

به نام خدا



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه مهندسی برق قدرت

تنظیم و موقعیت یابی پایدار ساز سیستم با در نظر گرفتن تأثیرات مدل و پارامترهای سیستم تحریک

نگارش:

میثم رحمتیان

استاد راهنما:

دکتر محسن اصیلی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت

شهریور ماه ۱۳۹۱



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

شماره: ۱۰۹۷/ت.ب

تاریخ: ۹۱/۰۶/۲

ویرایش: -----

بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :

میشم رحمتیان رشته: برق گرایش: قدرت

تحت عنوان: تنظیم و موقعیت یابی پایدار ساز میسم قدرت با در نظر گرفتن تأثیرات مول و پارامترهای سیستم تحریک که در تاریخ ۹۱/۰۶/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: بسیار خوب) امتیاز: ۱۸/۵۱۵ ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر احمدی	استاد	
۲- استاد مشاور	—	—	—
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مهندس محسنی	—	
۴- استاد ممتحن	دکتر باقری	استاد	
۵- استاد ممتحن	دکتر علی زاده	استاد	

رئیس دانشکده:

تعهد نامه

اینجانب مهندس رحمتیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - قدرت دانشکده مهندسی برق و

رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

کنترل و مدلسازی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت با موضوع کنترل و مدلسازی سیستم دینامیک

تحت راهنمایی آقای دکتر محسن اصی متعهد می شوم :

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

تاریخ: ۹۱،۲،۲۷

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

تقديم به پيشگاه

پدر و مادر عزيزم

و برادر مهربانم

تقدیر و تشکر:

پس از حمد و سپاس خداوند مهربان که بی لطفش هیچ میسر نیست، بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استاد ارجمند آقای دکتر محسن اصیلی که راهنما و مشوق اینجانب در انجام این پروژه بوده‌اند سپاسگزاری نمایم.

همچنین لازم است از زحمات و تلاش‌های آقایان دکتر رجبی، مهندس مرتضوی، مهندس یزدان پناه و تمامی کارشناسان گروه تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان که در این پروژه و بخصوص در مرحله گردآوری اطلاعات آن، یاریگر اینجانب بوده‌اند تشکر و قدردانی کنم. نیز از اعضای محترم هیئت داوری آقایان دکتر مهدی بانزاد و دکتر حسین قلی زاده به خاطر حضور در جلسه دفاعیه و رفع اشکالات این پایان‌نامه، و از دوست خوبم آقای مهندس لمعی به خاطر الطافشان تشکر و سپاسگزاری می‌کنم.

چکیده:

پایدار ساز سیستم قدرت (PSS) به عنوان یک سیستم کنترلی برای بهبود میرایی نوسانات فرکانس پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از آن زمانی موثر خواهد بود که از پارامترهای مناسب برای تنظیم آن استفاده شود. بر اساس مطالعات صورت گرفته، روش غالب برای تنظیم پایدار ساز، متد جبران سازی فاز می‌باشد. فاز جبران سازی که زاویه‌ای پس فاز است، بر مبنای اطلاعات شبکه، ژنراتور و سیستم تحریک و در فرکانس معین مد نوسانی بدست خواهد آمد. عدم قطعیت در اطلاعات هر یک از موارد ذکر شده‌ی بالا منجر به محاسبه‌ی نادرست زاویه‌ی جبران سازی می‌شود که نتیجه‌ی آن اثر گذاری بر روی کارآمدی PSS خواهد بود. با فرض در دسترس بودن اطلاعات مربوط به شبکه و ژنراتور، در شبکه‌های بزرگ و پیچیده عدم قطعیت برای اطلاعات مدل و پارامترهای سیستم تحریک نمی‌تواند اجتناب پذیر باشد. از طرفی انجام مطالعات برای شناسایی دقیق مدل و پارامترهای سیستم تحریک به منظور رفع این عدم قطعیت زمان بر و پرهزینه می‌باشد. بنابراین نیازمند انجام مطالعاتی برای تعیین اثرگذاری این عدم قطعیت بر روی تنظیم PSS خواهیم بود. در این حالت عدم قطعیت مزبور به طور مستقیم بر روی تنظیم PSS تأثیر خواهد گذاشت.

