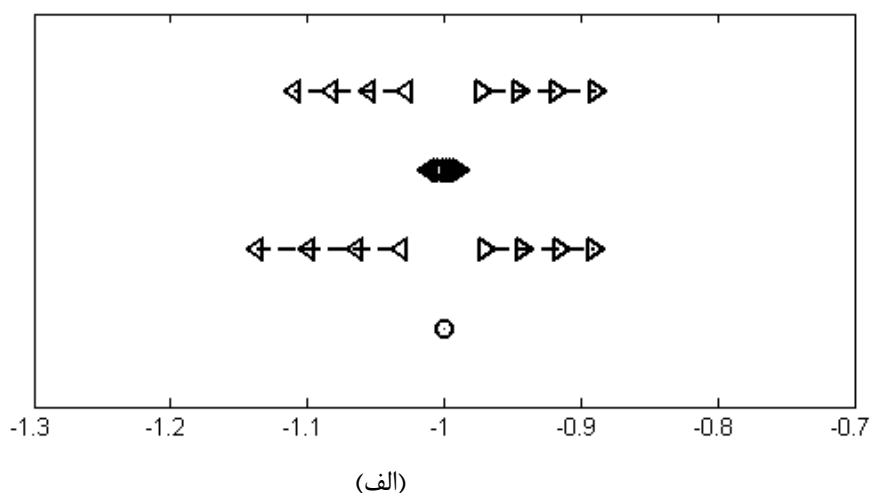


شکل ۳-۷: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_R
 ۲. بررسی تأثیر تغییر پارامتر T_C بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۳-۴: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_C

مقدار ویژه	$T_C + 0.05T_C$	$T_C + 0.10T_C$	$T_C + 0.15T_C$	$T_C + 0.20T_C$
حالت ۱	-۲۵۰/۴۰۷۰	-۲۵۷/۵۸۳۹	-۲۶۴/۷۵۸۹	-۲۷۱/۹۳۲۲
حالت ۲	-۰/۱۰۱۹	-۰/۱۰۲۲	-۰/۱۰۲۵	-۰/۱۰۲۸
حالت ۳	-۱/۱۱۹۶	-۱/۰۸۵۳	-۱/۰۵۲۹	-۱/۰۲۲۱

حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰
مقدار ویژه	$T_C - 0.05T_C$	$T_C - 0.1T_C$	$T_C - 0.15T_C$	$T_C - 0.2T_C$
حالت ۱	-۲۳۶/۰۴۷۰	-۲۲۸/۸۶۳۵	-۲۲۱/۶۷۷۳	-۲۱۴/۴۸۸۳
حالت ۲	-۰/۱۰۱۳	-۰/۱۰۱۰	-۰/۱۰۰۸	-۰/۱۰۰۵
حالت ۳	-۱/۱۹۴۵	-۱/۲۳۵۴	-۱/۲۷۹۰	-۱/۳۲۵۵
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰

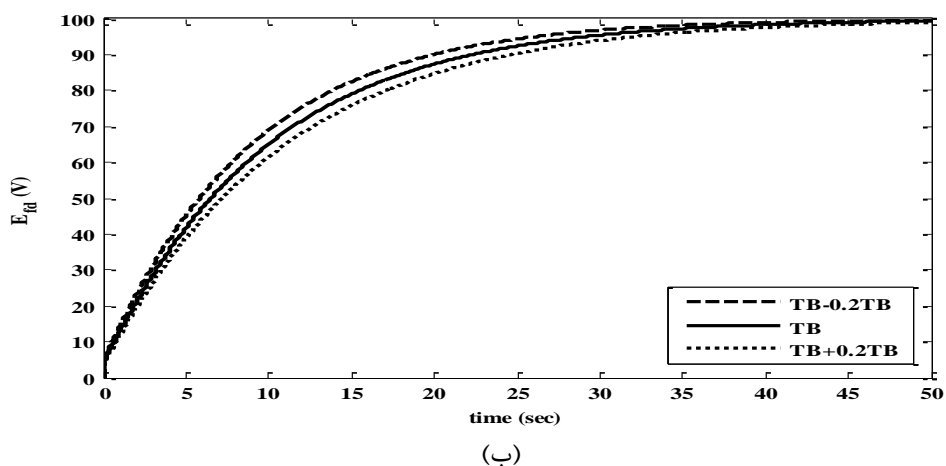
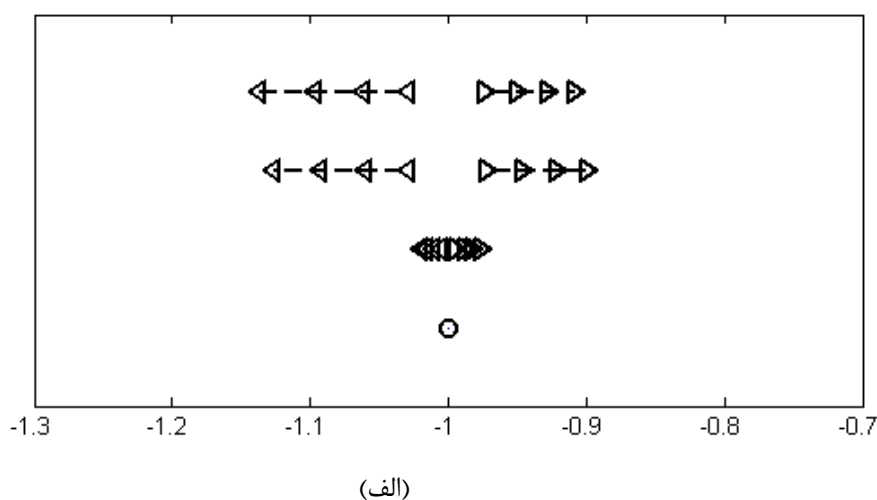


شکل ۳-۸: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_C
 ۳. بررسی تأثیر تغییر پارامتر T_B بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۳-۵: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_B

مقدار ویژه	$T_B + 0.05T_B$	$T_B + 0.1T_B$	$T_B + 0.15T_B$	$T_B + 0.2T_B$
حالت ۱	-۲۳۶/۴۱۲۵	-۲۳۰/۲۱۶۲	-۲۲۴/۵۵۸۷	-۲۱۹/۳۷۲۴
حالت ۲	-۰/۰۹۹۱	-۰/۰۹۹۶	-۰/۰۹۴۳	-۰/۰۹۲۱
حالت ۳	-۱/۱۶۱۹	-۱/۱۷۳۱	-۱/۱۷۳۱	-۱/۱۷۸۳

حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰
مقدار ویژه	$T_B - 0.05T_B$	$T_B - 0.10T_B$	$T_B - 0.15T_B$	$T_B - 0.20T_B$
حالت ۱	-۲۵۰/۷۶۱۰	-۲۵۹/۱۳۰۶	-۲۶۸/۴۸۴۶	-۲۷۹/۰۰۷۵
حالت ۲	-۰/۱۰۴۳	-۰/۱۰۷۲	-۰/۱۱۰۲	-۰/۱۱۳۴
حالت ۳	-۱/۱۴۹۷	-۱/۱۴۳۲	-۱/۱۳۶۳	-۱/۱۲۹۱
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰



شکل ۳-۹: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_B

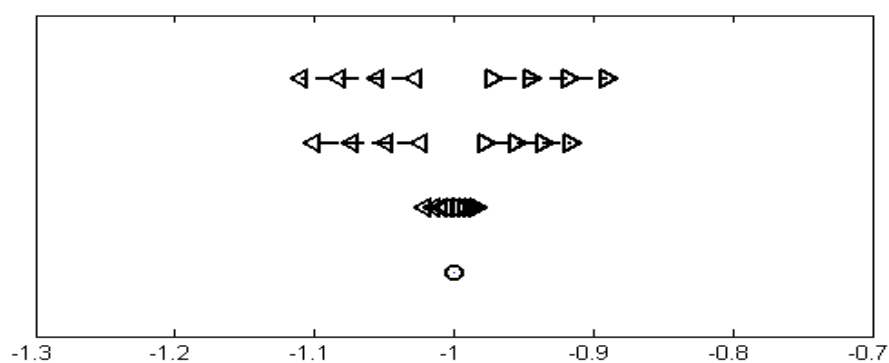
۴. بررسی تأثیر تغییر پارامتر K_A بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۳-۶: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر K_A

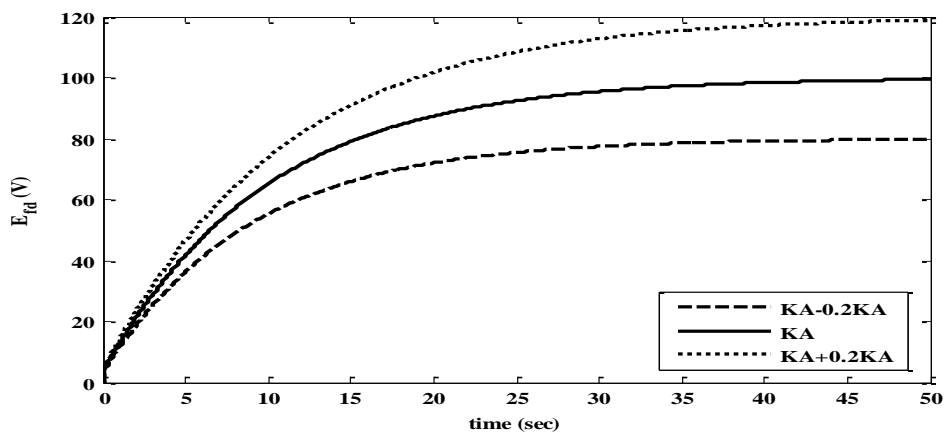
مقدار ویژه	$K_A + 0.05K_A$	$K_A + 0.10K_A$	$K_A + 0.15K_A$	$K_A + 0.20K_A$
حالت ۱	-۲۵۰/۳۷۸۳	-۲۵۷/۵۲۸۲	-۲۶۴/۶۷۷۶	-۲۷۱/۸۲۶۷
حالت ۲	-۰/۰۹۹۱	-۰/۰۹۶۸	-۰/۰۹۴۵	-۰/۰۹۲۴

حالت ۳	-۱/۱۵۱۱	-۱/۱۴۶۵	-۱/۱۴۲۲	-۱/۱۳۸۱
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰

مقدار ویژه	$K_A - 0.05K_A$	$K_A - 0.10K_A$	$K_A - 0.15K_A$	$K_A - 0.20K_A$
حالت ۱	-۲۳۶/۰۷۷۴	-۲۲۸/۹۲۶۳	-۲۲۱/۷۷۴۶	-۲۱۴/۶۲۲۳
حالت ۲	-۰/۱۰۴۲	-۰/۱۰۷۰	-۰/۱۰۹۹	-۰/۱۱۲۹
حالت ۳	-۱/۱۶۱۲	-۱/۱۶۶۸	-۱/۱۷۲۷	-۱/۱۷۹۱
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۰: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه (ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر K_A

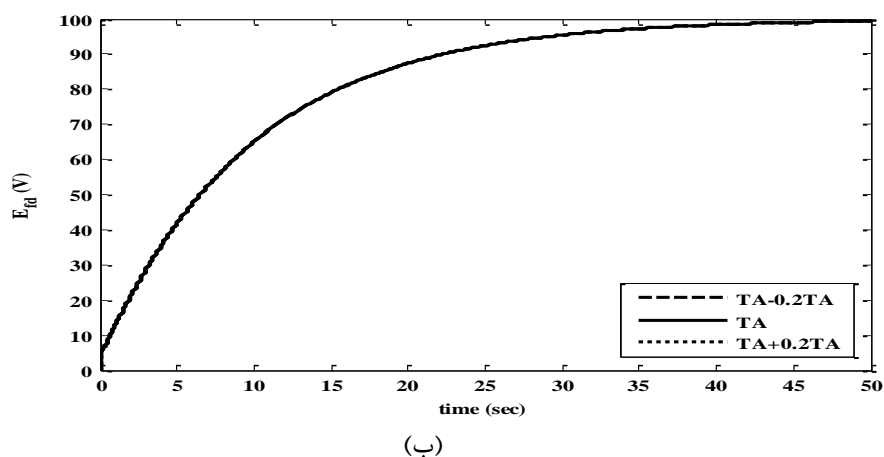
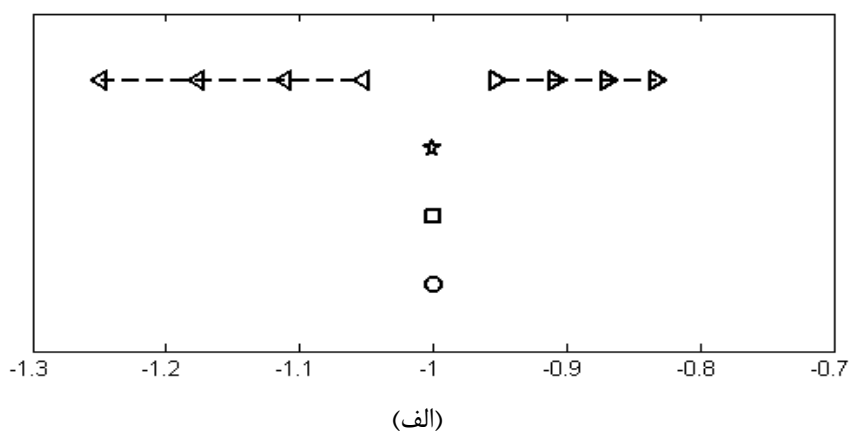
۵. بررسی تأثیر تغییر پارامتر T_A بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۳-۷: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_A

مقدار ویژه	$T_A + 0.05T_A$	$T_A + 0.10T_A$	$T_A + 0.15T_A$	$T_A + 0.20T_A$
حالت ۱	-۲۳۱/۶۶۳۶	-۲۲۱/۱۵۰۳	-۲۱۱/۵۵۱۳	-۲۰۲/۷۵۲۲

حالت ۲	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶
حالت ۳	-۱/۱۵۵۹	-۱/۱۵۵۹	-۱/۱۵۵۸	-۱/۱۵۵۷
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰

مقدار ویژه	$T_A - 0.05T_A$	$T_A - 0.10T_A$	$T_A - 0.15T_A$	$T_A - 0.20T_A$
حالت ۱	-۲۵۶/۰۱۰۰	-۲۷۰/۲۱۲۱	-۲۸۶/۰۸۵۱	-۳۰۳/۹۴۲۲
حالت ۲	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶	-۰/۱۰۱۶
حالت ۳	-۱/۱۵۶۰	-۱/۱۵۶۱	-۱/۱۵۶۲	-۱/۱۵۶۲
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰



شکل ۳-۱۱: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه و ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_A

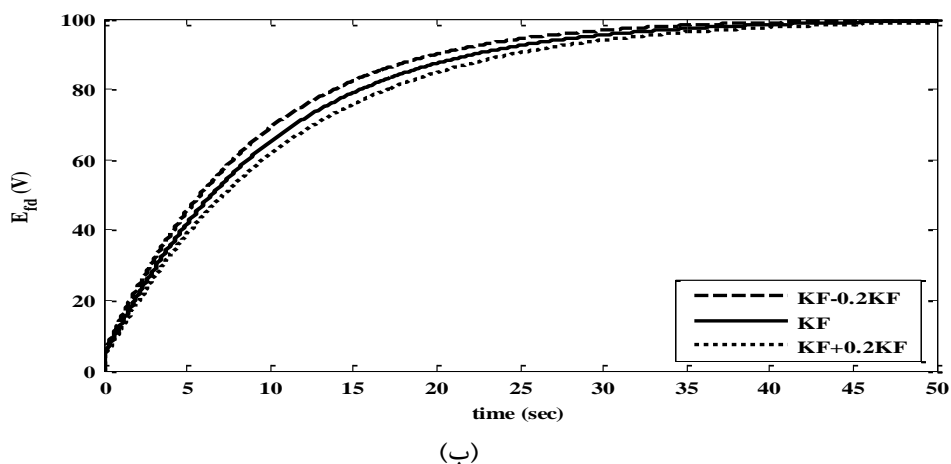
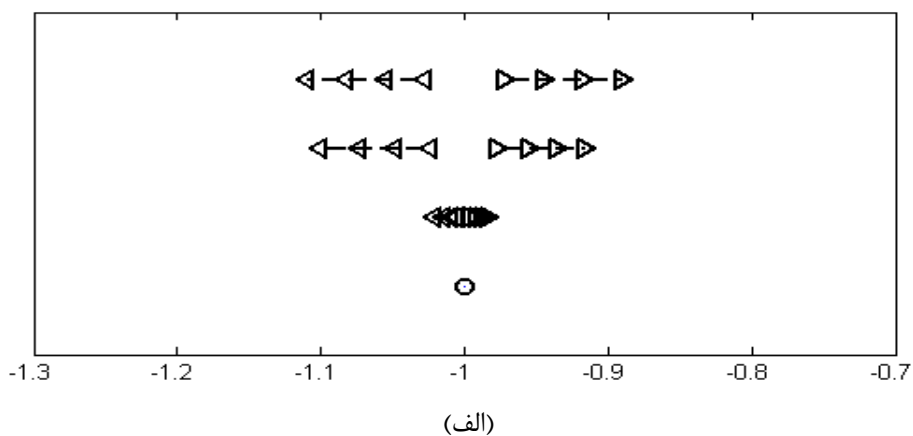
۶. بررسی تاثیر تغییر پارامتر K_F بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۳-۸: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر K_F

مقدار ویژه	$K_F + 0.05K_F$	$K_F + 0.10K_F$	$K_F + 0.15K_F$	$K_F + 0.20K_F$
حالت ۱	-۲۵۰/۳۷۸۳	-۲۵۷/۵۲۸۲	-۲۶۴/۶۷۷۶	-۲۷۱/۸۲۶۷

حالت ۲	-۰/۰۹۹۱	-۰/۰۹۶۸	-۰/۰۹۴۶	-۰/۰۹۲۴
حالت ۳	-۱/۱۵۱۱	-۱/۱۴۶۵	-۱/۱۴۲۲	-۱/۱۳۸۱
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰

مقدار ویژه	$K_F - 0.05K_F$	$K_F - 0.10K_F$	$K_F - 0.15K_F$	$K_F - 0.20K_F$
حالت ۱	-۲۳۶/۰۷۷۴	-۲۲۸/۹۲۶۳	-۲۲۱/۷۷۴۶	-۲۱۴/۶۲۲۳
حالت ۲	-۰/۱۰۴۲	-۰/۱۰۷۰	-۰/۱۰۹۹	-۰/۱۱۲۹
حالت ۳	-۱/۱۶۱۲	-۱/۱۶۶۸	-۱/۱۷۲۷	-۱/۱۷۹۱
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰



شکل ۳-۱۲: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر K_F

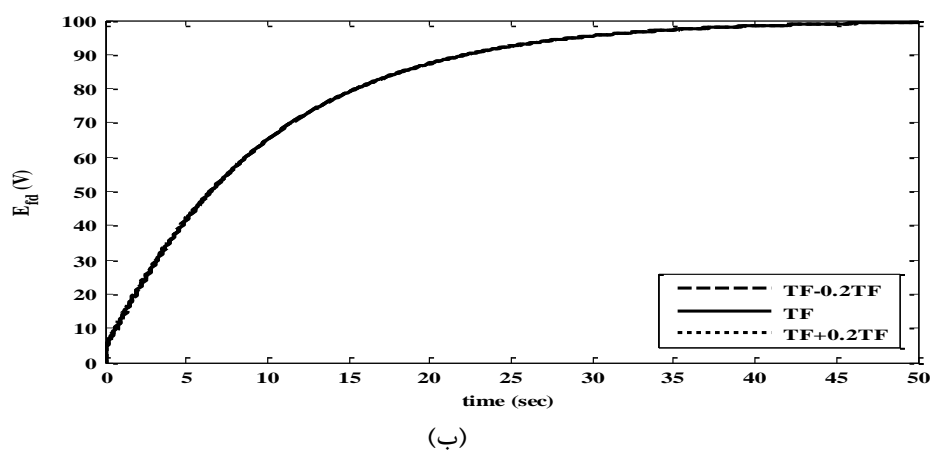
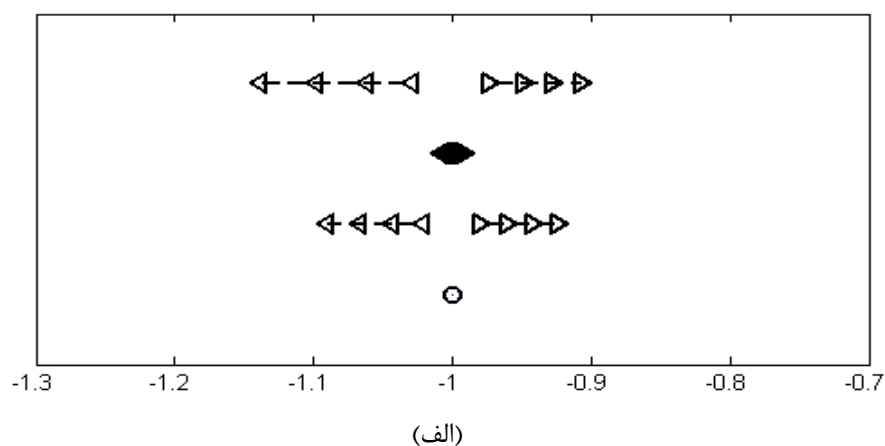
۷. بررسی تاثیر تغییر پارامتر T_F بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۳-۹: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_F

مقدار ویژه	$T_F + 0.05T_F$	$T_F + 0.10T_F$	$T_F + 0.15T_F$	$T_F + 0.20T_F$
------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

حالت ۱	-۲۳۶/۳۷۸۵	-۲۳۰/۱۵۲۷	-۲۲۴/۴۶۹۳	-۲۱۹/۲۶۰۴
حالت ۲	-۰/۱۰۱۴	-۰/۱۰۱۲	-۰/۱۰۱۰	-۰/۱۰۰۸
حالت ۳	-۱/۱۳۵۰	-۱/۱۱۴۹	-۱/۰۹۵۵	-۱/۰۷۶۹
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰

مقدار ویژه	$T_F - 0.05T_F$	$T_F - 0.1T_F$	$T_F - 0.15T_F$	$T_F - 0.2T_F$
حالت ۱	-۲۵۰/۸۰۰۱	-۲۵۹/۲۱۴۹	-۲۶۸/۶۲۱۳	-۲۷۹/۲۰۵۶
حالت ۲	-۰/۱۰۱۸	-۰/۱۰۲۰	-۰/۱۰۲۲	-۰/۱۰۲۴
حالت ۳	-۱/۱۷۷۸	-۱/۲۰۰۶	-۱/۲۲۴۴	-۱/۲۴۹۲
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰



شکل ۳-۱۳: الف) تغییر موقعیت مقادیر ویژه ب) پاسخ سیستم تحریک به تغییر پارامتر T_F با توجه به تغییر مقادیر ویژه نرمالیزه شده شکل ۳-۷ الف تا شکل ۳-۱۳ الف و همچنین پاسخ سیستم شکل ۳-۷ ب تا شکل ۳-۱۳ ب می‌توان نتیجه گرفت پارامتر K_A بیشترین اثر را بر روی

مقادیر ویژه سیستم دارد.

۳-۶ طراحی کنترل مقاوم

۳-۶-۱ طراحی کنترل مقاوم سیستم تحریک بر اساس پارامتر K_A :

با در نظر گرفتن عدم قطعیت K_A بعنوان اثرگذارترین پارامتر سیستم تحریک $STIA$ طراحی

کنترل مقاوم بهینه برای مقابله با عدم قطعیت را انجام می‌دهیم. پارامتر دارای عدم قطعیت $p = K_A$ فقط در ماتریس حالت سیستم (A) وجود دارد و ماتریس ورودی سیستم (B) دارای عدم قطعیت نیست. سایر پارامترها را برابر مقدار قراردادیشان در نظر می‌گیریم.

برای ساده‌سازی روند طراحی کنترل مقاوم بهینه سیستم تحریک، ورودی مربوط به پایدارساز

سیستم قدرت (V_S) را در نظر نمی‌گیریم. بنابراین ماتریس ورودی B به صورت می‌شود.

$$B_{new} = \begin{bmatrix} -\frac{T_C}{T_B T_R} & \frac{1}{T_B} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T_R} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{new} = [V_{C1} \quad V_{Ref}]$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{20p}{7} - \frac{1}{5} & \frac{3}{35} & \frac{49}{5} & \frac{20}{7} \\ \frac{100p}{7} & -\frac{10}{7} & 0 & -\frac{100}{7} \\ 0 & 0 & -50 & 0 \\ 100p & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -10 & 0.2 \\ 0 & 0 \\ 50 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{Ref} \end{bmatrix}$$

پارامترهای سیستم تحریک دارای کهنگی، به آرامی تغییر می‌کنند، همچنین اگر این پارامترها

توسط اپراتور اندازه‌گیری شود، این خطا کمتر از ۲۰٪ مقدار نامی پارامتر است، بنابراین

$$p \in [p_0 - 0.2 \cdot p_0 \quad p_0 + 0.2 \cdot p_0] = [40 \quad 60]$$

برای تبدیل این مساله به مساله LQR ، به ازای مقدار نامی $P_0 = K_{A0} = 50$ شرط کنترل

پذیری را بررسی می‌کنیم (فرض ۲-۳). ماتریس کنترل‌پذیری برابر است با:

$$C = \begin{bmatrix} B_{new} & A(p_0)B_{new} & A(p_0)^2 B_{new} & A(p_0)^3 B_{new} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -10 & 0.2 & 1.92 \times 10^3 & -28.61 & -4.427 \times 10^5 & 6.96 \times 10^3 & 1.064 \times 10^8 & -1.693 \times 10^6 \\ 0 & 0 & -7.14 \times 10^3 & 142.85 & 2.096 \times 10^5 & -3.492 \times 10^4 & -5.2784 \times 10^8 & 8.4953 \times 10^5 \\ 50 & 0 & -2500 & 0 & 125000 & 0 & -625000 & 0 \\ 0 & 0 & -50000 & 1000 & 1.46 \times 10^7 & -2.43 \times 10^5 & -3.6739 \times 10^9 & 5.9118 \times 10^7 \end{bmatrix}$$

از آنجا که رتبه ماتریس کنترل پذیری کامل است، $(A(p_0), B)$ کنترل پذیر است.

$A(p)$ محدود است، لذا فرض ۲-۴ نیز برقرار است.

K_A نامعین است، بنابراین عدم قطعیت در A به صورت زیر تعریف می شود.

$$A(p) - A(p_0) = \begin{bmatrix} \frac{1000}{7} - \frac{20p}{7} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{100p}{7} - \frac{5000}{7} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 100p - 5000 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۸-۳)$$

$A(p)$: ماتریس حالت سیستم به ازای مقدار واقعی (دارای عدم قطعیت) K_A

$A(p_0)$: ماتریس حالت سیستم به ازای مقدار قراردادی (نامی) K_{A0}

با توجه به بخش ۲-۴-۱ شرط سازگاری برقرار نیست، یعنی عدم قطعیت در فضای برد B_{new}

نمی باشد. یعنی عدم قطعیت را نمی توان به صورت $A(p) - A(p_0) = B\phi(p)$ نوشت. بنابراین عدم

قطعیت در A را به دو بخش سازگار و ناسازگار تقسیم می کنیم. (۲-۷)

$$B^+ = (B_{new}^T B_{new})^{-1} B_{new}^T = \begin{bmatrix} -8.67 \times 10^{-19} & 0 & 0.02 & 0 \\ 50 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A(p) - A(p_0) = B_{new} B^+ (A(p) - A(p_0)) + (I - B_{new} B^+) (A(p) - A(p_0))$$

بخش سازگار به صورت زیر است:

$$B_{new} B^+(A(p) - A(p_0)) = \begin{bmatrix} \frac{1000}{7} - \frac{20p}{7} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{125p}{10.08 \times 10^{17}} - \frac{3125}{50.44 \times 10^{16}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

بخش ناسازگار به صورت زیر است:

$$(I - B_{new} B^+)(A(p) - A(p_0)) = \begin{bmatrix} \frac{125}{78.81 \times 10^{14}} - \frac{5p}{15.76 \times 10^{15}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{100p}{7} - \frac{5000}{7} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3125}{50.44 \times 10^{16}} - \frac{125p}{10.88 \times 10^{17}} & 0 & 0 & 0 \\ 100p - 5000 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

برای تعیین مساله LQR متناظر، بایستی پارامترهای طراحی α, β, ρ را انتخاب کنیم. بر

اساس تجربه ما از این نوع سیستم‌ها، $\alpha = 0.05, \beta = 10, \rho = 1$ را انتخاب می‌کنیم. برای بدست

آوردن کران‌های بالای عدم قطعیت از فرمول‌های (۲-۸) و (۲-۹) داریم:

$$(A(p) - A(p_0))^T B^{+T} B^+(A(p) - A(p_0)) \leq F \Rightarrow F = \begin{bmatrix} 2.04 \times 10^4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha^{-2}(A(p) - A(p_0))^T (A(p) - A(p_0)) \leq H \Rightarrow H = \begin{bmatrix} 4.08 \times 10^8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

حل غیرمستقیم مساله کنترل مقاوم فوق و تبدیل آن به مساله LQR (مساله ۲-۴) به صورت زیر

است. برای سیستم کمکی (۲-۱۰) داریم:

$$\dot{x} = A(p_0)x + Bu + \alpha(I - BB^+)v$$

$$A(p_0) = \begin{bmatrix} -143.0571 & 0.0857 & 9.8 & 2.8571 \\ 714.2857 & -1.4286 & 0 & -14.2857 \\ 0 & 0 & -50 & 0 \\ 5000 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -10 & 0.2 \\ 0 & 0 \\ 50 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha(I - BB^+) = \begin{bmatrix} 5.55 \times 10^{-18} & 0 & 2.7756 \times 10^{-18} & 0 \\ 0 & 0.05 & 0 & 0 \\ 2.1684 \times 10^{-18} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix}$$

قانون کنترل پس‌خورد $u = Kx$ و $v = Lx$ را چنان بدست می‌آوریم که تابع هزینه (۱۱-۲)

حداقل گردد. با ترکیب ورودی‌های u و v از معادلات (۱۳-۲) تا (۱۶-۲) ماتریس‌های زیر را بدست

می‌آوریم:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -143.0571 & 0.0857 & 9.8 & 2.8571 \\ 714.2857 & -1.4286 & 0 & -14.2857 \\ 0 & 0 & -50 & 0 \\ 5000 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} -10 & 0.2 & 5.5 \times 10^{-18} & 0 & 2.7 \times 10^{-18} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0 \\ 50 & 0 & 2.16 \times 10^{-18} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 4.08 \times 10^8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

پاسخ معادله جبری ریکاتی به صورت زیر است:

$$S = \begin{bmatrix} 2246.6 & 1.68 & 45.48 & 5.72 \\ 1.68 & 34.028 & 0.34 & -4.74 \\ 45.48 & 0.34 & 9.081 & 1.136 \\ 5.72 & -4.74 & 1.136 & 1.33 \end{bmatrix}$$

با حل مساله LQR فوق با استفاده از نرم افزار $MATLAB$ و با توجه به معادله (۲-۱۷)

داریم:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20192.2 & 0.0199 & 0.7465 & 0.3448 \\ -449.324 & -0.33374 & -9.0961 & -1.144 \\ -1.259 \times 10^{-14} & -1.03 \times 10^{-17} & -2.77 \times 10^{-16} & -3.49 \times 10^{-18} \\ -0.084 & -1.701 & -0.0169 & 0.237 \\ -4.87 \times 10^{-15} & -3.65 \times 10^{-18} & -9.86 \times 10^{-17} & -1.24 \times 10^{-18} \\ -0.286 & 0.237 & -0.0568 & -0.067 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} K \\ L \end{bmatrix} x$$

به بیان دیگر کنترل کننده حلقه بسته (K) و کنترل کننده الحاقی (V) به صورت زیر هستند.

$$u = Kx = \begin{bmatrix} 20192.2 & 0.0199 & 0.7465 & 0.3448 \\ -449.324 & -0.334 & -9.0961 & -1.144 \end{bmatrix} x \quad (۳-۹)$$

$$v = Lx = \begin{bmatrix} -1.259 \times 10^{-14} & -1.03 \times 10^{-17} & -2.77 \times 10^{-16} & -3.49 \times 10^{-18} \\ -0.084 & -1.701 & -0.0169 & 0.237 \\ -4.87 \times 10^{-15} & -3.65 \times 10^{-18} & -9.86 \times 10^{-17} & -1.24 \times 10^{-18} \\ -0.286 & 0.237 & -0.0568 & -0.067 \end{bmatrix} x \quad (۳-۱۰)$$

برای آنکه $u = Kx$ جواب مساله کنترل مقاوم باشد، بایستی شرط (۲-۱۸) (قضیه ۲-۳) برقرار باشد.

$$\beta^2 I - 2\rho^2 L^T L = \begin{bmatrix} 99.822 & -0.1514 & -0.0354 & -0.0018 \\ -0.1514 & 94.098 & -0.0304 & -0.8381 \\ -0.0354 & -0.0304 & 99.9930 & -4.11 \times 10^{-4} \\ -0.0018 & 0.8381 & 4.11 \times 10^{-4} & 99.879 \end{bmatrix}$$

$$\det(\beta^2 I - 2\rho^2 L^T L) = 9.4 \times 10^7 > 0$$

در نتیجه $u = Kx$ جواب مساله کنترل مقاوم می باشد.

۷-۳ اعمال کنترل مقاوم به سیستم

برای ارزیابی صحت عملکرد کنترل کننده طراحی شده، معادله (۳-۹) را به سیستم اعمال

می‌کنیم. ماتریس حالت جدید کنترل شده مقاوم بهینه سیستم تحریک $STIA$ نیروگاه به صورت

زیر بدست می‌آید. با توجه به معادله (۶-۲) داریم:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(p)x + Bu \\ u = Kx \end{cases} \Rightarrow \dot{x} = A(p)x + B_{new} Kx \Rightarrow A_{new} = A(p) + B_{new} K$$

با توجه به مقادیر نامی، ماتریس حالت جدید و مقادیر ویژه سیستم به صورت زیر است.

$$A_{new} = \begin{bmatrix} -2/0.215 \times 10^5 & -0.181 & 0/516 & -1/219 \\ 714/286 & -1/4286 & 0 & -14/286 \\ 1/0.09 \times 10^6 & 0/997 & -12/674 & 19/238 \\ 5000 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix}$$

جدول ۱۰-۳: مقادیر ویژه سیستم کنترل شده بهینه مقاوم و سیستم کنترل نشده

مقدار ویژه	A	A_{new}
۱	-۲۴۳/۲۲۸۱	$-2/0.216 \times 10^5$
۲	-۰/۱۰۱۶	-۱۰۰/۰۳۲۷
۳	-۱/۱۵۶۰	-۱۰/۰۹۷۱
۴	-۵۰	-۱/۴۲۸۶

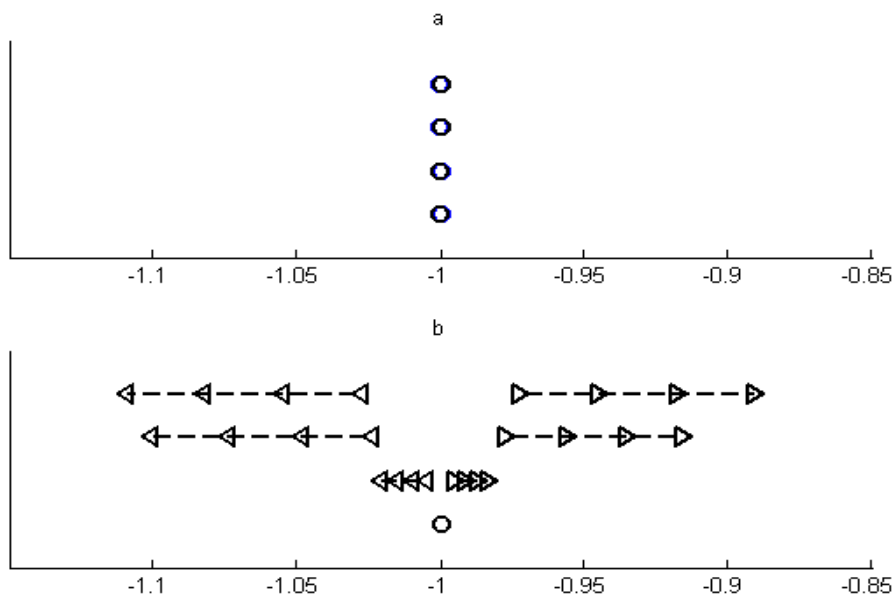
جدول ۱۱-۳: مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم بهینه به ازای تغییر پارامتر K_A

مقدار ویژه A_{new}	$K_A + 0/0.5 K_A$	$K_A + 0/1.0 K_A$	$K_A + 0/1.5 K_A$	$K_A + 0/2.0 K_A$
حالت ۱	$-2/0.216 \times 10^5$	$-2/0.217 \times 10^5$	$-2/0.218 \times 10^5$	$-2/0.219 \times 10^5$
حالت ۲	-۱۰۰/۰۳۴	-۱۰۰/۰۳۶	-۱۰۰/۰۳۷	-۱۰۰/۰۳۹
حالت ۳	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷
حالت ۴	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸

مقدار ویژه A_{new}	$K_A - 0/0.5 K_A$	$K_A - 0/1.0 K_A$	$K_A - 0/1.5 K_A$	$K_A - 0/2.0 K_A$
حالت ۱	$-2/0.215 \times 10^5$	$-2/0.214 \times 10^5$	$-2/0.213 \times 10^5$	$-2/0.212 \times 10^5$
حالت ۲	-۱۰۰/۰۳۱	-۱۰۰/۰۲۹	-۱۰۰/۰۲۷	-۱۰۰/۰۲۶
حالت ۳	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷
حالت ۴	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸

مقادیر ویژه بدست آمده از جدول ۶-۳ و جدول ۱۱-۳ را با استفاده از جدول ۱۰-۳ نرمالیزه

می‌کنیم. نمودار مقادیر ویژه نرمالیزه شده را در شکل زیر مشاهده می‌کنیم.



شکل ۳-۱۴: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامتر K_A

(a) سیستم کنترل شده مقاوم بهینه (b) سیستم نامی

در بخش ۳-۵ مشاهده کردیم که پارامترهای K_A, T_B, T_C و K_F دارای بیشترین اثر بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم هستند. حال این چهار پارامتر دارای عدم قطعیت را به سیستم دارای کنترل بهینه مقاوم اعمال می‌کنیم.

جدول ۳-۱۲: مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم بهینه به ازای تغییر پارامترهای T_C, T_B, K_A, K_F

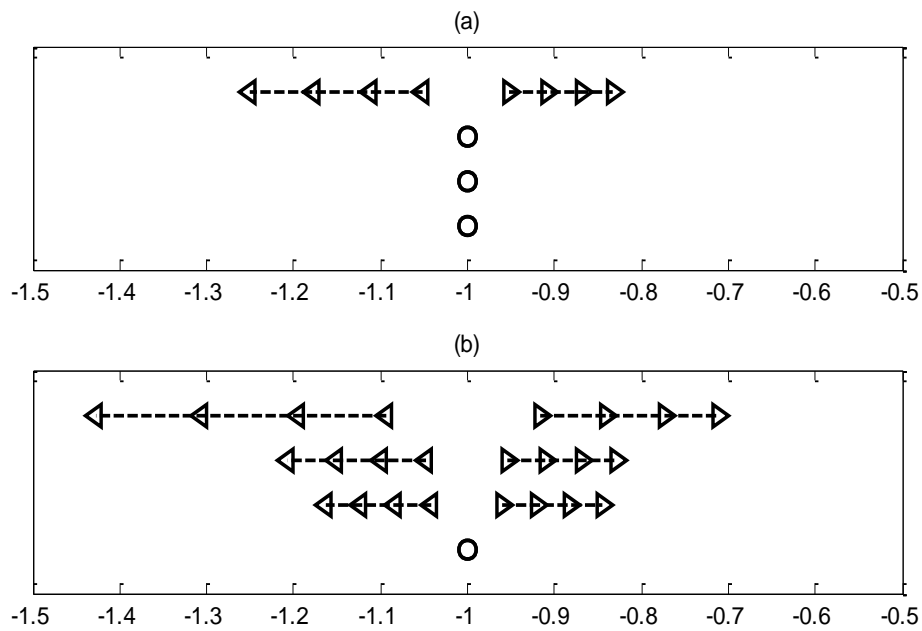
مقدار ویژه	$K_A + 0.05K_A$	$K_A + 0.10K_A$	$K_A + 0.15K_A$	$K_A + 0.20K_A$
A_{new}	$K_F + 0.05K_F$	$K_F + 0.10K_F$	$K_F + 0.15K_F$	$K_F + 0.20K_F$
	$T_B + 0.05T_B$	$T_B + 0.10T_B$	$T_B + 0.15T_B$	$T_B + 0.20T_B$
	$T_C + 0.05T_C$	$T_C + 0.10T_C$	$T_C + 0.15T_C$	$T_C + 0.20T_C$
حالت ۱	$-1/925 \times 10^5$	$-1/838 \times 10^5$	$-1/758 \times 10^5$	$-1/685 \times 10^5$
حالت ۲	-۱۰۰/۰۳۱	-۱۰۰/۰۲۸	-۱۰۰/۰۲۶	-۱۰۰/۰۲۳
حالت ۳	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷
حالت ۴	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸

مقدار ویژه A_{new}	$K_A - 0.105K_A$ $K_F - 0.105K_F$ $T_B - 0.105T_B$ $T_C - 0.105T_C$	$K_A - 0.110K_A$ $K_F - 0.110K_F$ $T_B - 0.110T_B$ $T_C - 0.110T_C$	$K_A - 0.115K_A$ $K_F - 0.115K_F$ $T_B - 0.115T_B$ $T_C - 0.115T_C$	$K_A - 0.120K_A$ $K_F - 0.120K_F$ $T_B - 0.120T_B$ $T_C - 0.120T_C$
حالت ۱	$-2/128 \times 10^5$	$-2/246 \times 10^5$	$-2/378 \times 10^5$	$-2/526 \times 10^5$
حالت ۲	-۱۰۰/۰۳۴	-۱۰۰/۰۳۵	-۱۰۰/۰۳۶	-۱۰۰/۰۳۷
حالت ۳	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷	-۱۰/۰۹۷
حالت ۴	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸	-۱/۴۲۸

جدول ۳-۱۳: مقادیر ویژه سیستم کنترل نشده بازای تغییر پارامترهای T_C, T_B, K_A, K_F

مقدار ویژه A	$K_A + 0.105K_A$ $K_F + 0.105K_F$ $T_B + 0.105T_B$ $T_C + 0.105T_C$	$K_A + 0.110K_A$ $K_F + 0.110K_F$ $T_B + 0.110T_B$ $T_C + 0.110T_C$	$K_A + 0.115K_A$ $K_F + 0.115K_F$ $T_B + 0.115T_B$ $T_C + 0.115T_C$	$K_A + 0.120K_A$ $K_F + 0.120K_F$ $T_B + 0.120T_B$ $T_C + 0.120T_C$
حالت ۱	-۲۶۵/۷۹۷۶	-۲۹۰/۶۱۵	-۳۱۷/۷۸۸	-۳۴۷/۴۲۴
حالت ۲	-۰/۰۹۷	-۰/۰۹۲	-۰/۰۸۸	-۰/۰۸۴
حالت ۳	-۱/۱۰۹	-۱/۰۶۳	-۱/۱۹-	-۰/۹۷۷
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰

مقدار ویژه A	$K_A - 0.105K_A$ $K_F - 0.105K_F$ $T_B - 0.105T_B$ $T_C - 0.105T_C$	$K_A - 0.110K_A$ $K_F - 0.110K_F$ $T_B - 0.110T_B$ $T_C - 0.110T_C$	$K_A - 0.115K_A$ $K_F - 0.115K_F$ $T_B - 0.115T_B$ $T_C - 0.115T_C$	$K_A - 0.120K_A$ $K_F - 0.120K_F$ $T_B - 0.120T_B$ $T_C - 0.120T_C$
حالت ۱	-۲۲۲/۸۰۰۴	-۲۰۴/۴۰۸	-۱۸۷/۹۴۴	-۱۷۳/۳۰۳
حالت ۲	-۰/۱۰۶	-۰/۱۱۲	-۰/۱۱۸	-۰/۱۲۲
حالت ۳	-۱/۲۰۴	-۱/۲۵۲	-۱/۲۹۹	-۱/۳۴۵
حالت ۴	-۵۰	-۵۰	-۵۰	-۵۰



شکل ۳-۱۵: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامترهای T_C, T_B, K_A, K_F
 (a) سیستم کنترل شده مقاوم بهینه (b) سیستم نامی

۳-۸ نتیجه گیری

در این فصل بر اساس مدل فضای حالت سیستم تحریک کنترل مقاوم طراحی شد. مشاهده کردیم که بعد از اعمال کنترل مقاوم طراحی شده به سیستم، مقادیر ویژه سیستم تحریک بخوبی در مقابل عدم قطعیت مقاوم هستند.