از طرفی دیگر، زاویه‌ی جبران سازی در فرکانس مشخصی بدست خواهد آمد. از آن جا که سیستم‌های تحریک یکی از عوامل موثر بر پایداری سیگنال کوچک هستند، می‌توانند در نتایج آنالیزهای پایداری مانند آنالیز مقادیر ویژه تأثیر گذار باشند. بنابراین اگر عدم قطعیت مذکور بتواند فرکانس مد الکترومکانیکی را تغییر دهد، ممکن است مقدار زاویه‌ی جبران سازی و در نتیجه تنظیم PSS نیز از آن تأثیر بپذیرند. بنابراین باید از میزان اثر گذاری مدل‌ها و پارامترهای مختلف سیستم تحریک بر روی مد الکترومکانیکی مطلع باشیم.

بر این اساس نتایج پایان‌نامه در دو فصل مربوط به اثر گذاری مدل‌ها و پارامترهای مختلف تحریک بر روی مد الکترومکانیکی و شیفت فاز جبران سازی ارائه شده است.

Abstract :

Power system stabilizer (PSS) is used as a control system for improving low frequency oscillation damping. Its use will be effective when it is designed by an appropriate parameters. According to studies, the phase compensation method is generally used for designing power system stabilizers. In this method, the phase angle compensation is obtained based on network, generator and excitation system data. Uncertainty in each of these cases lead to incorrect calculation of the compensation angle and so influence on the design Procedure and will create a significant error in results. Although the data of the network and generators are available in large and complex networks, Uncertainty in model parameters and excitation system is inevitable. Studies to identify the exact model and system parameters in order to eliminate the uncertainty would be time consuming and expensive. In this thesis the effect of this uncertainty on efficiency of power system stabilizer design has been studied. In this case, the uncertainty will effect directly on PSS tuning.

On the other hand, the angle compensation will be obtained at a certain mode frequency. Since the excitation system is one of the factors that affect the small signal stability, can be affected on the results of the eigenvalue analysis stability. So if the uncertainty can change the frequency electromechanical mode, may result in the compensation angle and setting of PSS also take effect. Therefore we have to be informed the effect of excitation system models and parameters on the electromechanical mode.

The results of the thesis are provided in two chapters: the influence of different exciter models and parameters on electromechanical mode and phase shift compensation.

فهرست مطالب

فصل ۱.....	۱
۱ دیباچه.....	۱
۱-۱ پیش زمینه.....	۱
۲-۱ پیکربندی پایان نامه.....	۶
۳-۱ پایدار ساز سیستم قدرت.....	۷
۱-۳-۱ سیگنال ورودی پایدار ساز سیستم قدرت.....	۸
۲-۳-۱ مکان نصب پایدار ساز سیستم قدرت.....	۱۰
۱-۲-۳-۱ مروری بر روش‌های ارائه شده برای موقعیت‌یابی PSS.....	۱۱
۳-۳-۱ تنظیم پایدار ساز سیستم قدرت.....	۱۴
۴-۱ سیستم‌های تحریک.....	۱۷
فصل ۲.....	۲۲
۲ بررسی مدل‌های استاندارد سیستم‌های تحریک.....	۲۲
۱-۲ مقدمه.....	۲۲
۲-۲ مدل‌های سیستم تحریک به منظور انجام مطالعات پایداری سیستم قدرت.....	۲۲
۳-۲ نمایش سیستم‌های تحریک ماشین سنکرون در مطالعات سیستم قدرت.....	۲۳
۱-۳-۲ مبدل ولتاژ پایانه و جبران‌کننده بار.....	۲۴
۲-۳-۲ تنظیم کننده ولتاژ.....	۲۵
۳-۳-۲ پایدار ساز سیستم قدرت.....	۲۶
۴-۳-۲ مدارهای محدودکننده و حفاظتی.....	۲۶
۴-۲ انواع سیستم‌های تحریک.....	۲۷
۱-۴-۲ تحریک‌کننده جریان مستقیم- نوع dc	۲۷
۱-۱-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع $DC1A$	۲۷
۲-۱-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع $DC2A$	۲۹
۳-۱-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع $DC3A$	۳۰
۴-۱-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع $DC4B$	۳۱
۲-۴-۲ سیستم‌های تحریک به همراه یکسو ساز و تغذیه شده از منبع جریان متناوب- نوع AC	۳۲
۱-۲-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع $AC1A$	۳۳