فصل چهارم

پایدار ساز سیستم قدرت

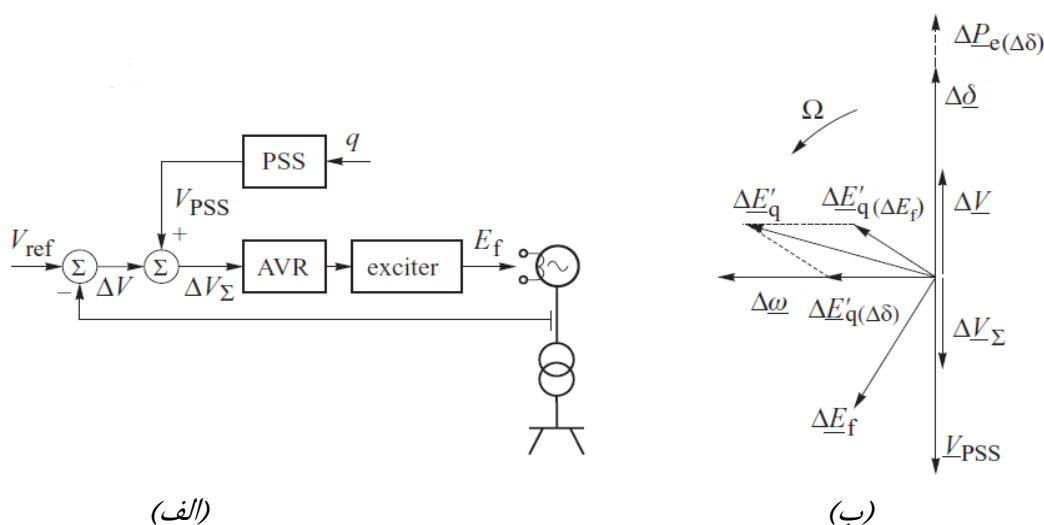
۱-۴ مقدمه

ایده اصلی استفاده از پایدارساز سیستم قدرت، صفر بودن یا نزدیک صفر بودن انحراف سرعت ژنراتور در حالت پایدار می‌باشد. به عبارت دیگر PSS برای افزایش میرایی نوسان‌های سیستم قدرت از طریق کنترل تحریک استفاده می‌شود. معمولاً سرعت شفت، فرکانس ترمینال و توان به عنوان ورودی استفاده می‌شوند. هنگامیکه ورودی فرکانس است، معمولاً فرکانس ترمینال اندازه‌گیری می‌شود، اما در بعضی موارد، فرکانس قبل راکتانس ماشین (معادل با سرعت شفت) ممکن است استفاده شود [۲۰].

در هنگام وقوع یک اغتشاش کوچک، سرعت ژنراتور دیگر ثابت نیست و در این حالت، روتور و انحراف ولتاژ (ΔV) دچار نوسان خواهند شد که این نوسان‌ها نتیجه‌ی تغییر انحراف زاویه روتور می‌باشد. وظیفه PSS در این حالت اضافه کردن سیگنال برای جبران‌سازی نوسانات ΔV و به وجود آوردن یک مولفه میراکنندگی هم‌فاز با انحراف سرعت ($\Delta\omega$) می‌باشد. این امر در شکل ۱-۴ نشان داده شده است که در آن سیگنال V_{PSS} به سیگنال اصلی خطای ولتاژ ΔV اضافه شده است. در حالت پایدار این سیگنال صفر می‌باشد. شکل ۱-۴ ب دیاگرام فازوری سیگنال‌ها در حالت اغتشاش را نشان می‌دهد. فازور V_{PSS} دقیقاً مخالف ΔV می‌باشد و دامنه آن بزرگتر است. در نتیجه فازور سیگنال‌های خطای ولتاژ کل ΔV_{Σ} نسبت به انحراف سرعت $\Delta\omega$ بر خلاف حالت بدون PSS مثبت می‌باشد. در نتیجه با توجه به شکل ۱-۴ ب گشتاور میراکنندگی مثبتی به سیستم اعمال می‌شود. توجه داشته باشید در صورتی که V_{PSS} کوچکتر از ΔV باشد، گشتاور میراکنندگی منفی خواهد بود. [۲]

۲-۴ انواع پایدارسازهای سیستم قدرت

پایدارسازهای سیستم قدرت بر حسب سیگنال ورودی بکار برده شده، مشخصه‌ها و عملکردهای تقریباً متفاوتی از خود بروز می‌دهند. متداولترین سیگنال‌هایی که از آن‌ها به عنوان ورودی PSS استفاده می‌شود: سرعت شفت، توان شتاب‌دهنده و فرکانس ترمینال می‌باشد.



شکل ۴-۱: حلقه کنترلی اضافی (PSS) برای سیستم تنظیم کننده ولتاژ الف) بلوک دیاگرام ب) دیاگرام فازوری [۲]

۴-۲-۱-۴ ورودی سرعت

پایداری سیستم قدرت از سرعت شفت به عنوان ورودی که با استفاده از آن باید مولفه‌ای از گشتاور الکتریکی را که با تغییرات سرعت همفاز است، تولید کند تا تاخیرهای^۱ $GEP(s)$ را جبران کند، استفاده می‌کند. بنابراین مشخصه یک پایداری ایده‌آل باید با $GEP(s)$ تناسب معکوس داشته باشد، یعنی

$$Ideal PSS_{\omega}(s) = D_{PSS} / GEP(s)$$

که در آن D_{PSS} سهم پایداری را از میرایی لازم بیان می‌دارد، چنین مشخصه پایداری با وجود بهره بالا اضافی، بدلیل اینکه هم ژنراتور و هم تحریک کننده (بسته به نوع آن) مشخصه بهره و فازی وابسته به فرکانس از خود نشان می‌دهند، غیرعملی است. یک پایداری عملی سرعت در محدوده فرکانسی مورد نظر باید از بخش‌های پسفاز، پیشفاز برای جبران پسفازی در $GEP(s)$ استفاده کند. بهره در فرکانس‌های بالا برای محدود کردن تاثیر نویز و مینم کردن تداخل پیشگی باید کم شود، و بدنبال آن فیلترهای پایین‌گذر و احتمالاً حذف-باند^۲ نیز لازم می‌شوند. یک بخش پاکساز نیز

^۱ تابع انتقال بیان کننده مشخصات ژنراتور، سیستم تحریک و سیستم قدرت

^۲ Band-reject

برای جلوگیری از ولتاژ حالت ماندگار سیستم بکار می‌رود.

$$PSS_{\omega}(s) = k_s \frac{T_w s (1+T_1 s)(1+T_3 s)}{(1+T_w s)(1+T_2 s)(1+T_4 s)} FILT(s)$$

۲-۲-۴ ورودی توان

استفاده از توان شتاب‌دهنده به عنوان سیگنال ورودی پایدارساز سیستم قدرت بیشتر به علت تداخل پیچشی سطح پایین ذاتی آن بوده است. رایج‌ترین روش تحلیل پایدارساز ورودی توان که از آن استفاده می‌شود، بکاربردن ورودی توان به عنوان مشتق سرعت است. با این شیوه مفاهیم مشابه استفاده شده برای تحلیل پایدارساز ورودی سرعت را برای تحلیل اینگونه از پایدارسازها بکار می‌برند، نتیجه‌ای که چندان دور از نظر هم نیست با این روش بدست می‌آید، عملکرد مشخصه‌های پایدارساز سیستم قدرت عیناً همان‌هایی که پایدارساز سرعت بود، می‌شوند.

۳-۲-۴ ورودی فرکانس

استفاده از فرکانس شین AC به عنوان ورودی پایدارساز، گاهی نتایج متفاوت از نتایجی که به پایدارسازهای ورودی سرعت مربوط می‌شود، می‌دهد. اولین اختلاف آن است که حساسیت سیگنال فرکانس به نوسانات روتور با ضعیف‌تر شدن سیستم انتقال خارجی افزایش می‌یابد و موجب جبران کاهش بهره از خروجی پایدارساز به گشتاور الکتریکی، ناشی از یک سیستم انتقال ضعیف‌تر می‌شود. به عبارت دیگر سیگنال فرکانس به مدهای نوسان بین ناحیه‌ای بزرگ نسبت به مدهایی که فقط واحدهای منفرد را در برمی‌گیرد و نیز مدهای بین واحدهای یک نیروگاه حساستر است. بنابراین به نظر می‌رسد می‌توان سهم میرایی بیشتری برای مدهای بین ناحیه‌ای نسبت به سهم حاصل از سیگنال ورودی سرعت، بدست آورد.

باید توجه داشت که پایدارساز مبتنی بر فرکانس، علی‌رغم مزایای مذکور، دارای چندین عیب

است:

۱- در حین حالت گذرای سریع، سیگنال فرکانس پایه، دچار تغییر فاز ناگهانی خواهد

شد. که به جهش در ولتاژ تحریک منجر خواهد شد و در کمیت‌های خروجی ژنراتور منعکس می‌شود.

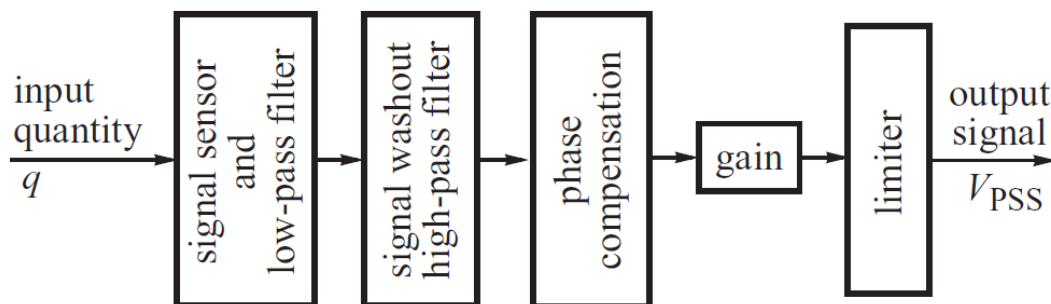
۲- معمولا سیگنال فرکانس دارای نویز سیستم قدرت است که بوسیله بارهای صنعتی بزرگ از قبیل کوره‌های قوسی بوجود آمده است. در بسیاری از موارد ای مساله، مانع استفاده از فرکانس به عنوان سیگنال ورودی می‌شود.

۴-۲-۴ پایدارسازهای دیجیتالی

امروزه شکل‌های دیجیتالی برخی از پایدارسازهای بالا ساخته شده است و به صورت تجاری در دسترس قرار دارد.

۳-۴ ساختار پایدارساز سیستم قدرت

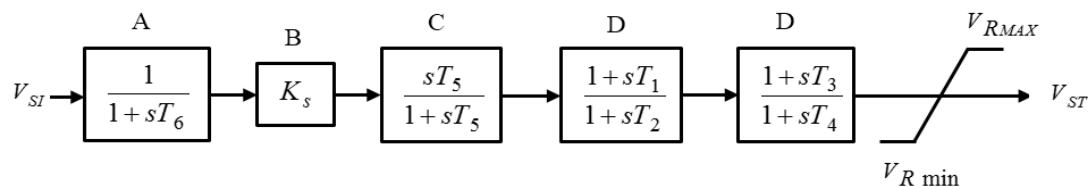
سیگنال ورودی که از ترمینال ژنراتور اندازه‌گیری می‌شود، پس از عبور از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر، به منظور دستیابی به شیفت فاز مورد نیاز از مولفه جبران‌ساز پیش‌فاز-پس‌فاز عبور داده می‌شود، و در نهایت پس از تقویت شدن و گذر از محدودساز نهایی، خروجی V_{PSS} ساخته می‌شود (شکل ۴-۲). در هنگام طراحی جبران‌ساز، لازم است به شیفت فاز سیگنال ورودی به سبب فیلترهای پایین و بالا گذر توجه شود. گاهی اوقات فیلترها به منظور رسیدن به شیفت فاز صفر در فرکانس نوسانات روتور تنظیم می‌شود. [۲]



شکل ۴-۲: مولفه‌های اصلی یک PSS [۲]

۴-۴ پایدارساز سیستم قدرت مدل PSS1A

شکل ۴-۳ نشان دهنده قالب کلی PSS با یک ورودی است. سرعت، فرکانس و توان بعضی از سیگنال‌های رایج ورودی پایدارساز (V_{SI}) هستند.



A) Signal sensor . B) amplifier gain . C) high-pass filter . D) lead compensation element . E) limiter

شکل ۳-۴: پایدارساز سیستم قدرت با یک ورودی- مدل PSS1A [۱۹]

پارامتر T_6 ممکن است برای نمایش ثابت زمانی مبدل (ترانسدیوسر) استفاده شود. بهره پایدارساز بوسیله پارامتر K_S و سیگنال شوینده^۱ بوسیله ثابت زمانی T_5 تنظیم شده است. دو بلوک بعدی نشان دهنده جبران سازی دو مرحله ای پیش فاز-پس فاز با ثابت های T_1 تا T_4 هستند. خروجی پایدارساز می تواند بوسیله روش های مختلف محدود شود. در این مدل فقط از محدود کننده های ساده خروجی پایدارساز ساده V_{STMAX} و V_{STMIN} استفاده شده است. همچنین در بعضی از سیستم ها، حدود بر اساس ولتاژ خروجی ترمینال ژنراتور تعریف می شود و یا در بعضی دیگر از سیستم ها اگر خروجی ترمینال ژنراتور در باند انتخابی خود نباشد، خروجی پایدارساز حذف می شود. مرجع [۲۳] خروجی پایدارساز (V_{ST})، یک ورودی برای مدل های کنترل ناپیوسته است. در جایی که مدل های کنترل ناپیوسته استفاده نشده است، $V_{ST} = V_S$.

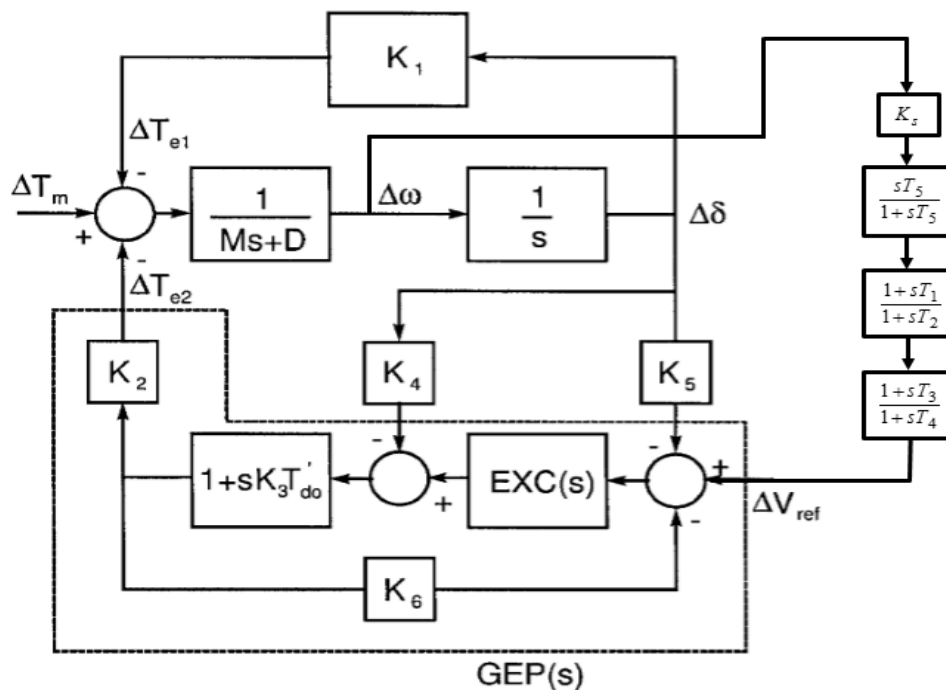
۵-۴ مدل فضای حالت پایدارساز سیستم قدرت IEEE PSS1A

یکی از کاربردهای مدل هفرون-فیلیپس در مطالعات نوسانات فرکانس پایین (LFO) و یا طراحی پایدارساز سیستم قدرت (PSS) است [۲۴]. در این فصل برای بدست آوردن تغییرات سرعت ($\Delta\omega$) از مدل هفرون-فیلیپس استفاده می کنیم.

با توجه به [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، برای بدست آوردن مدل فضای حالت پایدارساز سیستم قدرت PSS1A، بلوک A در (شکل ۳-۴) را در نظر نمی گیریم. مقدار عددی پارامترهای PSS با توجه به شرایط کاری انتخاب می شود. به ازای مقادیر متفاوت پارامترهای یک PSS، زمان میرایی و میزان

^۱ washout

بالازدگی^۱ و پایین‌زدگی^۲ متفاوت است. ابتدا برای انتخاب یک مجموعه داده مناسب، مجموعه داده ۱ از [۲۶]، مجموعه داده ۲ از [۲۷] و مجموعه داده ۳ از [۱۹] استخراج شد (جدول ۴-۱). با توجه به شکل ۴-۵ مشاهده می‌کنیم که استفاده از مجموعه داده ۱ در پایدارساز سیستم قدرت مدل *PSS1A* به بهترین و سریعترین حالت تغییرات سرعت روتور را میرا می‌کند. بنابراین در ادامه همواره از مجموعه داده ۱ استفاده می‌کنیم.



شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام هفرون-فیلیپس از مدل تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت^۳ [۲۵]

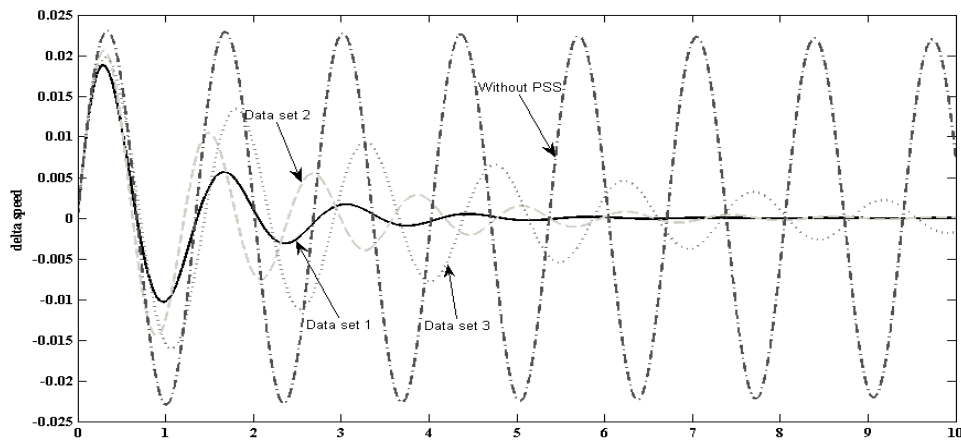
جدول ۴-۱: مجموعه اطلاعات پارامترهای *PSS*

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	K_S
مجموعه داده ۱	۰/۲۰۱	۰/۰۵	۰/۱۳۷	۰/۰۵	۱۰	۸/۲۵۵
مجموعه داده ۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۳	۵/۴	۱۰	۲۰
مجموعه داده ۳	۰/۵	۰/۰۶	۰/۵	۰/۰۶	۳۰	۱/۴

^۱ overshoot

^۲ undershoot

^۳ Single machine infinite bus model (SMIB)



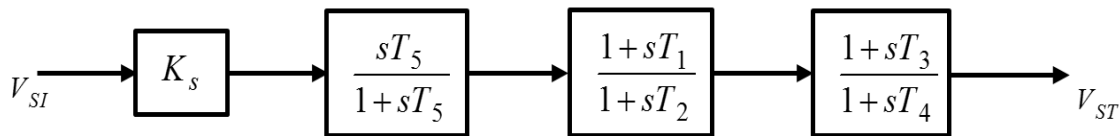
شکل ۴-۵: مقایسه پاسخ PSS به ازای پارامترهای متفاوت

با توجه به شکل ۴-۶ تابع تبدیل پایدارساز سیستم قدرت PSS1A را به صورت زیر بدست

می‌آوریم:

$$G(s) = \frac{V_{ST}(s)}{V_{SI}(s)} = \frac{K_S (sT_5)(1+sT_1)(1+sT_3)}{(1+sT_5)(1+sT_2)(1+sT_4)} = \frac{K_S (sT_5)(T_1T_3s^2 + (T_1+T_3)s + 1)}{(1+sT_5)(T_2T_4s^2 + (T_2+T_4)s + 1)}$$

$$= \frac{K_S T_1 T_3 T_5 s^3 + K_S (T_1 + T_3) T_5 s^2 + K_S T_5 s}{T_2 T_4 T_5 s^3 + (T_5(T_2 + T_4) + T_2 T_4) s^2 + (T_5 + T_2 + T_4) s + 1}$$



شکل ۴-۶: مدل ساده شده پایدارساز سیستم قدرت PSS1A

با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، مدل فضای حالت پایدارساز سیستم قدرت را بدست می‌آوریم:

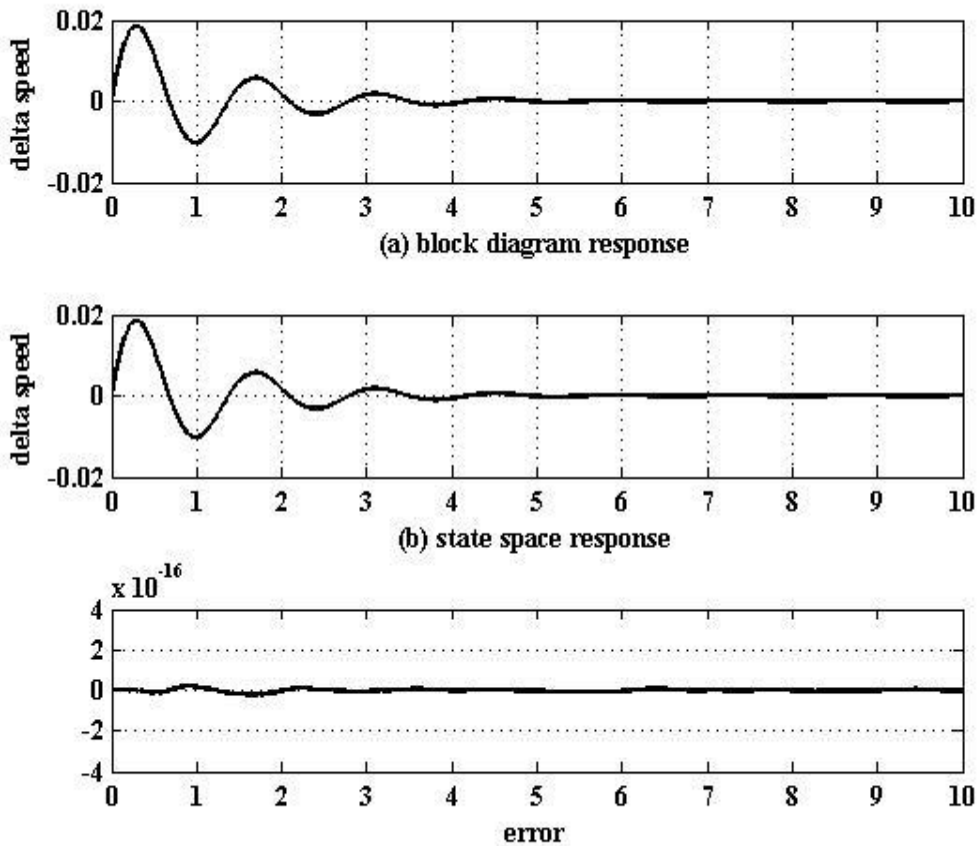
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{T_2 T_4 + T_5(T_2 + T_4)}{T_2 T_4 T_5} & -\frac{T_2 + T_4 + T_5}{T_2 T_4 T_5} & -\frac{1}{T_2 T_4 T_5} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{K_S(T_1 + T_3)}{T_2 T_4} & -\frac{T_1 T_3 K_S(T_2 T_4 + T_5(T_2 + T_4))}{T_2^2 T_4^4 T_5} & \frac{K_S}{T_2 T_4} & -\frac{T_1 T_3 K_S(T_2 + T_4 + T_5)}{T_2^2 T_4^4 T_5} & -\frac{T_1 T_3 K_S}{T_2^2 T_4^4 T_5} \end{bmatrix}$$

$$D = \frac{T_1 T_3 K_S}{T_2 T_4}$$

برای بررسی صحت مدل فضای حالت بدست آمده (A, B, C, D) ، در مدل هفرون-فیلیپس

بجای بلوک دیاگرام PSS (شکل ۴-۴) مدل فضای حالت را جایگزین می‌کنیم.



شکل ۴-۷: تغییرات سرعت $\Delta\omega$ (a) مدل بلوک دیاگرام PSS (b) مدل فضای حالت PSS با توجه به شکل ۴-۷ نتیجه می‌گیریم که مدل فضای حالت بدست آمده از بلوک دیاگرام PSS کاملاً درست است.

۴-۶ مطالعه قوام پارامترهای $PSS1A$

با توجه به ماتریس حالت بدست آمده در بخش قبل و با استفاده از مقادیر پارامترهای مجموعه داده ۱ در جدول ۴-۱ مقادیر ویژه ماتریس حالت A را محاسبه می‌کنیم.

جدول ۴-۲: مقادیر ویژه ماتریس حالت به ازای مقادیر نامی

مقدار ویژه A	قسمت حقیقی مقدار ویژه	قسمت موهومی مقدار ویژه
۱	-۲۰	۰
۲	-۲۰	۰
۳	-۰/۱	۰

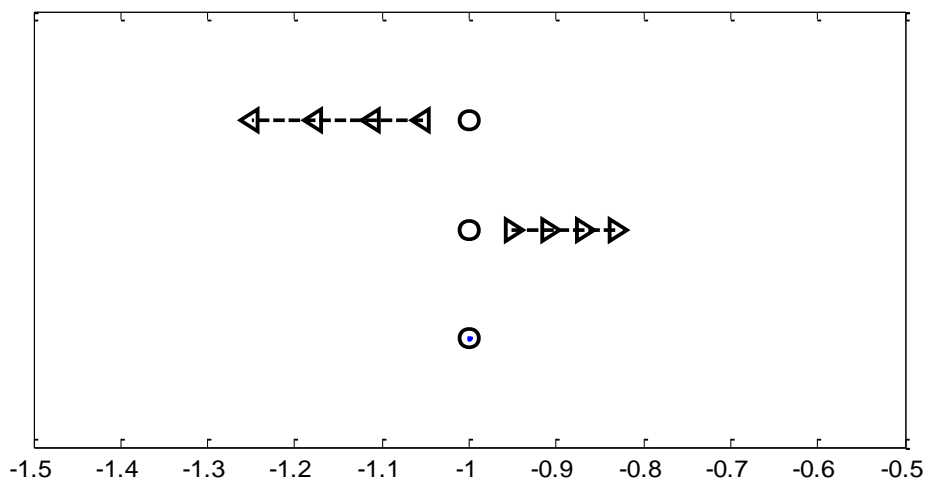
همانطور که مشاهده می‌کنیم پارامترهای K_s, T_1, T_3 در ماتریس حالت A وجود ندارند بنابراین تغییر این سه پارامتر بر روی مقادیر ویژه سیستم تاثیری ندارند، در نتیجه برای پیدا کردن مهمترین پارامتر که بیشترین اثر را بر روی مقادیر ویژه دارد باید تاثیر تغییر چهار پارامتر T_2, T_4, T_5 را بر روی مقادیر ویژه بررسی کنیم.

۱. بررسی تاثیر تغییر پارامتر T_2 بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۳-۴: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_2

مقدار ویژه A	$T_2 + 0.05T_2$	$T_2 + 0.1T_2$	$T_2 + 0.15T_2$	$T_2 + 0.2T_2$
حالت ۱	-۲۰	-۲۰	-۲۰	-۲۰
حالت ۲	-۱۹/۰۴۷	-۱۸/۱۸۲	-۱۷/۳۹۱	-۱۶/۶۶۷
حالت ۳	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱

مقدار ویژه A	$T_2 - 0.05T_2$	$T_2 - 0.1T_2$	$T_2 - 0.15T_2$	$T_2 - 0.2T_2$
حالت ۱	-۲۱/۰۵۳	-۲۲/۲۲۲	-۲۳/۵۲۹	-۲۵
حالت ۲	-۲۰	-۲۰	-۲۰	-۲۰
حالت ۳	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱



شکل ۴-۸: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده بازای تغییر T_2

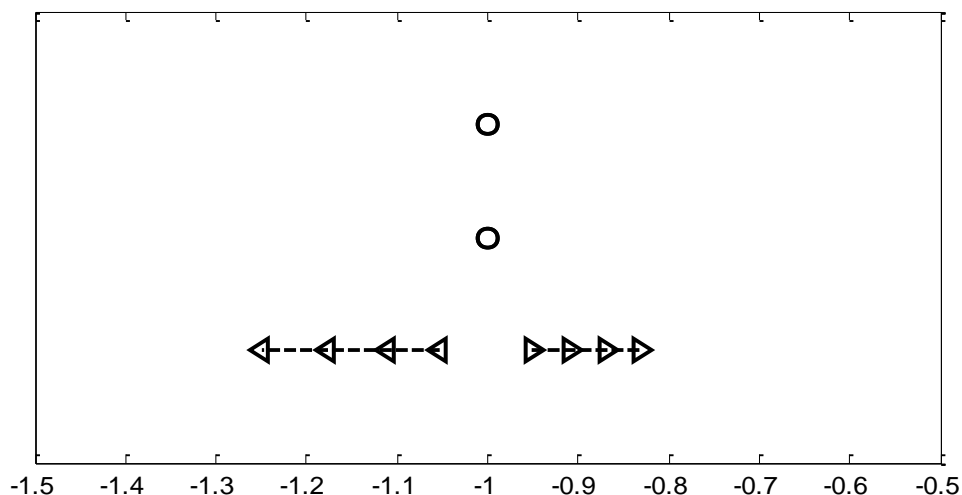
همانطور که در ماتریس حالت مشاهده می‌کنیم پارامترهای T_2 و T_4 مشابه هستند، بنابراین تغییر مقادیر ویژه به ازای تغییر پارامتر T_4 دقیقاً مشابه تغییر مقادیر ویژه به ازای پارامتر T_2 (جدول ۳-۴ و شکل ۴-۸) است.

۲. بررسی تاثیر تغییر پارامتر T_5 بر روی مقادیر ویژه و پاسخ سیستم:

جدول ۴-۴: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت بازای تغییر پارامتر T_5

مقدار ویژه A	$T_5 + 0.05T_5$	$T_5 + 0.10T_5$	$T_5 + 0.15T_5$	$T_5 + 0.20T_5$
حالت ۱	-۲۰	-۲۰	-۲۰	-۲۰
حالت ۲	-۲۰	-۲۰	-۲۰	-۲۰
حالت ۳	-۰/۰۹۵	-۰/۰۹	-۰/۰۸۷	-۰/۰۸۳

مقدار ویژه A	$T_5 - 0.05T_5$	$T_5 - 0.10T_5$	$T_5 - 0.15T_5$	$T_5 - 0.20T_5$
حالت ۱	-۲۰	-۲۰	-۲۰	-۲۰
حالت ۲	-۲۰	-۲۰	-۲۰	-۲۰
حالت ۳	-۰/۱۰۵	-۰/۱۱۱	-۰/۱۱۷	-۰/۱۲۵



شکل ۴-۹: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده بازای تغییر T_5

با توجه به شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ مشاهده می‌کنیم پارامتر T_5 بر روی قطبی تاثیر گذار است

که به محور موهومی نزدیک است. بنابراین تغییر پارامتر T_5 اثر بیشتری بر روی مقادیر ویژه سیستم دارد.

۴-۷ طراحی کنترل مقاوم

در بخش ۴-۶ دیدیم که اثرگذارترین پارامتر بر روی مقادیر ویژه سیستم پارامتر T_5 است،

بنابراین در این بخش برای طراحی کنترل مقاوم از پارامتر T_5 استفاده می‌کنیم، $p = T_5$. در روند

طراحی کنترل مقاوم ابتدا باید نوع عدم قطعیت مشخص شود. با توجه به ۱-۴-۲ داریم:

$$A(p) - A(p_0) = B \varphi(p) \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{10} - \frac{1}{p} & 404 - \frac{400p+40}{p} & 10-p \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{10} - \frac{40p+1}{p} & 404 - \frac{400p+40}{p} & 10-p \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \varphi(p) = \begin{bmatrix} \frac{1}{10} - \frac{40p+1}{p} & 404 - \frac{400p+40}{p} & 10-p \end{bmatrix}$$

در نتیجه عدم قطعیت از نوع سازگار است.

روند طراحی کنترل مقاوم برای عدم قطعیت سازگار و ناسازگار تبدیل به مسأله LQR است.

طراحی کنترل مقاوم برای PSS هم به روش عدم قطعیت سازگار (LQR مسأله ۲-۲) و هم روش

عدم قطعیت ناسازگار (LQR مسأله ۴-۲) انجام شد، نتایج حاصل از طراحی کنترل مقاوم به روش

عدم قطعیت ناسازگار هم در پاسخ سیستم و هم در ثابت نگه داشتن مقادیر ویژه بهتر عمل کرد.

بنابراین در ادامه کنترل مقاوم طراحی شده براساس عدم قطعیت ناسازگار بطور کامل توضیح داده

می شود.

برای سیستم درجه سوم زیر:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{40p+1}{p} & -\frac{400p+40}{p} & -\frac{400}{p} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

که در $P \in [P_0 - 20\%P_0 \quad P_0 + 20\%P_0] = [8 \quad 12]$ عدم قطعیت است. برای تبدیل مسأله به مسأله

LQR کنترل پذیری $(A(p_0), B)$ را بررسی می کنیم. ماتریس کنترل پذیری برابر است با

$$C = \begin{bmatrix} B & A(p_0)B & A^2(p_0)B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -40 & 1204 \\ 0 & 1 & -40 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

چون رتبه ماتریس کنترل‌پذیری C کامل است، بنابراین $(A(p_0), B)$ کنترل‌پذیر است.

برای تجزیه عدم‌قطعیت $A(p) - A(p_0)$ به دو بخش سازگار و ناسازگار به روش زیر عمل می‌کنیم:

$$B^+ = (B^T B)^{-1} B^T = [1 \ 0 \ 0]$$

بخش سازگار عبارتست از:

$$BB^+(A(p) - A(p_0)) = \begin{bmatrix} 401 - \frac{40p+1}{10} & 404 - \frac{400p+40}{p} & 40 - \frac{400}{p} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

بخش ناسازگار عبارتست از:

$$(I - BB^+)(A(p) - A(p_0)) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

مشاهده می‌کنیم بخش ناسازگار عدم‌قطعیت صفر است، بنابراین همانطور که در ابتدای این

بخش نیز گفته شد عدم‌قطعیت از نوع سازگار است. ماتریس‌های F و H بعنوان کران‌های بالای

عدم‌قطعیت به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$(A(p) - A(p_0))^T B^{+T} B^+(A(p) - A(p_0)) = \begin{bmatrix} 401 & 4025.02 & 200.25 \\ 4025 & 40401 & 2010 \\ 200.25 & 2010 & 100 \end{bmatrix} = F$$

$$\alpha^{-2}(A(p) - A(p_0))^T (A(p) - A(p_0)) = \begin{bmatrix} 1.604 \times 10^5 & 1.61 \times 10^6 & 8.01 \times 10^4 \\ 1.61 \times 10^6 & 1.616 \times 10^7 & 8.04 \times 10^5 \\ 8.01 \times 10^4 & 8.04 \times 10^5 & 4 \times 10^4 \end{bmatrix} = H$$

بنابراین، مسأله LQR به صورت زیر است:

برای سیستم کمکی

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -40.1 & -404 & -40 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} v$$

قانون کنترل پس‌خورد $u = Kx$ و $v = Lx$ را چنان می‌یابیم که تابعی هزینه (۲-۱۱) حداقل

گردد. با ترکیب ورودی‌های u و v ماتریس‌های زیر را بدست می‌آوریم:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -40.1 & -404 & -40 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 1.609 \times 10^5 & 1.614 \times 10^6 & 8.03 \times 10^4 \\ 1.614 \times 10^6 & 1.62 \times 10^7 & 8.06 \times 10^5 \\ 8.03 \times 10^4 & 8.06 \times 10^5 & 4 \times 10^4 \end{bmatrix} \quad \tilde{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

با حل مسأله LQR فوق با استفاده از نرم‌افزار $MATLAB$ داریم:

$$\begin{bmatrix} u \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 336.76 & 3286.9 & 144.75 \\ 0 & 0 & 0 \\ 164.34 & 1654.7 & 83.8 \\ 7.23 & 83.8 & 25.39 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

به بیان دیگر

$$u = Kx = [336.76 \quad 3228.9 \quad 144.75]x$$

$$v = Lx = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 164.34 & 1654.7 & 83.8 \\ 7.23 & 83.8 & 2539 \end{bmatrix}x$$

برای اینکه $u = Kx$ جواب مسأله کنترل مقاوم باشد، بایستی شرط (۲-۱۸) برقرار باشد.

$$\beta^2 I - 2\rho^2 L^T L > 0$$

۸-۴ اعمال کنترل مقاوم به سیستم

با اعمال کنترل مقاوم طراحی شده در بخش قبل به سیستم، تغییر مقادیر ویژه را در حضور عدم قطعیت‌های مختلف بررسی می‌کنیم. ماتریس حالت جدید کنترل شده مقاوم بهینه پایدارساز سیستم قدرت PSS 1A به صورت زیر بدست می‌آید. با توجه به معادله (۶-۲) داریم:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(p)x + Bu \\ u = Kx \end{cases} \Rightarrow \dot{x} = A(p)x + BKx \Rightarrow A_{new} = A(p) + BK$$

با توجه به مقادیر نامی جدول ۴-۱ و مجموعه داده ۱، مقادیر ویژه سیستم بصورت زیر بدست می‌آید.