۲-۲-۴-۲	مدل سیستم تحریک نوع AC2A	۳۴
۳-۲-۴-۲	مدل سیستم تحریک نوع AC3A	۳۵
۴-۲-۴-۲	مدل سیستم تحریک نوع AC4A	۳۷
۵-۲-۴-۲	مدل سیستم تحریک نوع AC5A	۳۷
۶-۲-۴-۲	مدل سیستم تحریک متناوب نوع AC6A	۳۸
۷-۲-۴-۲	مدل سیستم تحریک متناوب نوع AC8B	۳۹
۳-۴-۲	سیستم‌های تحریک استاتیک- نوع ST	۴۰
۱-۳-۴-۲	مدل سیستم تحریک استاتیک نوع ST1A	۴۱
۲-۳-۴-۲	مدل سیستم تحریک استاتیک نوع ST2A	۴۳
۳-۳-۴-۲	مدل سیستم تحریک استاتیک نوع ST3A	۴۴
۴-۳-۴-۲	مدل سیستم تحریک استاتیک نوع ST4A	۴۵
فصل ۳		۴۶
۳ پایدار سازهای سیستم‌های قدرت		۴۶
۱-۳ مقدمه		۴۶
۲-۳ نمایش ساختار پایدار سازهای سیستم قدرت		۴۷
۳-۳ انواع سیستم‌های پایدار ساز قدرت		۴۸
۱-۳-۳ مدل پایدار ساز سیستم قدرت نوع PSS1A		۴۸
۲-۳-۳ مدل پایدار ساز سیستم قدرت نوع PSS2B		۴۹
۳-۳-۳ مدل پایدار ساز سیستم قدرت نوع PSS3B		۵۰
۴-۳-۳ مدل پایدار ساز سیستم قدرت نوع PSS4B		۵۱
۴-۳ اصول عملکرد بهینه پایدار ساز سیستم قدرت		۵۳
۱-۴-۳ موقعیت‌یابی پایدار ساز سیستم قدرت		۵۳
۲-۴-۳ تنظیم پایدار ساز سیستم قدرت		۵۵
فصل ۴		۶۰
۴ بررسی اثر عدم قطعیت در اطلاعات سیستم‌های تحریک بر روی مد الکترومکانیکی		۶۰
۱-۴ مقدمه		۶۰
۲-۴ اثر گذاری عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک بر روی مدهای الکترومکانیکی		۶۱
۱-۲-۴ شبکه تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت		۶۲
۱-۱-۲-۴ مدل سیستم تحریک استاندارد IEEE1		۶۴