جدول ۴-۵: مقادیر ویژه سیستم کنترل شده بهینه مقاوم و سیستم کنترل نشده

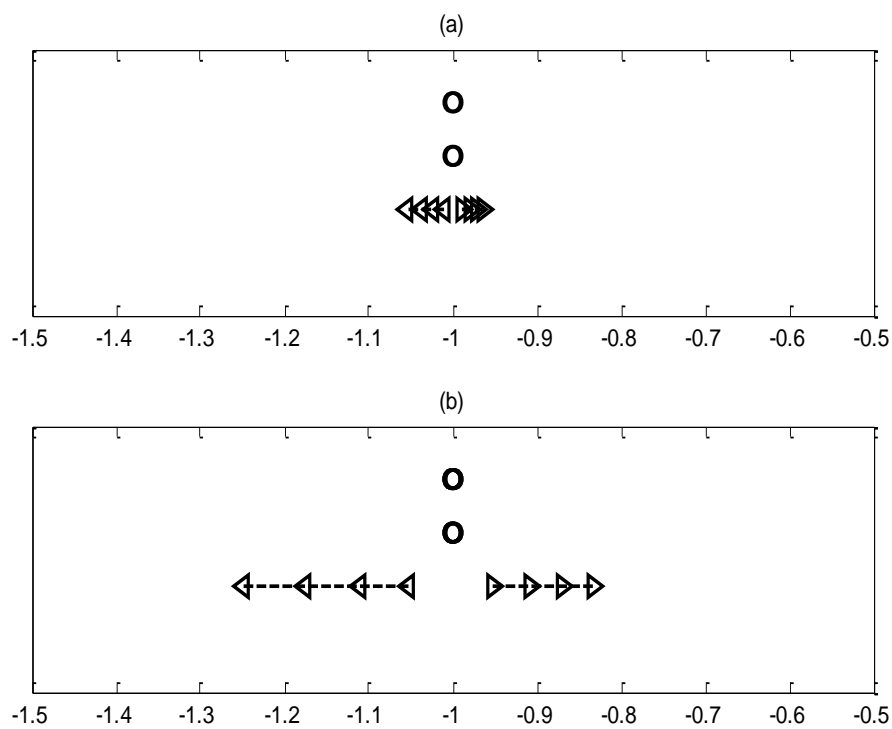
مقدار ویژه	A	A_{new}
۱	-۲۰	-۳۶۶/۸
۲	-۲۰	-۱۰/۰۱
۳	-۰/۱	-۰/۰۵

جدول ۴-۶: تغییر مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم بهینه به ازای تغییر پارامتر T_5

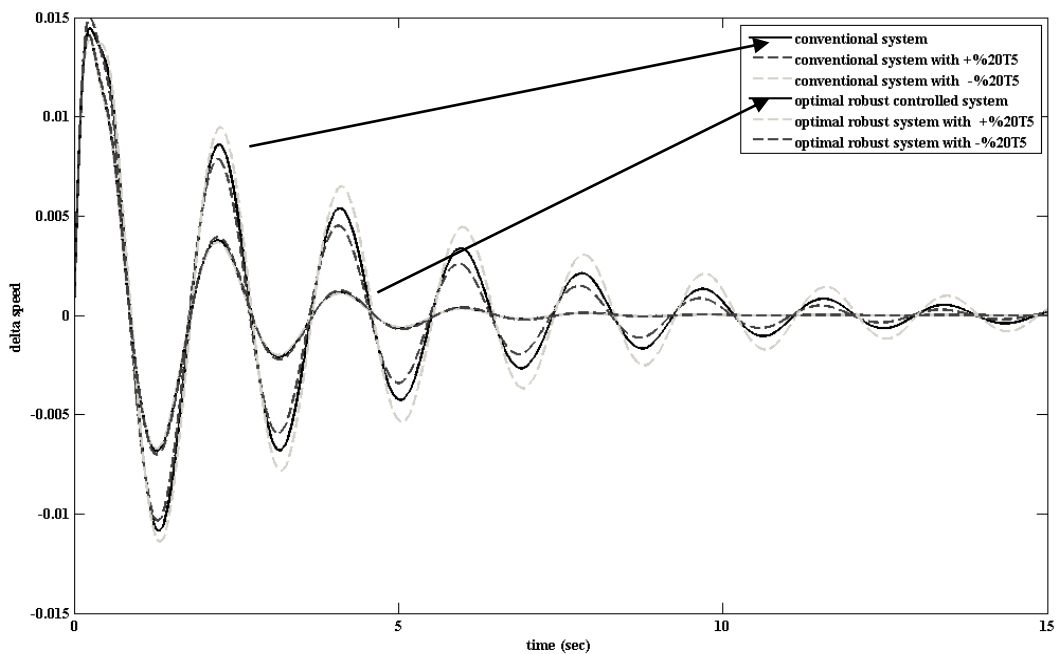
مقدار ویژه A_{new}	$T_5 + 0.105T_5$	$T_5 + 0.11T_5$	$T_5 + 0.115T_5$	$T_5 + 0.12T_5$
حالت ۱	-۳۶۶/۸	-۳۶۶/۸	-۳۶۶/۸	-۳۶۶/۸
حالت ۲	-۱۰/۰۱	-۱۰/۰۱	-۱۰/۰۱	-۱۰/۰۱
حالت ۳	-۰/۰۴۹	-۰/۰۴۹	-۰/۰۴۸	-۰/۰۴۸

مقدار ویژه A_{new}	$T_5 - 0.105T_5$	$T_5 - 0.115T_5$	$T_5 - 0.115T_5$	$T_5 - 0.12T_5$
حالت ۱	-۳۶۶/۸	-۳۶۶/۸	-۳۶۶/۸	-۳۶۶/۸
حالت ۲	-۱۰/۰۱	-۱۰/۰۱	-۱۰/۰۱	-۱۰/۰۱
حالت ۳	-۰/۰۵۰	-۰/۰۵۱	-۰/۰۵۲	-۰/۰۵۳

با توجه به مقادیر جدول ۴-۴ و جدول ۶-۴ داریم:



شکل ۴-۱۰: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامتر T_5
 (a) سیستم کنترل شده مقاوم بهینه (b) سیستم نامی



شکل ۴-۱۱: پاسخ سیستم نامی و سیستم کنترل شده مقاوم در حضور عدم قطعیت T_5

جدول ۴-۷: تغییر مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم به پهنه به ازای تغییر پارامترهای T_2 و T_4 ، T_5

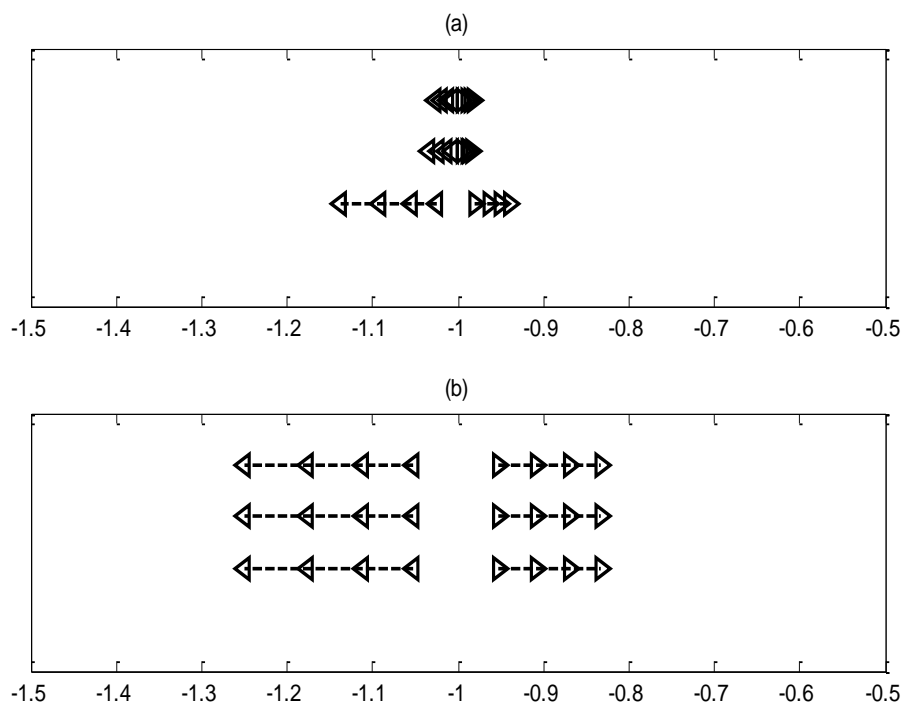
مقدار ویژه A_{new}	$T_5 + 0.05T_5$ $T_4 + 0.05T_4$ $T_2 + 0.05T_2$	$T_5 + 0.1T_5$ $T_4 + 0.1T_4$ $T_2 + 0.1T_2$	$T_5 + 0.15T_5$ $T_4 + 0.15T_4$ $T_2 + 0.15T_2$	$T_5 + 0.2T_5$ $T_4 + 0.2T_4$ $T_2 + 0.2T_2$
حالت ۱	-۳۶۴/۹۳	-۳۶۳/۲۴	-۳۶۱/۶۹	-۳۶۰/۲۷
حالت ۲	-۹/۹۶	-۹/۹۲	-۹/۸۸	-۹/۸۵
حالت ۳	-۰/۰۴۹	-۰/۰۴۸	-۰/۰۴۷	-۰/۰۴۷

مقدار ویژه A_{new}	$T_5 - 0.05T_5$ $T_4 - 0.05T_4$ $T_2 - 0.05T_2$	$T_5 - 0.1T_5$ $T_4 - 0.1T_4$ $T_2 - 0.1T_2$	$T_5 - 0.15T_5$ $T_4 - 0.15T_4$ $T_2 - 0.15T_2$	$T_5 - 0.2T_5$ $T_4 - 0.2T_4$ $T_2 - 0.2T_2$
حالت ۱	-۳۶۸/۸۴	-۳۷۱/۱۱	-۳۷۳/۶۴	-۳۷۶/۴۸
حالت ۲	-۱۰/۰۷	-۱۰/۱۴	-۱۰/۲۳	-۱۰/۳۵
حالت ۳	-۰/۰۵۱	-۰/۰۵۳	-۰/۰۵۴	-۰/۰۵۷

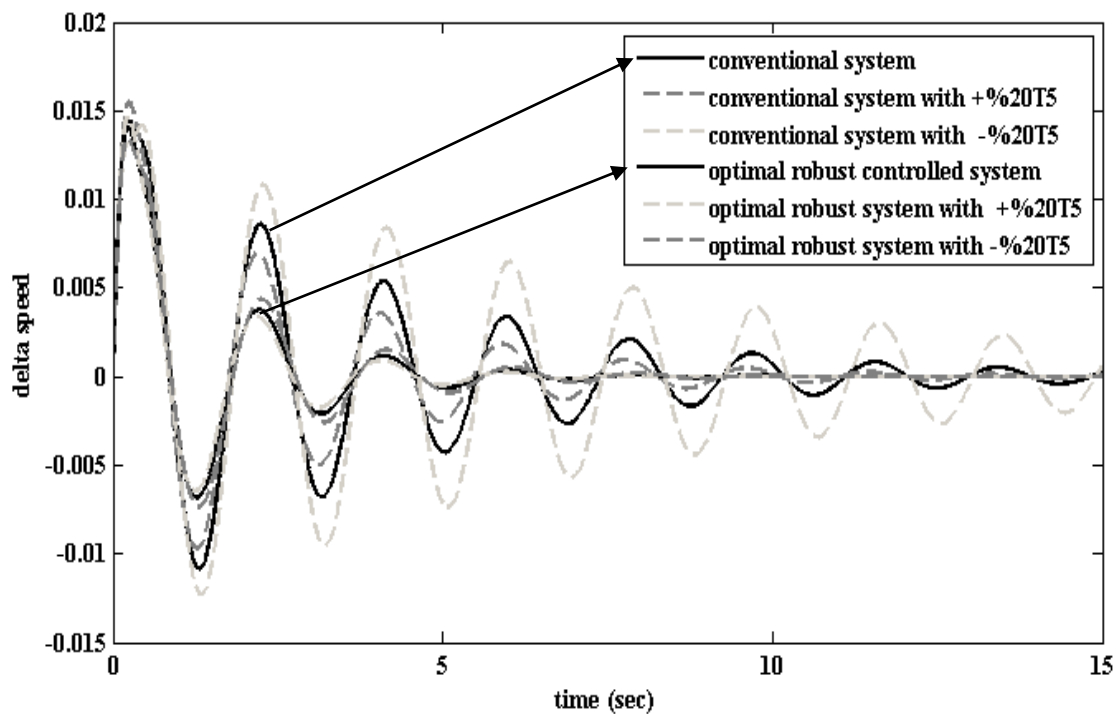
جدول ۴-۸: تغییر مقادیر ویژه ماتریس حالت نامی بازای تغییر پارامترهای T_2 و T_4 ، T_5

مقدار ویژه A	$T_5 + 0.05T_5$ $T_4 + 0.05T_4$ $T_2 + 0.05T_2$	$T_5 + 0.1T_5$ $T_4 + 0.1T_4$ $T_2 + 0.1T_2$	$T_5 + 0.15T_5$ $T_4 + 0.15T_4$ $T_2 + 0.15T_2$	$T_5 + 0.2T_5$ $T_4 + 0.2T_4$ $T_2 + 0.2T_2$
حالت ۱	-۱۹/۰۴۷	-۱۸/۱۸۲	-۱۷/۳۹۱	-۱۶/۶۶۷
حالت ۲	-۱۹/۰۴۷	-۱۸/۱۸۲	-۱۷/۳۹۱	-۱۶/۶۶۷
حالت ۳	-۰/۰۹۵	-۰/۰۹۱	-۰/۰۸۷	-۰/۰۸۳

مقدار ویژه A	$T_5 - 0.05T_5$ $T_4 - 0.05T_4$ $T_2 - 0.05T_2$	$T_5 - 0.1T_5$ $T_4 - 0.1T_4$ $T_2 - 0.1T_2$	$T_5 - 0.15T_5$ $T_4 - 0.15T_4$ $T_2 - 0.15T_2$	$T_5 - 0.2T_5$ $T_4 - 0.2T_4$ $T_2 - 0.2T_2$
حالت ۱	-۲۱/۰۵۲	-۲۲/۲۲۲	-۲۳/۵۲۹	-۲۵
حالت ۲	-۲۱/۰۵۲	-۲۲/۲۲۲	-۲۳/۵۲۹	-۲۵
حالت ۳	-۰/۱۰۵	-۰/۱۱۱	-۰/۱۱۷	-۰/۱۲۵



شکل ۴-۱۲: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامترهای T_2 و T_4 , T_5 (a) سیستم کنترل شده مقاوم بهینه (b) سیستم نامی



شکل ۴-۱۳: پاسخ سیستم نامی و سیستم کنترل شده مقاوم در حضور عدم قطعیت T_2 و T_4 , T_5

۹-۴ نتیجه‌گیری

با اعمال کنترل مقاوم طراحی شده به مدل فضای حالت مشاهده کردیم که علاوه بر اینکه مقادیر ویژه سیستم نسبت به عدم قطعیت‌ها مقاوم شدند، پاسخ زمانی پایدار ساز سیستم قدرت نیز بهبود پیدا کرد. با توجه به دو شکل ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌کنیم که با اعمال کنترل مقاوم به سیستم علاوه بر کاهش زمان میرا شدن نوسانات، پاسخ سیستم در حضور عدم قطعیت تغییرات کمتری دارد.

فصل پنجم

گاورنر

۵-۱ مقدمه

با توجه به تغییر مصرف بار شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز و لزوم تأمین مصرف شبکه توسط ژنراتورهای قدرت لازم است تا توان تولیدی ژنراتورها به طور منظم کنترل شود. قدرت خروجی یک ژنراتور با تغییر دادن توان مکانیکی آن کنترل می‌شود. برای این کار با باز کردن یا بستن شیر بخار (و یا دریچه آب)، جریان بخار (و یا آب) ورودی به توربین‌های بخار (آب) تنظیم می‌شود و باعث کنترل قدرت مکانیکی و در نتیجه قدرت اکتیو خروجی ژنراتور می‌گردد. اگر قدرت مصرفی بار افزایش یابد، باید شیر بخار و یا دریچه آب بیشتر باز شود تا به همان میزان قدرت تولیدی ژنراتور افزایش یابد و چنانچه قدرت مصرفی بار کاهش یابد، باید عمل بسته شدن شیرها به نسبت مشخص و معینی صورت گیرد. لازم به ذکر است که عدم توازن قدرت را می‌توان از تأثیر آن بر سرعت و یا فرکانس ژنراتور دریافت زیرا در صورت کاهش بار و یا اضافه بودن تولید، ژنراتور تمایل به افزایش سرعت و فرکانس خود دارد و در صورت افزایش بار و کمبود تولید، سرعت و فرکانس ژنراتور رو به کاهش می‌رود. از آنجا که توازن قدرت اکتیو به منزله ثابت بودن فرکانس سیستم است، انحراف فرکانس شبکه (سرعت محور ژنراتور) از مقدار نامی آن به عنوان سیگنالی جهت تحریک سیستم کنترل اتوماتیک انتخاب می‌شود.

۵-۲ اهمیت کنترل فرکانس

یکی از مشخصات مهم هر سیستمی که در حالت عادی کار می‌کند، ثابت بودن فرکانس آن است. حداقل چهار دلیل اساسی را می‌توان برای این موضوع که چرا نباید فرکانس سیستم از یک مقدار ثابت تعیین شده، تغییر کند به صورت زیر بیان نمود:

۱. اغلب موتورهای AC در سرعت‌هایی کار می‌کنند که عملکرد مطلوب آن‌ها با فرکانس

رابطه دارد.

۲. توربین‌های ژنراتورها به ویژه توربین‌های بخار برای کار در یک سرعت بسیار دقیق

طراحی شده‌اند.

۳. اگر خطای فرکانس در محدوده معینی ثابت نگه داشته شود، کارکرد کلی یک سیستم

قدرت را بهتر می‌توان کنترل نمود.

مورد اول، یعنی موتورهای AC نمی‌توانند مشخص کننده حد و مرز صریحی برای فرکانس باشند. اکثریت گسترده‌ای از بارهایی که با موتورهای AC چرخیده می‌شوند، احتمالاً به تغییرات فرکانس تا میزان $\pm 2\text{HZ}$ زیاد حساس نمی‌باشند. البته ثابت بودن سرعت توربین، یکی از ضروریات مبرم است. یک توربین با پره‌های متعدد و بزرگ خود تشکیل یک سیستم مکانیکی را می‌دهد که دارای فرکانس‌های طبیعی گوناگون است. این فرکانس‌ها کاملاً نامیرا هستند که ناشی از تشدید در سرعت‌های مختلف روتور می‌باشند. در شرایط بارداری آنچه حائز اهمیت می‌باشد، آن است که سرعت روتور هیچگاه نباید وارد محدودهایی شود که منجر به نوسانات روتور با دامنه زیاد گردد. زیرا در این صورت، برای توربین بسیار خطرناک خواهد بود. البته توربین‌های آبی کمتر در معرض چنین خطراتی هستند. دلیل سوم نیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. تغییرات نامتعارف در فرکانس شبکه، نشانگر این نکته است که در شبکه قدرت، اشکال اساسی پیش آمده است. با کاهش نوسانات عادی تا حد نوسانات با دامنه بسیار ضعیف، قادر خواهیم بود که اختلاف فرکانسی ناشی از خطا را در همان مراحل اولیه آن تشخیص دهیم. در سیستم‌های مدرن، معمولاً تغییرات فرکانس در محدوده مجاز $0.05 - 0.02\%$ می‌باشد.

ذکر این نکته لازم بنظر می‌رسد که فرکانس سیستم ارتباط تنگاتنگی با تعادل توان اکتیو در کل شبکه دارد. در شرایط عادی، ژنراتورهای سیستم با هماهنگی کار می‌کنند و به کمک یکدیگر توان مورد نیاز بارهای کل شبکه را در هر لحظه به همراه تلفات اکتیو سیستم انتقال تأمین می‌نمایند. تلفات اکتیو سیستم انتقال، شامل تلفات اهمی تجهیزات مختلف سیستم انتقال، تلفات کرونا در خطوط، تلفات هسته در ترانسفورماتورها می‌باشد. باید توجه داشت که انرژی الکتریکی تقریباً با سرعت نور انتشار می‌یابد و چون نمی‌توان در نقطه‌ای از سیستم به شکل الکتریکی ذخیره شود، چنین نتیجه می‌گیریم که نرخ تولید انرژی الکتریکی باید در هر لحظه زمانی برابر نرخ مصرف آن باشد. اگر بین تولید و مصرف

تعادلی وجود نداشته باشد، آنگاه تقاضا پدید آمده در قالب انرژی جنبشی به سیستم وارد و یا از آن خارج می‌شود. با توجه به اینکه انرژی جنبشی به سرعت ژنراتور بستگی دارد، در نتیجه نامتعادلی توان بر روی محور ژنراتورها منجر به تغییرات سرعت محور ژنراتور و طبعاً فرکانس سیستم خواهد شد. با توجه به مطالب فوق به این نتیجه می‌رسیم که چون فرکانس، یک شاخص حساس تعادل انرژی در سیستم بشمار می‌آید، باید از آن بعنوان یک سیگنال ورودی در کنترل سیستم قدرت استفاده نمود. کنترل فرکانس بار، در واقع یکی از کنترل‌های اساسی در سیستم قدرت است که بطور خودکار در تمام نیروگاه‌ها انجام می‌شود.

۳-۵ نقش توربین در کنترل فرکانس نیروگاه

وظیفه یک توربین ایجاد گشتاور مورد نیاز برای چرخش محور ژنراتور می‌باشد. در یک توربین، خروجی و ورودی کنترل‌شونده آن، بترتیب دور محور و میزان دبی بخار ورودی می‌باشد. بعبارت دیگر با افزایش مقدار بخار ورودی، قدرت توربین زیاد می‌شود تبعاً توان تولیدی ژنراتور افزایش می‌یابد. البته توربین تا آنجا می‌تواند تقاضای تولید بیشتر را (ناشی از افزایش بار ژنراتور) جوابگو باشد که بخار مورد نیاز را داشته باشد. پس دیگ بخار، محدودیت‌هایی را از لحاظ تأمین بخار مورد نیاز با کیفیت ثابت برای توربین ایجاد می‌کند.

۴-۵ روش‌های کنترل فرکانس

به منظور کنترل فرکانس شبکه روش‌های مختلفی وجود دارد که عبارتند از:

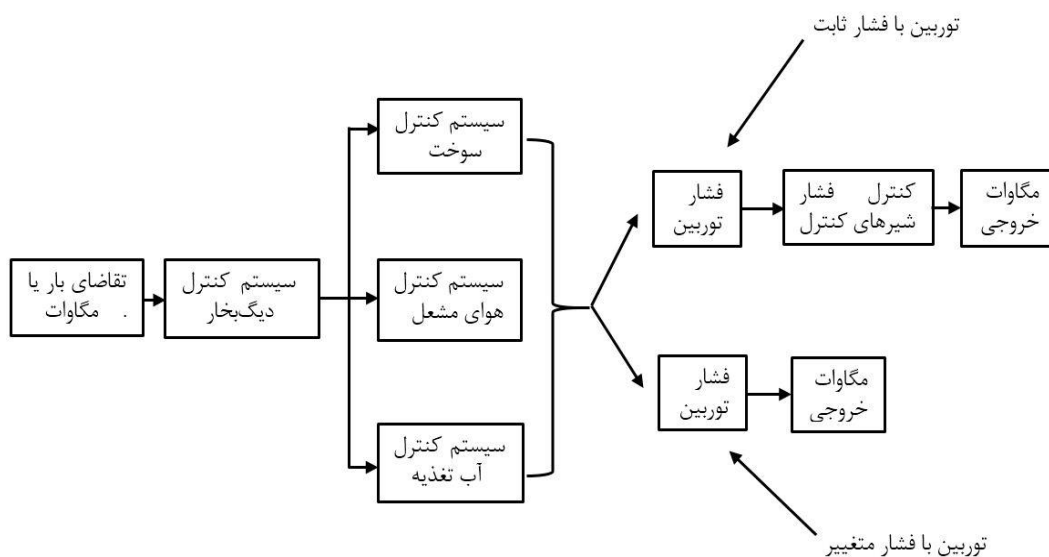
- (۱) سیستم کنترلی وابسته به توربین
- (۲) سیستم کنترلی وابسته به دیگ بخار
- (۳) سیستم کنترلی وابسته به دیگ بخار و توربین

۱-۴-۵ سیستم کنترلی وابسته به توربین

این روش کنترلی در واحدهایی که دارای دیگ بخار یکبار گذر هستند، مورد استفاده قرار

می‌گیرد. البته توربین این نوع واحدها ممکن است هم با فشار ثابت و هم با فشار متغییر کار کند. در صورتی که توربین با فشار ثابت کار کند، مجهز به گاورنر می‌باشد که در این صورت، کنترل اصلی بار توسط دیگ بخار انجام می‌شود و فشار توربین توسط گاورنر کنترل می‌گردد. در این حالت فرمان اصلی تقاضای بار، مستقیماً بر روی پارامترهای کنترل‌کننده دیگ بخار، نظیر سوخت، دبی آب ورودی، دبی هوای وارد شده اثر می‌گذارد تا مقدار بخار خروجی تغییر کند. با تغییر بخار تولید شده، فشار بخار ورودی به توربین تغییر می‌کند و با باز و بسته شدن گاورنر، فشار بخار ورودی ثابت باقی می‌ماند. به عنوان مثال، اگر بار مورد تقاضای ژنراتور افزایش یابد، بلافاصله در دیگ بخار، مقدار آب تغذیه و میزان انتقال حرارت را تغییر می‌دهد و در نتیجه فشار بخار ورودی به توربین تغییر می‌کند. برای ثابت نگه داشتن این فشار، شیرهای کنترل توربین (گاورنر) باز می‌شود تا اجازه عبور بخار اضافی تولید شده توسط دیگ بخار به توربین را بدهد. در این نوع سیستم، پاسخگویی به تغییرات بار به کندی صورت می‌گیرد زیرا قبل از اینکه توربین با تغییر شیرهای کنترل، بار را جبران کند، ناچار است منتظر افزایش یا کاهش بخار خروجی از دیگ شود.

حال اگر توربین با فشار متغییر کار کند در این صورت، فرمان تقاضای بار، مستقیماً میزان آب ورودی و مقدار حرارت منتقل شده در دیگ بخار را تغییر می‌دهد تا بخار تولیدی خارج شده از آن تغییر نماید. در نهایت بخار تولید شده وارد توربین می‌شود. بنابراین در این نوع سیستم‌ها، توربین آن‌ها در حالت کار عادی، دارای شیر کنترل توربین یا گاورنر نیست و در نتیجه، اثر افزایش تولید بخار را می‌توان در تغییر فشار بخار ورودی به توربین مشاهده کرد که خود باعث تغییر مگاوات تولیدی ژنراتور می‌شود. نمودار بلوکی چنین سیستم کنترلی چه در حالت فشار ثابت و چه حالت فشار متغییر را می‌توان در شکل ۵-۱ مشاهده کرد.



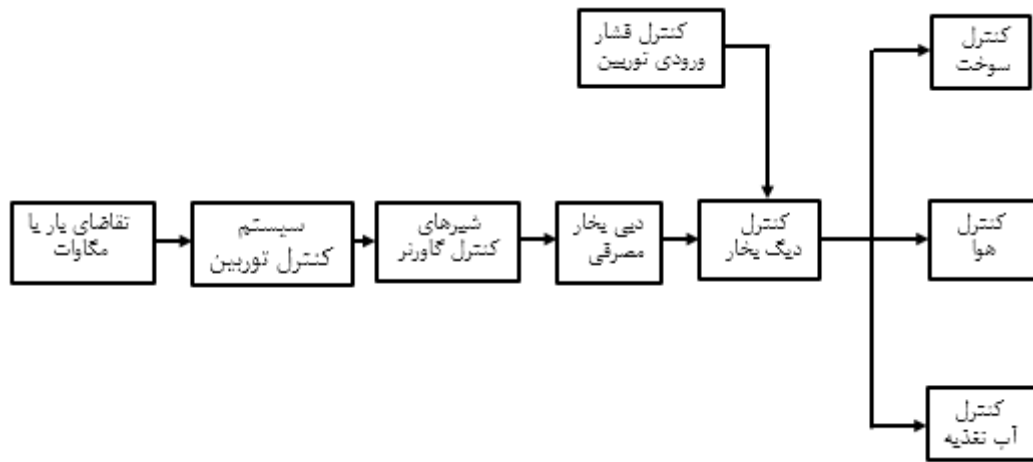
شکل ۵-۱: نمودار بلوکی کنترل وابسته به توربین

۲-۴-۵ سیستم کنترلی وابسته به دیگ بخار

این روش کنترلی بیشتر در دیگ‌های بخار درام دار و همراه با توربین‌هایی که در فشار ثابت کار می‌کنند و توسط گاورنر کنترل می‌شوند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، کنترل مقدار بار نیروگاه بر عهده توربین می‌باشد و این در حالی است که کنترل فشار بخار ورودی به توربین به وسیله دیگ بخار فراهم می‌شود. در حقیقت دیگ بخار، فرامین کنترلی خود را به تبعیت از توربین اعمال می‌کند.

در روش کنترلی وابسته به دیگ بخار، فرمان تقاضای بار مستقیماً بر شیرهای کنترل (گاورنرها) اعمال می‌شود که با تغییر و تعیین وضعیت جدید آن‌ها، میزان بار تغییر می‌کند. به دنبال این تغییرات، سیستم کنترل دیگ بخار، میزان حرارت انتقالی در دیگ بخار را به گونه‌ای تغییر می‌دهد (همراه با تغییر دبی آب ورودی) که تغییر فشار بخار ناشی از تغییر وضعیت شیرهای کنترل را جابگو باشد و فشار را در یک مقدار مشخصی ثابت نگه دارد. در این نوع سیستم کنترل، جواب به تقاضای بار، نسبتاً سریع است. زیرا برای تغییرات میزان بار، از انرژی ذخیره شده در دیگ بخار هم استفاده می‌شود. در نتیجه گاورنرها قادر به پاسخگویی برای بارهای با تغییرات ناگهانی هستند. البته سرعت این پاسخ‌دهی، بستگی به وضعیت دیگ بخار و درام دارد. از این روش در اکثر نیروگاه‌های بخار استفاده می‌شود که

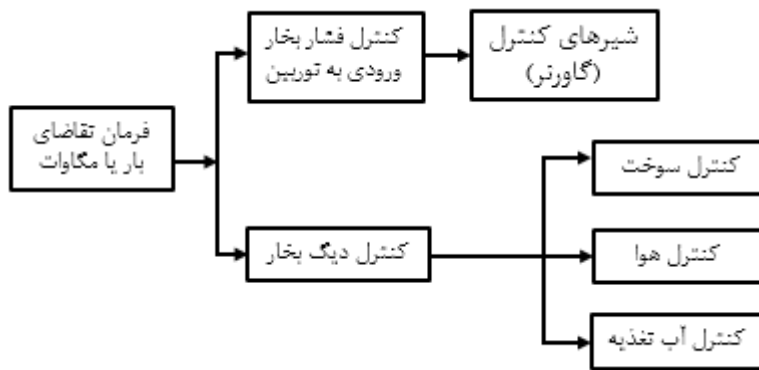
نمودار بلوکی آن را می‌توان در شکل ۲-۵ مشاهده نمود.



شکل ۲-۵ : نمودار بلوکی کنترل وابسته به دیگ بخار

۳-۴-۵ سیستم کنترلی وابسته به دیگ بخار و توربین

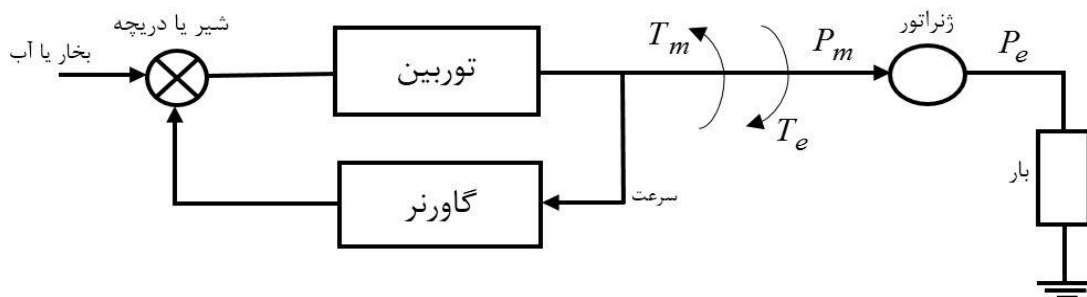
این روش کنترلی می‌تواند مزایای هر دو روش قبلی را دارا باشد، بدین صورت که فرمان تقاضای بار همزمان هم وضعیت شیرهای کنترل را تغییر می‌دهد و هم بر روی متغیرهای کنترل‌شونده دیگ بخار (مقادیر سوخت و هوای مورد نیاز مشعل‌ها، آب ورودی به دیگ بخار) تأثیر می‌گذارد. در این روش، فرمان تقاضای بار ناشی از خطای مگاوات خروجی (به عبارتی خطای فرکانس) بلافاصله شیرهای کنترل را در وضعیت جدید قرار می‌دهند و از مزیت بخار ذخیره شده در درام هم استفاده می‌شود. از طرف دیگر، این فرمان بلافاصله میزان سوخت و هوای مورد نیاز مشعل‌ها را به همراه آب تغذیه ورودی به دیگ بخار تغییر می‌دهد تا هرچه سریعتر دیگ بخار را به وضعیت پایدار (ثابت بودن فشار بخار خروجی از دیگ بخار) برساند. نمودار بلوکی این روش در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: نمودار بلوکی کنترل وابسته به دیگ بخار و توربین

۵-۵ سیستم گاورنر نیروگاه

اساس کار گاورنرها را می‌توان به صورت وسیله‌ای که با تبدیل تغییرات سرعت توربین (فرکانس ژنراتور) به میزان باز و بسته شدن دریچه‌های کنترل آب (در نیروگاه‌های آبی) و یا شیرهای کنترل بخار ورودی به توربین (در نیروگاه بخار) است، بیان نمود. جایگاه گاورنر در یک سیستم کنترل ژنراتور با بار منفرد را می‌توان در شکل ۴-۵ مشاهده نمود. این موضوع باعث ایجاد عدم تطابق بین گشتاور مکانیکی T_m و گشتاور الکتریکی T_e می‌گردد که به نوبه خود باعث تغییر در سرعت می‌شود. این تغییرات سرعت باعث تحریک سیستم گاورنر می‌شود، تا دریچه‌های کنترل آب (در نیروگاه آبی) و شیرهای کنترل بخار (در نیروگاه بخار) را باز یا بسته نماید.



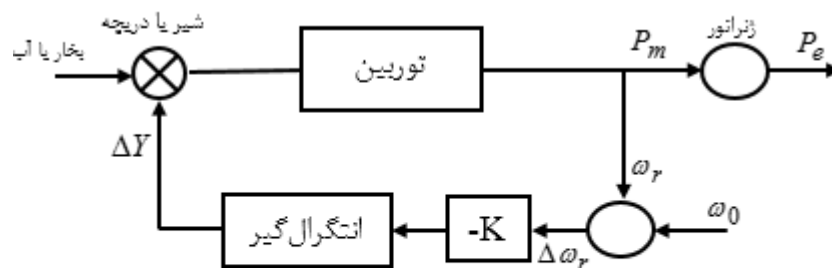
T_m = گشتاور مکانیکی T_e = گشتاور الکتریکی

P_m = توان مکانیکی P_e = توان الکتریکی

شکل ۴-۵: موقعیت گاورنر در ژنراتور با سیستم بار منفرد [۱۶]

۱-۵-۵ گاورنر سرعت ثابت

گاورنر سرعت ثابت، شیر و یا دریچه توربین را بگونه‌ای تنظیم می‌کند تا فرکانس ژنراتور را به مقدار نامی برگرداند. در شکل ۵-۵ الف سیستم کنترل سرعت توربین با گاورنر سرعت ثابت نمایش داده شده است. در این شکل ابتدا سرعت واقعی روتور ω_r با سرعت مبنای ω_0 مقایسه می‌شود. سپس سیگنال خطا (که مساوی مقدار انحراف سرعت از مقدار مبنا است) تقویت می‌شود و با انتگرال‌گیری از آن، سیگنال کنترل ΔY ایجاد می‌شود. این سیگنال معرف میزان باز و بسته شدن شیرهای کنترل بخار یا دریچه‌های کنترل آب می‌باشد. با توجه به وجود انتگرال‌گیر، زمانی سیگنال ΔY به حالت جدید می‌رسد که خطای سرعت $\Delta\omega_r$ مساوی صفر باشد. شکل ۵-۵ ب پاسخ زمانی یک واحد تولیدی را در مقابل افزایش ناگهانی بار (با وجود گاورنر سرعت ثابت) نشان می‌دهد.

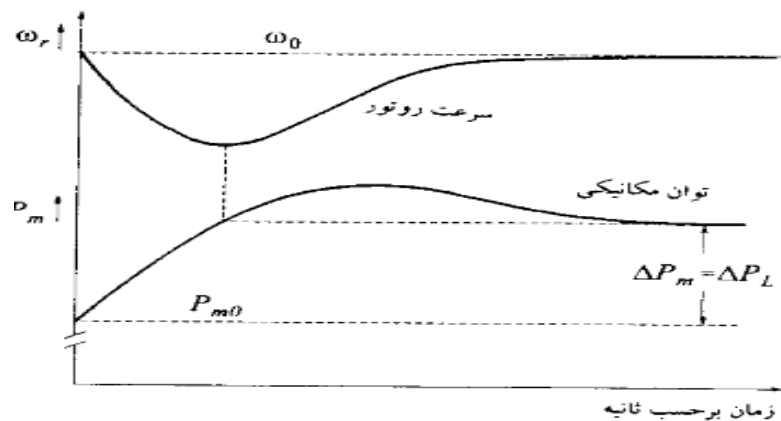


ω_r = سرعت روتور

Y = موقعیت شیر یا دریچه

P_m = سرعت مکانیکی

(الف)



(ب)

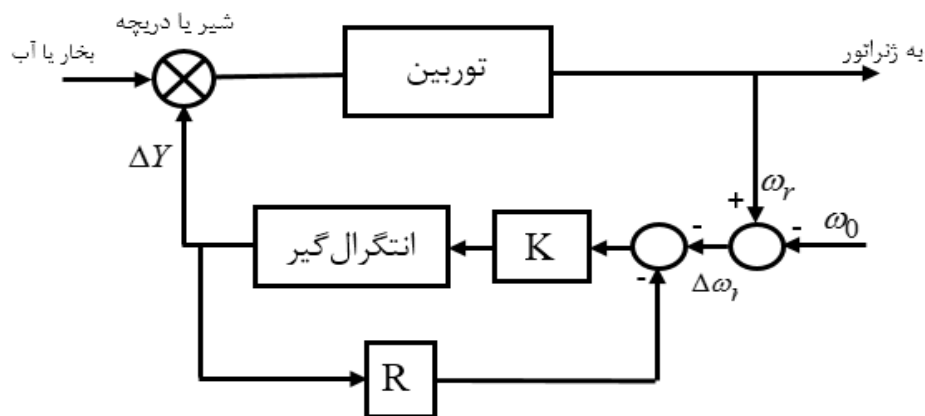
شکل ۵-۵: الف-سیستم کنترل سرعت توربین با گاورنر سرعت ثابت ب- پاسخ زمانی واحد تولید [۱۶]

افزایش قدرت الکتریکی P_e باعث می‌شود تا فرکانس با آهنگی که توسط لختی روتور تعیین

می‌شود، کاهش یابد. با کاهش سرعت، توان مکانیکی توربین شروع به افزایش می‌کند که این موضوع به نوبه خود باعث کاهش آهنگ افت سرعت می‌شود. پس از آن با افزایش توان مکانیکی (به خاطر شتاب محور توربین) سرعت آن نیز مقدارب افزایش می‌یابد. در نهایت، سرعت محور به مقدار مرجع خود می‌رسد و توان حالت ماندگار توربین برابر مقدار توان الکتریکی مورد نیاز ژنراتور (با بار اضافه) می‌شود. در حالتی که ژنراتور یک بار منفرد را تغذیه می‌کند و یا در حالتی که لازم است ژنراتور در یک سیستم چند ژنراتوری به تغییرات بار پاسخ دهد، گاورنرهای سرعت ثابت به طرز مناسبی عمل می‌کنند. البته به منظور تقسیم توان بار بین واحدهای تولیدی یک سیستم باید گاورنرهای تنظیم سرعت با مشخصه افتی سرعت همراه باشند که موضوع آن در ادامه مطلب بیان خواهد شد.

۲-۵-۵ گاورنر با مشخصه افتی سرعت

در سیستم‌هایی با ژنراتورهای متعدد، از گاورنرهای سرعت ثابت نمی‌توان استفاده نمود زیرا در این صورت باید هر ژنراتور به طور دقیق همان نقطه تنظیم سرعت را داشته باشد. در غیر این صورت واحدهای تولیدی باهم درگیر می‌شوند و هر یک سعی می‌کنند تا فرکانس سیستم را به مقدار تنظیم خود برسانند. برای تقسیم پایدار بار بین دو یا چند واحد تولیدی (که بطور موازی هم کار می‌کنند) گاورنرها را به مشخصه‌ای مجهز می‌کنند تا در حالتی که بار افزایش می‌یابد، سرعت توربین کاهش پیدا کند. مشخصه افت یا تنظیم سرعت را می‌توان با افزودن یک حلقه فیدبک حالت ماندگار به دور انتگرال‌گیر سیستم گاورنر به صورت عملی نمود.

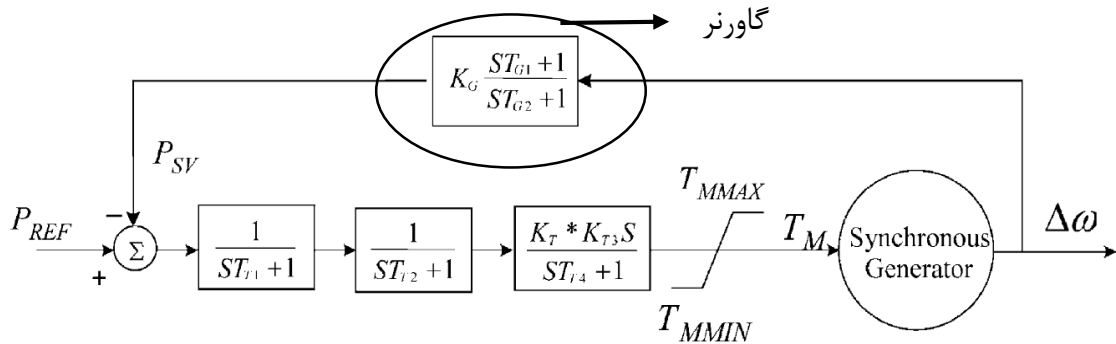


شکل ۵-۶: گاورنر واحدهای تولیدی با فیدبک حالت ماندگار [۱۶]

۵-۶ مدل فضای حالت گاورنر

برای طراحی کنترل مقاوم برای گاورنر با استفاده از مدل گاورنر موجود در [۳۰] ابتدا مدل

فضای حالت آن را بدست می‌آوریم.



شکل ۵-۷: بلوک دیاگرام توربین و گاورنر [۳۰]

$$G(s) = \frac{P_{SV}}{\Delta\omega} = K_G \frac{T_{G1}s + 1}{T_{G2}s + 1}$$

با استفاده از MATLAB مدل فضای حالت گاورنر را بدست می‌آوریم.

$$A = -\frac{1}{T_{G2}} \quad B = 1 \quad C = \frac{K_G}{T_{G2}} - \frac{K_G T_{G1}}{T_{G2}^2} \quad D = \frac{K_G T_{G1}}{T_{G2}}$$

۵-۷ طراحی کنترل مقاوم

از مطالب فصل ۲ دیدیم طراحی کنترل مقاوم بر اساس ماتریس حالت A و اثرگذارترین

پارامتر صورت می‌گیرد. با توجه به مدل فضای حالت گاورنر مشاهده می‌کنیم که ماتریس حالت آن،

یک ماتریس 1×1 و تنها شامل پارامتر T_{G2} است. بنابراین پارامتر عدم قطعیت $P = T_{G2}$ است، در

نتیجه سیستم درجه یک را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\dot{x} = \left[-\frac{1}{P} \right] x + [1] u$$

که در آن $P \in [P_0 - 20\%P_0 \quad P_0 + 20\%P_0] = [21/12 \quad 31/68]$ است. کنترل مقاوم $u = Kx$ را چنان طراحی می‌کنیم که سیستم در بازه عدم قطعیت پایدار و دارای مقادیر ویژه ثابت باشد. برای حل مسأله به روش LQR به ازای مقدار نامی T_{G2} ، $P_0 = 26/4$ کنترل‌پذیری $(A(p_0), B)$ را بررسی می‌کنیم (فرض ۲-۱). ماتریس کنترل‌پذیری C برابر است با:

$$C = \begin{bmatrix} B & \dots & A^{n-1}(P_0)B \end{bmatrix} = [B] = I$$

رتبه ماتریس کنترل‌پذیری C کامل می‌باشد، بنابراین سیستم نامی کنترل‌پذیر است. از آنجا که معادلات حالت را می‌توان به صورت (۲-۲) نوشت، یعنی:

$$\dot{x} = A(p_0)x + Bu + B\varphi(p)x \Rightarrow \dot{x} = -\frac{1}{26.4}x + u + \left(-\frac{1}{P} + \frac{1}{26.4}\right)x$$

در نتیجه شرط سازگاری با $\varphi(P) = \left[-\frac{1}{P} + \frac{1}{26.4}\right]$ برقرار است. F را مطابق با رابطه (۲-۴) بصورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\varphi(p)^T \varphi(p) \leq F \Rightarrow \varphi(p)_{\max}^T \varphi(p)_{\max} \leq 8.9675 \times 10^{-5} = F$$

بنابراین مسأله LQR متناظر به صورت زیر است:

برای سیستم نامی

$$\dot{x} = A(P_0)x + Bu \Rightarrow \dot{x} = -\frac{1}{2.64}x + u$$

قانون کنترل پسخورد $u = Kx$ را چنان می‌یابیم که تابع هزینه (۲-۳) حداقل گردد:

$$\int_0^{\infty} (x^T Fx + x^T x + u^T u) dt = \int_0^{\infty} (x^T (F + I)x + u^T u) dt$$

به بیان دیگر، برای مسأله LQR داریم:

$$Q = F + I$$

$$R = I = I$$

برای حل مسأله LQR با استفاده از نرم‌افزار MATLAB جواب معادله ریکاتی (۲-۵) برابر است با:

$$S = [0.9629]$$

کنترل متناظر $u = -R^{-1}B^T Sx$ عبارتست از:

$$u = [-0.9629]x$$

جدول ۱-۵: مقادیر ویژه سیستم نامی و سیستم کنترل شده مقاوم

مقدار ویژه #	A	A_{new}
۱	-۰/۰۳۷۹	-۱/۰۰۰۸

جدول ۲-۵: مقادیر ویژه سیستم کنترل شده مقاوم بهینه به ازای تغییر پارامتر T_{G2}

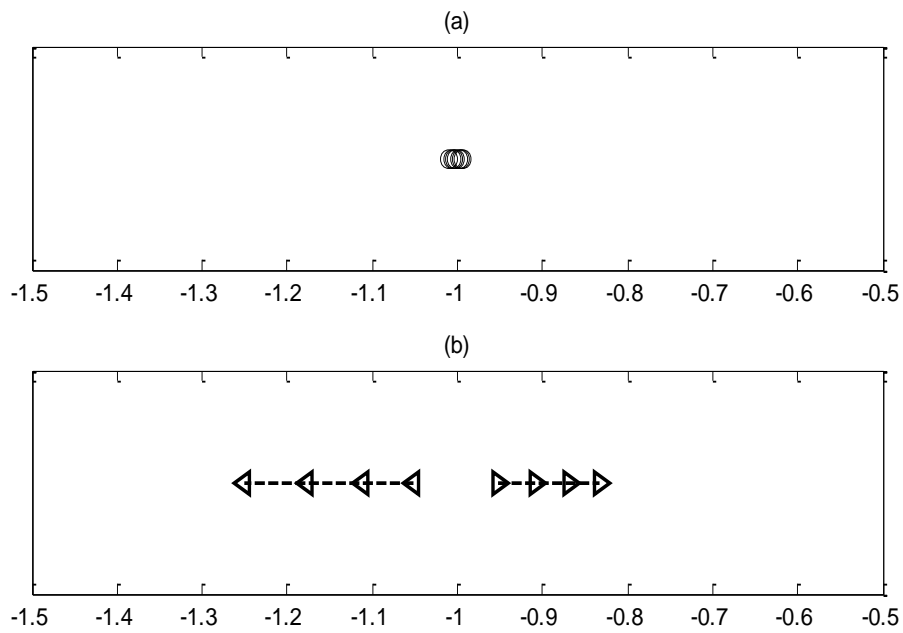
مقدار ویژه A_{new}	$T_{G2} + 0/05 T_{G2}$	$T_{G2} + 0/10 T_{G2}$	$T_{G2} + 0/15 T_{G2}$	$T_{G2} + 0/20 T_{G2}$
حالت ۱	-۰/۹۹۹۰	-۰/۹۹۷۳	-۰/۹۹۵۸	-۰/۹۹۴

مقدار ویژه A_{new}	$T_{G2} - 0/05 T_{G2}$	$T_{G2} - 0/10 T_{G2}$	$T_{G2} - 0/15 T_{G2}$	$T_{G2} - 0/20 T_{G2}$
حالت ۱	-۱/۰۰۲۸	-۱/۰۰۵۰	-۱/۰۰۷۴	-۱/۰۱۰۲

جدول ۳-۵: مقادیر ویژه سیستم کنترل نشده بازای تغییر پارامتر T_{G2}

مقدار ویژه A	$T_{G2} + 0/05 T_{G2}$	$T_{G2} + 0/10 T_{G2}$	$T_{G2} + 0/15 T_{G2}$	$T_{G2} + 0/20 T_{G2}$
حالت ۱	-۰/۰۳۶	-۰/۰۳۴	-۰/۰۳۲	-۰/۰۳۱

مقدار ویژه A	$T_{G2} - 0/05 T_{G2}$	$T_{G2} - 0/10 T_{G2}$	$T_{G2} - 0/15 T_{G2}$	$T_{G2} - 0/20 T_{G2}$
حالت ۱	-۰/۰۳۹	-۰/۰۴۲	-۰/۰۴۴	-۰/۰۴۷



شکل ۸-۵: تغییر موقعیت مقادیر ویژه نرمالیزه شده به ازای تغییر پارامتر T_{G2}

(a) سیستم کنترل شده مقاوم بهینه (b) سیستم نامی

۸-۵ نتیجه گیری

همانطور که مشاهده کردیم با اعمال کنترل مقاوم طراحی شده به مدل گاورنر کاهش تغییر

مقادیر ویژه در مقابل عدم قطعیت بشدت کاهش می یابد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه برای سیستم تحریک مدل $ST1A$ ، پایدارساز سیستم قدرت مدل $PSS1A$ و همچنین گاورنر، کنترل مقاوم به روش جایابی قطب بهینه طراحی شد. از آنجایی که عدم قطعیت در پارامتر، موقعیت مقادیر ویژه سیستم را به صورت قابل توجهی تغییر می‌دهد، بنابراین قوام سیستم ضروری است.

برای طراحی سیستم تحریک مقاوم $ST1A$ به مدل فضای حالت نیاز است. با ساده سازی بلوک دیاگرام و انتخاب متغیرهای حالت، مدل فضای حالت را بدست آوردیم. در سیستم تحریک $ST1A$ پارامتر K_A بیشترین اثر را بر روی موقعیت مقادیر ویژه دارد، بنابراین این پارامتر بعنوان عدم قطعیت اصلی در سیستم تحریک در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه عدم قطعیت در سیستم تحریک از نوع ناسازگار است، طراحی کنترل مقاوم انجام شد.

پایدارساز سیستم قدرت مدل $PSS1A$ بعنوان یکی از رایج‌ترین پایدارسازهای مورد استفاده در صنعت انتخاب شد. مدل فضای حالت پایدارساز با استفاده از بلوک دیاگرام استاندارد موجود بدست آمد. پارامتر T_5 بر روی تغییر موقعیت مقادیر ویژه سیستم بیشترین اثر را دارد. بنابراین برای طراحی کنترل مقاوم از این پارامتر استفاده کردیم.

با انتخاب مدل ساده شده‌ی گاورنر و با توجه به اینکه در مدل فضای حالت، ماتریس حالت یک ماتریس 1×1 و تنها شامل پارامتر T_{G2} بود برای طراحی کنترل مقاوم از این پارامتر استفاده کردیم.

نتایج بدست آمده در این پایان‌نامه را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر مطرح نمود:

- با اعمال کنترل مقاوم طراحی شده، سیستم تحریک در مقابل تغییر K_A به طور کامل مقاوم است. نمودار مقادیر ویژه نرمالیزه شده در حضور عدم قطعیت و اعمال کنترل مقاوم بخوبی ثابت بودن مقادیر ویژه را نشان داد.
- با در نظر گرفتن تعداد بیشتری عدم قطعیت مشاهده کردیم که کنترل مقاوم

همچنان با تغییر مقادیر ویژه مقابله می‌کند.

- اعمال کنترل مقاوم به پایدارساز سیستم قدرت، نشان می‌دهد که تغییر موقعیت مقادیر ویژه در حضور عدم قطعیت بشدت کاهش می‌یابد.
- کنترل مقاوم طراحی شده برای گاورنر نیز تغییر موقعیت مقادیر ویژه را بخوبی کاهش داد.

۲-۶ پیشنهادات

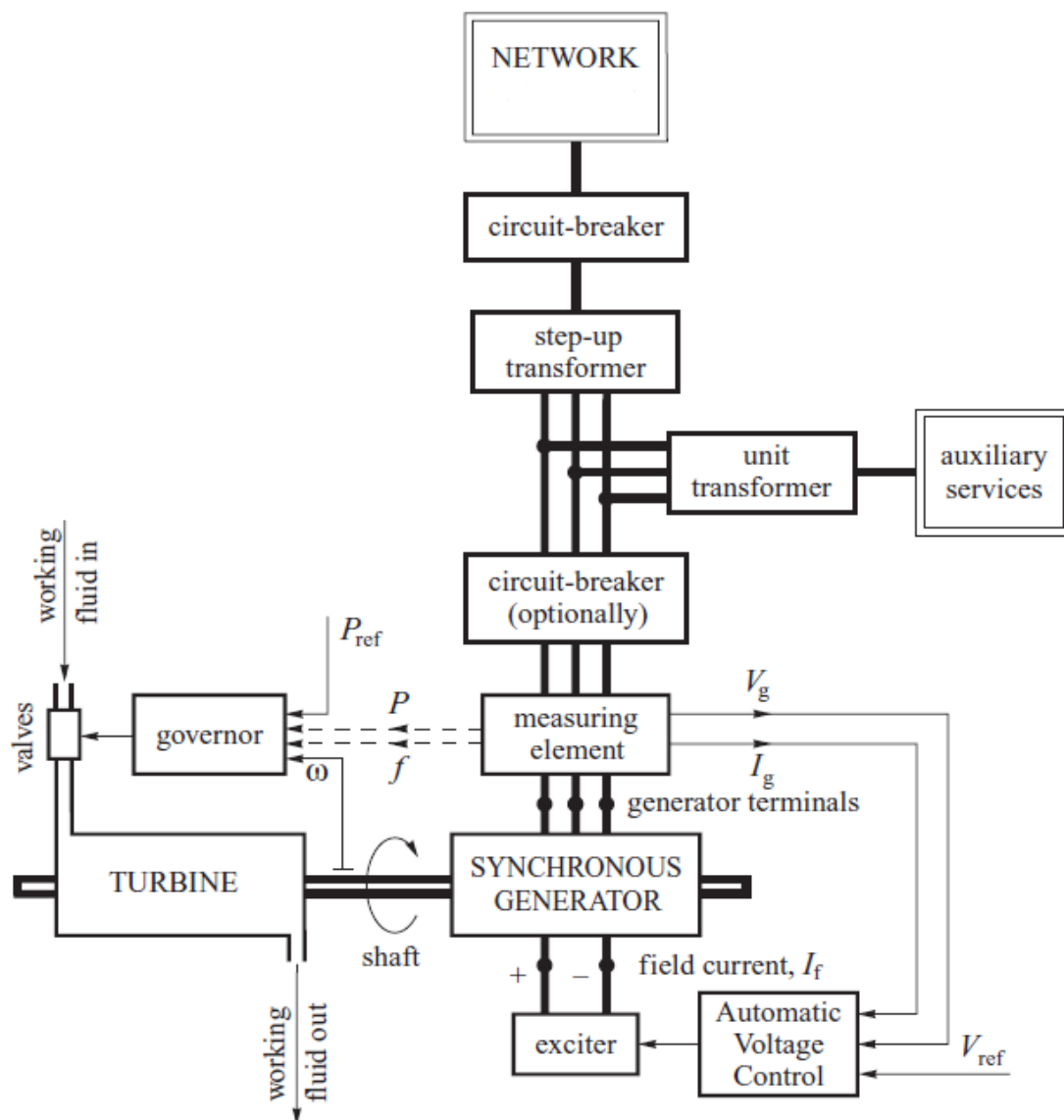
در این بخش، به دنبال مسائلی که در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار گرفت، چند پیشنهاد جهت ادامه مطالعه و تحقیق ارائه می‌شود:

- بکاربردن روند طراحی کنترل مقاوم برای سایر مدل‌های سیستم تحریک، پایدار ساز سیستم قدرت، گاورنر و حتی سایر اجزاء سیستم قدرت.
- در انتهای هر فصل کنترل مقاوم طراحی شده به سیستم اعمال شده و نتایج خوبی بدست آمده است. پیشنهاد می‌شود این کنترل‌کننده‌های مقاوم در یک واحد تولید قدرت به صورت کامل اعمال شود.
- یکی از بزرگترین مزیت‌های این کنترل مقاوم سادگی طراحی و پیاده‌سازی است. پیشنهاد می‌شود به صورت عملی تست شود.

پیوست الف

۱-۷ واحدهای تولید

بلوک دیاگرام واحد تولید در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. انرژی الکتریکی بوسیله یک ژنراتور سنکرون که بوسیله یک توربین یا موتور دیزل به عنوان محرک اولیه کار می‌کند، تولید می‌شود.



شکل ۱-۷: بلوک دیاگرام واحد تولید [۲]

توربین به یک توربین گاورنر^۱ که سرعت یا توان خروجی را مطابق با مشخصه فرکانس-توان

^۱ Turbine governor

از قبل مشخص شده، کنترل می‌کند، مجهز شده است. توان تولید شده از طریق یک ترانسفورماتور افزایش‌دهنده^۱ به شبکه انتقال تزریق می‌شود. برای تولید میدان مغناطیسی درون ژنراتور که بوسیله *اکسایتر* فراهم شده است، جریان (میدان) تحریک *DC* لازم است. جریان تحریک و به تبع آن ولتاژ ترمینال ژنراتور بوسیله یک تنظیم‌کننده ولتاژ اتوماتیک^۲ کنترل می‌شود. ممکن است یک ترانسفورماتور واحد^۳ اضافی به منظور تامین توان خدمات معین ایستگاه شامل موتورها، پمپ‌ها، محرک‌ها و غیره به باس-بار بین ژنراتور و ترانسفورماتور افزایش‌دهنده وصل شده باشد. واحد تولید به یک مدار شکن^۴ اصلی در سمت ولتاژ بالا و همچنین گاهی اوقات به یک مدار شکن در سمت ژنراتور مجهز شده است، زیرا در موارد قطع برق یا بروز یک خطا، مدارشکن ژنراتور هنگامیکه سرویس‌های کمکی از زمین تغذیه می‌شوند، ممکن است باز شده باشد. به عبارت دیگر، با مدار شکن اصلی باز، ژنراتور قادر است خدمات مشخص خودش را تامین کند.

۷-۱-۱ ژنراتورهای سنکرون

ژنراتورهای سنکرون به عنوان ژنراتورهای سرعت بالا، که بوسیله بخار یا توربین‌های گازی (توربوژنراتور) به حرکت در می‌آیند، یا به عنوان ژنراتورهای سرعت پایین که بوسیله توربین‌های آبی حرکت می‌کنند، دسته بندی می‌شوند. برای کاهش نیروی گریز از مرکز، توربوژنراتورهای سرعت بالا، قطر نسبتاً کم اما طول محور بلند دارند و بطور افقی نصب می‌شوند. این ژنراتورها معمولاً دو یا چهار قطب الکتریکی دارند بطوریکه در یک سیستم 50 Hz ، یک ژنراتور بترتیب در 3000 یا 1500 دور بر دقیقه^۵ کار می‌کند. در مقابل، ژنراتورهای سرعت پایین که معمولاً در سرعت 500 rpm یا کمتر کار می‌کنند، تعداد زیادی قطب الکتریکی، قطر بزرگ و طول محور کوتاه‌تر دارند. تعداد واقعی قطب‌های

^۱ step-up transformer

^۲ Automatic voltage regulator (AVR)

^۳ Unit transformer

^۴ Circuit breaker- سوئیچی برای قطع جریان

^۵ Rpm per minute (rpm)

مغناطیسی به سرعت مورد نیاز و فرکانس نامی سیستم قدرت بستگی دارد.

همه‌ی ژنراتورها دو قسمت مغناطیسی اصلی به نام‌های استاتور و روتور دارند. سیم‌پیچ آرمیچر که جریان بار را حمل و برای سیستم انرژی فراهم می‌کند، در شیارهای هم‌فاصله بر روی سطح داخلی استاتور قرار گرفته و شامل سه سیم‌پیچ فاز کاملاً یکسان است. همچنین روتور ژنراتور سرعت بالا شامل شیارهایی برای سیم‌پیچ تحریک DC است، هنگامی که سیم‌پیچ تحریک برای ژنراتورهای سرعت پایین بر روی قطب‌های صاف روتور پیچانده شده است. همچنین روتور شامل یک تعدیل‌کننده اتصال کوتاه^۱ اضافی برای کمک به تعدیل نوسانات مکانیکی روتور است.

سیم‌پیچ تحریک روتور برای تولید میدان مغناطیسی چرخان که قدرتش با جریان تحریک متناسب است، به یک جریان مستقیم مجهز شده است. این میدان مغناطیسی چرخان در هر فاز از سیم‌پیچ آرمیچر استاتور سه فاز یک نیروی محرکه الکتریکی^۲ القاء می‌کند که به جریان‌های متناوب برای خارج شدن از سیستم، نیرو می‌دهد. اثر مختلط این جریان‌های آرمیچر AC بدین منظور است که میدان مغناطیسی متقابل آرمیچر خود را تولید کنند، که دامنه ثابت دارد اما با سرعت ثابت دور روتور می‌چرخد. شار تحریک و شار متقابل آرمیچر یک شار برآیند که نسبت به روتور ثابت است اما با سرعت ثابت سنکرون نسبت به استاتور می‌چرخد را نتیجه می‌دهد.

۷-۱-۱۲ اکسایترها و تنظیم‌کننده‌های اتوماتیک ولتاژ

همانطور که در شکل ۷-۱ نشان داده شده است، سیستم تحریک ژنراتور شامل یک اکسایتر و یک AVR بوده و برای تامین جریان میدان DC ژنراتور ضروری است. نرخ توان محرک معمولاً در بازه $0.8-0.2\%$ از نرخ توان (مگاوات) ژنراتور است. در مورد یک ژنراتور بزرگ این توان کاملاً بزرگ و در محدوده چند مگاوات است.

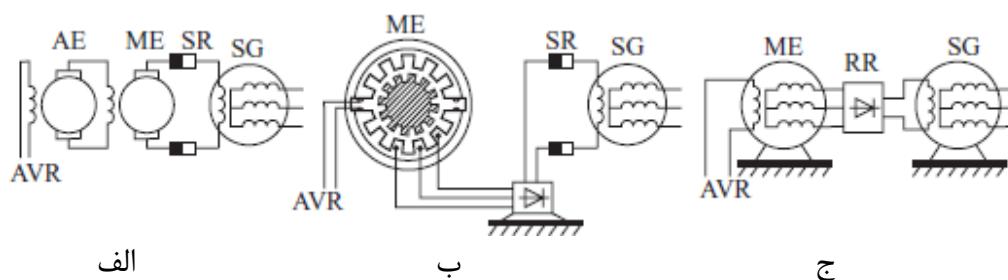
^۱ Short-circuited damper or amortisseur windings

^۲ Electromotive force (emf)

سیستم‌های تحریک ۱-۲-۱-۷

به طور کلی سیستم‌های تحریک به صورت دوار یا ایستا دسته‌بندی می‌شوند (شکل ۲-۷). در اکسایترهای چرخان (شکل ۲-۷ الف-ج) جریان تحریک بوسیله‌ی یک ژنراتور DC یا یک ژنراتور AC همراه با یکسوساز فراهم می‌شود. چون معمولاً ژنراتورهای DC رنج توان نسبتاً پایینی دارند، برای فراهم کردن خروجی لازم زنجیره‌ای^۱ هستند (شکل ۲-۷ الف). با توجه به مشکلات کموتاسیون در ژنراتورهای DC ، این نوع از اکسایتر برای ژنراتورهای بزرگ که نیاز به جریان تحریک بالا دارند نمی‌تواند استفاده شود. همزمان با افزایش تعداد ژنراتورهای DC زنجیره‌ای، مشخصات دینامیک اکسایتر بدتر می‌شود، در نتیجه ثابت زمانی معادل افزایش می‌یابد. امروزه ژنراتورهای DC تقریباً بطور کامل با آلترناتورها^۲ جایگزین شده‌اند که هم ساده‌تر و هم قابل اعتمادتر هستند.

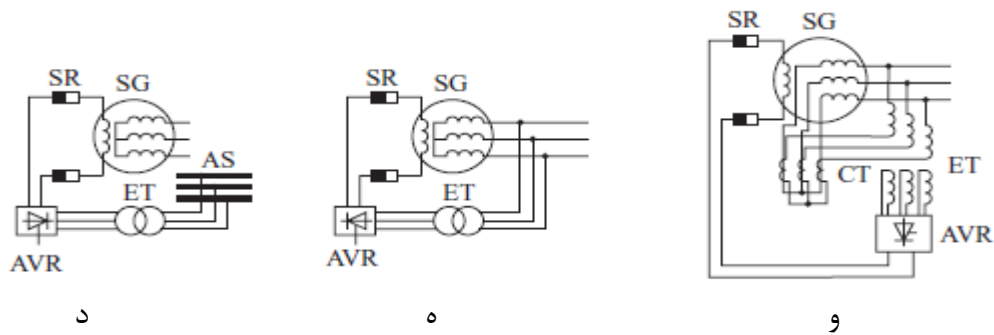
اکسایتر نشان داده شده در شکل ۲-۷ ب یک ماشین رلوکتانس (ژنراتور القاگر^۳) با شرایط عملیاتی $500-600\text{ HZ}$ است. با این اکسایتر هر دو سیم‌پیچ (AC و DC) سمت استاتور هستند. یکی از عیوب این سیستم این است که برای تغذیه جریان تحریک یکسوشده به سیم‌پیچ میدان چرخان ژنراتور اصلی، حلقه‌های لغزان مورد نیاز است. مشکل بزرگتر اینست که خود اکسایتر تمایل به بزرگ بودن دارد. این یک نتیجه مستقیم ناشی از تغییرات شار سینوسی لازم برای القای emf متناوب درون آرمیچر، که فقط با تغییر در رلوکتانس ناشی از چرخ دنده‌های روتور برجسته تولید شده‌اند.



^۱ cascaded

^۲ Alternator (دستگاه تولید برق متناوب)

^۳ Inductor generator



شکل ۷-۲: سیستم‌های تحریک رایج [۲]

الف) ژنراتورهای DC (زنجیره‌ای ب) ماشین رلوکتانس با یکسوساز ج) ژنراتور سنکرون معکوس همراه با یکسوساز چرخان د) یکسوساز کنترل شده‌ی تغذیه شده از منبع کمکی ه) یکسوساز کنترل شده‌ی تغذیه شده از ترمینال‌های ژنراتور و) یکسوساز کنترل شده، تغذیه شده بوسیله ولتاژ و جریان ژنراتور.

جدول ۷-۱: فهرست اختصارات

SG	Synchronous generator
SR	Slip rings
ME	Main exciter
AE	Auxiliary exciter
RR	Rotating rectifier
ET	Excitation transformer
AS	Auxiliary service busbars
CT	Current transformer
AVR	Automatic voltage regulator

اکسایتر نشان داده شده در شکل ۷-۲ ج نه کموتاتور و نه حلقه‌های لغزان دارد. منبع تحریک اصلی، یک ماشین سنکرون معکوس^۱ با سیم‌پیچ میدان بر روی استاتور و سیم‌پیچ آرمیچر روی روتور است. جریان تولید شده بوسیله دیودها که بر روی روتور نصب شده‌اند و بطور مستقیم از سیم‌پیچ تحریک ژنراتور اصلی تغذیه می‌شوند، یکسو می‌شود. یکی از محدودیت‌های این نوع از اکسایتر این است که جریان فراهم شده برای ژنراتور اصلی فقط می‌تواند به طور غیر مستقیم با کنترل میدان اکسایتر، کنترل شود. این محدودیت به معرفی یک ثابت زمانی در حدود ۰/۵ تا ۱ ثانیه به سیستم کنترل اکسایتر

^۱ Inside-out

منجر می‌شود. یک روش برای حل این مشکل استفاده از تریستورهای چرخان^۱ بجای دیودها، و کنترل خروجی اکسایتر بوسیله زاویه آتش تریستورها است.

بعضی از سیستم‌های اکسایتر متناوب که از مبدل‌های تریستور استاتیک استفاده می‌کنند در شکل ۷-۲-۵ و نشان داده شده‌اند. در این نوع از اکسایترها یکسوکونده‌های تریستور بوسیله تنظیم‌کننده ولتاژ به صورت مستقیم کنترل شده‌اند. تفاوت اصلی در این سیستم‌ها در نوع منبع مورد استفاده است. شکل ۷-۲-۶ یک اکسایتر مجهز به یک ترانسفورماتور جنبی اضافی^۲ را نشان می‌دهد. شکل ۷-۲-۷ یک راه حل ساده و جایگزین برای اینکه اکسایتر بوسیله یک ترانسفورماتور از خروجی ژنراتور تغذیه شود را نشان می‌دهد. کاهش در ولتاژ ترمینال ژنراتور، احتمال کاهش تحریک را نتیجه می‌دهد. با طراحی دقیق، هنگامی که اتصال کوتاه از ترمینال‌های ژنراتور خیلی دور است، اکسایتر می‌تواند کار کند. همانطور که در طراحی اکسایتر شکل ۷-۲-۶ و نشان داده شده است انعطاف‌پذیری بیشتر می‌تواند بوسیله تغییر در منبع یکسوساز بدست آید. در این سیستم بدلیل اینکه منبع ولتاژش افزایش یافته یا بوسیله یک مشتق جزئی از جریان بار ژنراتور ترکیب شده، ژنراتور نمی‌تواند تحریک را کاهش دهد.

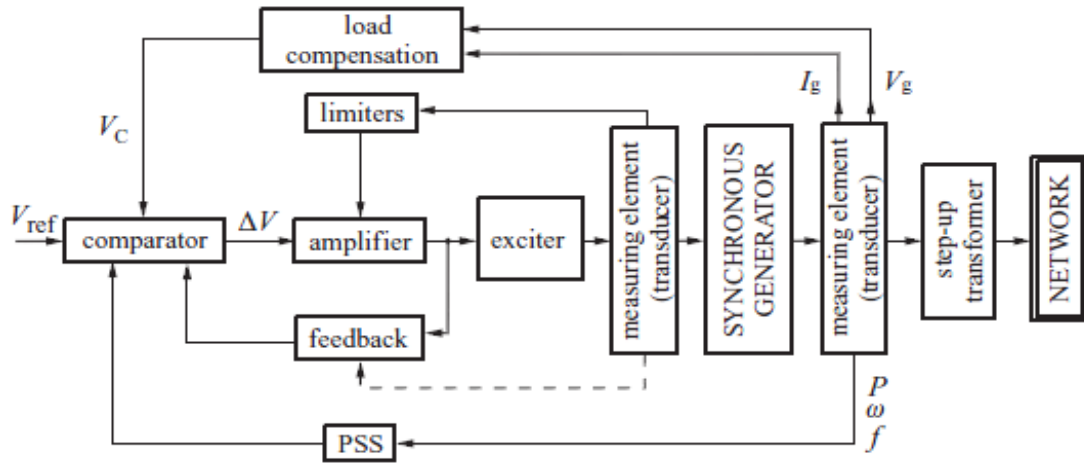
۷-۱-۲-۲ تنظیم‌کننده‌های اتوماتیک ولتاژ

AVR با کنترل میزان جریان فراهم شده برای سیم‌پیچ میدان ژنراتور بوسیله اکسایتر، ولتاژ ترمینال ژنراتور را تنظیم می‌کند. بلوک دیاگرام کلی از زیرسیستم‌های *AVR* در شکل ۷-۳ نشان داده شده است. المان‌های اندازه‌گیر، جریان، توان، ولتاژ ترمینال و فرکانس ژنراتور را اندازه می‌گیرند. ولتاژ ترمینال ژنراتور (V_g) بوسیله جریان بار (I_g) تقویت و با ولتاژ مرجع مورد نظر (V_{ref}) مقایسه می‌شود تا ولتاژ خطا (ΔV) تولید شود. سپس این خطا تقویت و برای اصلاح کردن خروجی اکسایتر، و به تبع آن جریان میدان ژنراتور استفاده می‌شود، بطوریکه خطای ولتاژ محدود شده است. این یک سیستم

^۱ Rotating thyristor

^۲ additional auxiliary service transformer

کنترل حلقه بسته عادی را نمایش می‌دهد. فرآیند تنظیم، با استفاده از یک فیدبک منفی که به صورت مستقیم از تقویت‌کننده یا اکسایتر گرفته شده، پایدار می‌شود.



شکل ۷-۳: بلوک دیاگرام سیستم تحریک و AVR و PSS [۲]

المان جبرانگر بار همراه با مقایسه‌کننده در شکل ۷-۴ نشان داده شده است. افت ولتاژ در کنار

امپدانس جبرانگر $\underline{Z}_C = R_C + jX_C$ قرار می‌گیرد، با توجه به اینکه جریان ژنراتور \underline{I}_g به ولتاژ ژنراتور \underline{V}_g برای تولید ولتاژ جبران شده V_C مطابق با رابطه زیر اضافه شده است.

$$V_C = |V_C| = |\underline{V}_g + (R_C + jX_C) \underline{I}_g|$$

اگر جبرانگر بار استفاده نشده باشد $\underline{Z}_C = 0$ ، در نتیجه $V_C = V_g$ و زیر سیستم AVR ولتاژ

ترمینال ژنراتور را ثابت نگه می‌دارد. مسیر فرض شده از فازور در شکل ۷-۴ به این معنی است که نقطه‌ی تنظیم ولتاژ به سمت شبکه‌ای که با یک امپدانس جبرانگر منفی مرتبط است، حرکت می‌کند.

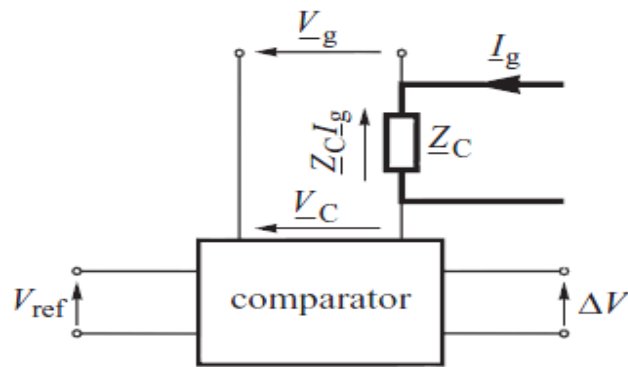
در مورد ژنراتورهای موازی فراهم‌کننده باس بار، به منظور حفظ توان راکتیو پایدار بین ژنراتورها، امپدانس

جبرانگر باید از امپدانس ترانسفورماتور افزایش یافته کوچکتر باشد. معمولاً $X_C \approx 0.15 X_T$ که در آن X_T

راکتانس ترانسفورماتور افزایش یافته است. در این مورد تنظیم‌کننده یک مقدار ولتاژ ثابت را با فاصله

$0.15 X_T$ از ترمینال ژنراتور نسبت به شبکه یا با فاصله $0.15 X_T$ از ترمینال ولتاژ بالا نسبت به

ژنراتور حفظ می‌کند.



شکل ۴-۷: المان جبرانگر بار همراه با مقایسه کننده [۲]

همچنین زیر سیستم AVR شامل تعدادی محدودکننده است که وظیفه آنها حفاظت از AVR اکسایتر و ژنراتور در مقابل ولتاژ و جریان بیش از اندازه است. آنها این کار را بوسیله حفظ و نگهداری سیگنال‌های AVR مابین محدوده‌های از پیش تعیین شده انجام می‌دهند. بنابراین تقویت‌کننده^۱ در برابر سیگنال‌های ورودی خیلی بالا محافظت می‌شود، اکسایتر و ژنراتور در برابر میدان جریان خیلی زیاد حفظ می‌شوند و ژنراتور در برابر جریان آرمیچر خیلی زیاد محافظت می‌شود.

بعضی مواقع به منظور کمک به تعدیل گشتاور توان در سیستم پایدارساز سیستم قدرت یک AVR اضافه می‌شود. سیگنال‌های ورودی ممکن است با سرعت روتور، فرکانس خروجی ژنراتور یا توان حقیقی خروجی ژنراتور متناسب باشد. پارامترهای AVR باید به نحوی انتخاب شوند که مقدار مناسبی از تنظیم‌کننده ولتاژ حفظ شود. برای اغتشاش‌های کوچک، مقادیر بوسیله مشاهده پاسخ ولتاژ دینامیکی یک ژنراتور نسبت به یک تغییر واحد در مقدار مرجع، می‌تواند تخمین زده شوند. این مورد در شکل ۵-۷ برای تغییر واحد در مقدار مرجع بوسیله $\Delta V = V_{ref} + -V_{ref}$ نشان داده شده است. سه شاخص زیر کیفیت تنظیم را ارزیابی می‌کنند:

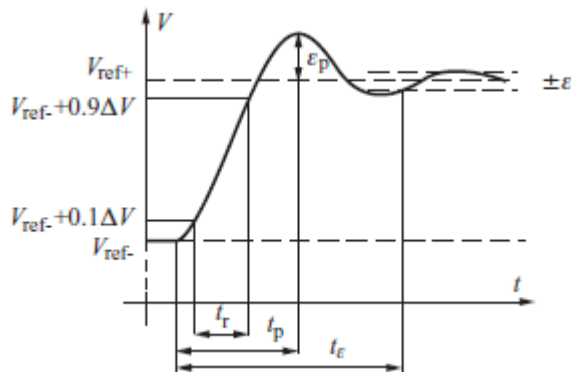
$$1. \text{ زمان نشست } t_s$$

^۱ amplifier

^۲ Settling time

۲. بالازدگی^۱ ε_p

۳. زمان صعود^۲ t_r



شکل ۷-۵: پاسخ ولتاژ دینامیک به تغییر پله در مقدار مرجع

این شاخص‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- زمان نشست t_ε زمان لازم برای سیگنال جهت رسیدن به مقدار ثابت با یک مقدار خطا ε است.
- بالازدگی ε_p تفاوت بین مقدار حداکثر ولتاژ و مقدار مرجع است و معمولاً به صورت درصدی از مقدار مرجع بیان می‌شود.
- زمان رسیدن به مقدار ماکزیمم با t_p بیان می‌شود.
- زمان صعود t_r ، زمانی است که طول می‌کشد تا ولتاژ از ۱۰ به ۹۰٪، ΔV برسد. در این فاصله سرعتی که ولتاژ افزایش پیدا می‌کند حدود $0.18 \Delta V / t_r$ است.

معمولاً فرض بر این است که دقت تنظیم‌کننده $\varepsilon \leq 0.15\%$ و با ۱۰٪ تغییر پله از مرجع ولتاژ باشد، زمان نشست $t_\varepsilon \leq 0.3 S$ برای اکسایتر ثابت و $t_\varepsilon \leq 1.0 S$ برای اکسایتر چرخشی است. معمولاً بالازدگی به $\varepsilon_p \leq 0.10\%$ برای تغییرات پله از مقدار مرجع هنگامی که ژنراتور بدون بارگذاری است،

^۱ overshoot

^۲ Rise time

نیاز است. سرعت افزایش ولتاژ نباید کمتر از $1/5 U_{ref}$ به ازای هر ثانیه باشد.

مراجع

- [۱] P. M. Anderson and A. A. Found, Power System Control and Stability, Ames, Iowa: Iowa state university press, ۱۹۷۷.
- [۲] J. Machowski, J. W. Bialek and J. R. Bumby, Power System Dynamic: Stability and Control, J. W. & S. Ltd, Ed., United Kingdom, Second Edition, ۲۰۰۸.
- [۳] F.P.DeMello and C.Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control," *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, vol. ۸۸, no. ۴, ۱۹۶۹.
- [۴] Q. Zhihua, J. F. Dorsey, J. Bond and J. D. McCalley, "Application of Robust Control to Sustained Oscillations in Power Systems," *Circuits and Systems*, vol. ۳۹, no. ۶, pp. ۴۷۰-۴۷۶, ۱۹۹۲.
- [۵] C. Sun, Z. Zhao, Y. Sun and Q. Lu, "Design of nonlinear robust excitation control for multimachine power systems," *IEEE Gener. Transm Distrib*, vol. ۱۴۳, no. ۳, ۱۹۹۶.
- [۶] A. I. Zecevic, G. Neskovic and D. D. Siljak, "Robust Decentralized Exciter Control with linear feedback," *IEEE Transactions on power systems*, vol. ۱۹, no. ۲, ۲۰۰۴.
- [۷] Z. Qihua and J. Jiang, "Robust Controller Design for Generator Excitation Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. ۱۰, no. ۲, ۱۹۹۵.

- [۸] H. Bourles, F. Colledani and M. P. Hourny, "Robust Continues Speed Governor Control for Small-Signal and Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. ۱۲, no. ۱, ۱۹۹۷.
- [۹] D. D. Siljak, D. M. Stipanovic and A. I. Zecevic, "Robust Decentralized Turbin/Governor Control Using Linear Matrix Inequalities," *IEEE Trans.Power Sys*, vol. ۱۷, pp. ۷۱۵-۷۲۲, ۲۰۰۲.
- [۱۰] P. S. Roa and I. Sen, "Robust Pole Placement Stabilizer Design Using Linear Matrix Inequalities," *IEEE Trans.Power Sys*, vol. ۱۵, no. ۱, ۲۰۰۰.
- [۱۱] G. Boukarim, S. Wang, J. Chow, G. Taranto and N. Martins, "A Comparison Classical, Robust and Decentralized Control Designs for Multiple Power System Stabilizers," *IEEE Trans.Power Sys*, vol. ۱۵, ۲۰۰۰.
- [۱۲] Y. L. Abdel-Magid and M. A. Abido, "Optimal Multiobjective Design of Robust Power System Stabilizers Using Genetic Algoritm," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. ۱۸, no. ۳, ۲۰۰۳.
- [۱۳] A. Hasanovic, A. Feliachi, A. Hasanovic', N. B. Bhatt and A. G. Groff, "Practical Robust PSS Design Through Identification of Low-Order Transfer Functions," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol. ۱۹, no. ۳, ۲۰۰۴.
- [۱۴] A. M. Hamdy and Y.-n. Yu, "Optimal Power System Stabilization Through Excitation and/or Governor Control," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. pas-۹۱, no. ۳, ۱۹۷۲.
- [۱۵] پ. ف. لین، طراحی کنترل مقاوم روش کنترل بهینه، ع. الفی، دانشگاه شاهرود، ۲۰۰۷.

- [۱۶] M. I. crenshaw and K. E. Bollinger, "Excitation System Models for Power System Stability Studies," IEEE committee report, ۱۹۸۱.
- [۱۷] M. Miskovic, M. Mirosevic and Z. Miljkovic, "Analysis of Synchronous Generator Stability in Case of Searate and Self-Excitation System," *14th International Power Electronic and Motion Control Conference*, ۲۰۱۰.
- [۱۸] "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," IEEE Standard ۴۲۱,۵, ۲۰۰۵.
- [۱۹] "IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamics Performance of Excitation Control Systems," *IEEE Standard ۴۲۱,۲-۲۰۰۵*.
- [۲۰] X. C. Zhang, G. H. Cheng and Z. Xu, "User Defined Excitation System Models for Power System Stability Analysis in PSPA," in *Transmission and Distribution Conference*, Dalian, ۲۰۰۵.
- [۲۱] J. Salinas and J. R. Pacheco, "Modeling Techniques and Tuning in Excitation Systems for Dynamic Representation," in *8th WSEAS International Conference on circuits, systems electronics, control & signal processing*, Cairo, ۲۰۰۷.
- [۲۲] پ. کندور، پایداری و کنترل سیستم های قدرت، د. ح. سیفی و د. ع. خاکی صدیق،
تدوین کنندگان، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۶.
- [۳۲] د. م. کراری، دینامیک و کنترل سیستم های قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۱.
- [۲۴] B. Pal and B. Chaudhuri, *Robust Control in Power Systems*, Springer, ۲۰۰۵.

- [25] H. S. Ko, K. Y. Lee and H. C. Kim, "An intelligent based LQR controller design to power system stabilization," *Electric Power Systems Research*, 2004.
- [26] A. M.D.Ferreira, J. A.L.Barreiros, W. B. Jr and J. R. Brito-de-souza, "A Robust Adaptive LQG/LTR TCSC Controller Applied to Damp Power System Oscillations," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 8, 2007.
- [27] M. A. Furini, A. L. S.Pereira and P. B. Araujo, "Pole placement by coordinated tuning of Power System Stabilizers and FACTS-POD stabilizers," *ELSEVIER,Electrical Power and Energy System*, 2011.
- [28] K. Gowrishankar and M. D. Masud Khan, "MATLAB Simulink Model of Fuzzy Logic Controller with PSS and Performance Analysis," *IEEE-Internatioal Conference On Advances In Engineering,Science and Managment(ICAESM)*, 2012.
- [29] W. Liu, G. K. Venayagamoorthy and D. C. Wunsch, "Design of An Adaptive Neural Network Based Power System Stabilizer," *elsevier*, 2003.
- [30] S. Wei and X. Zhang, "Excitation System Parameter Setting for Power System Planning," *power engineering society*, vol. 1, 2002.

Abstract

In this thesis, an Optimized approach in the design of robust control system is taken considering uncertainties. Robust control problem will become to sub-optimal control problem. Since we consider the system as a LTI system, issue of optimal control is the same as LQR system. The goal of this method is to ensure, the stability and performance of closed-loop system with all uncertainty. After identifying the most effective controller parameters of the power systems, optimal robust control is designed. After that this system was tested separately on the system controllers.

Keyword:

Voltage control system, Power system stabilizer , frequency control system , robust control.



University of Shahrood

Faculty of Electrical Engineering

**Controller Design using Robust pole placement
for Voltage and Frequency Control System of a Power
Plant Considering Power System Stabilizers**

Farid Yazdani

Supervisor:

Dr. Alireza Alfi

November 2015