۶۸	مدل سیستم تحریک AC1A	۲-۱-۲-۴
۷۰	مدل سیستم تحریک DC1A	۳-۱-۲-۴
۷۳	مدل سیستم تحریک ST1A	۴-۱-۲-۴
۷۵	نتایج مطالعات در شبکه تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت	۵-۱-۲-۴
۷۸	شبکه‌ی نمونه ۲ ناحیه‌ای ۴ ماشین	۲-۲-۴
۷۹	تأثیر مدل‌های مختلف سیستم تحریک بر روی مد بین ناحیه‌ای شبکه‌ی ۴ ماشین	۱-۲-۲-۴
۸۰	تأثیر پارامترهای مختلف سیستم تحریک بر روی مد بین ناحیه‌ای شبکه‌ی ۴ ماشین	۲-۲-۲-۴
۸۵	نتایج مطالعات در شبکه دو ناحیه‌ای ۴ ماشین	۳-۲-۲-۴
۸۶	فصل ۵	
۸۶	۵ بررسی اثر عدم قطعیت در اطلاعات سیستم‌های تحریک بر شیف‌ت فاز جبران‌سازی	
۸۶	۱-۵ مقدمه	
۸۷	۲-۵ سیستم‌های تحریک متناوب	
۸۷	۱-۲-۵ بررسی تأثیر پارامترها بر روی شیف‌ت فاز مدل‌های سیستم تحریک متناوب	
۸۷	سیستم تحریک مدل AC1A	۱-۱-۲-۵
۹۰	سیستم تحریک مدل AC2A	۲-۱-۲-۵
۹۲	سیستم تحریک مدل AC3A	۳-۱-۲-۵
۹۴	سیستم تحریک مدل AC4A	۴-۱-۲-۵
۹۵	سیستم تحریک مدل AC5A	۵-۱-۲-۵
۹۶	سیستم تحریک مدل AC6A	۶-۱-۲-۵
۹۸	سیستم تحریک مدل AC8B	۷-۱-۲-۵
۱۰۰	نتایج بررسی تأثیر عدم قطعیت در پارامترهای تحریک متناوب بر روی شیف‌ت فازی	۲-۲-۵
۱۰۰	امکان سنجی تنظیم PSS در شرایط عدم قطعیت مدل سیستم تحریک متناوب	۳-۲-۵
۱۰۲	بررسی طراحی روبااست PSS	۴-۲-۵
۱۰۲	مقایسه تشابه طراحی PSS در مدل‌های تحریک متناوب	۱-۴-۲-۵
۱۰۶	سیستم تحریک متناوب مدل AC1A	۲-۴-۲-۵
۱۰۷	سیستم تحریک متناوب مدل AC2A	۳-۴-۲-۵
۱۰۸	سیستم تحریک متناوب مدل AC4A	۴-۴-۲-۵
۱۰۹	سیستم تحریک متناوب مدل AC8B	۵-۴-۲-۵
۱۰۹	سیستم تحریک متناوب مدل AC5A	۶-۴-۲-۵

سیستم تحریک متناوب مدل AC6A.....	۷-۴-۲-۵	۱۱۰
سیستم تحریک متناوب مدل AC3A.....	۸-۴-۲-۵	۱۱۰
نتایج بررسی تأثیر عدم قطعیت در مدل‌های تحریک متناوب بر روی شیف‌ت فازی.....	۵-۲-۵	۱۱۱
سیستم‌های تحریک استاتیک.....	۳-۵	۱۱۲
بررسی تأثیر پارامترها بر روی شیف‌ت فاز مدل‌های سیستم تحریک استاتیک.....	۱-۳-۵	۱۱۲
سیستم تحریک مدل ST1A.....	۱-۱-۳-۵	۱۱۲
سیستم تحریک مدل ST2A.....	۲-۱-۳-۵	۱۱۳
سیستم تحریک مدل ST3A.....	۳-۱-۳-۵	۱۱۵
سیستم تحریک مدل ST4B.....	۴-۱-۳-۵	۱۱۶
نتایج بررسی تأثیر عدم قطعیت در پارامترهای تحریک استاتیک بر روی شیف‌ت فاز.....	۲-۳-۵	۱۱۸
امکان‌سنجی تنظیم PSS در شرایط عدم قطعیت در مدل تحریک استاتیک.....	۳-۳-۵	۱۱۸
بررسی طراحی روبا‌ست PSS برای سیستم تحریک استاتیک.....	۴-۳-۵	۱۱۹
مقایسه تشابه طراحی PSS در مدل‌های تحریک استاتیک.....	۱-۴-۳-۵	۱۱۹
سیستم تحریک استاتیک مدل ST1A.....	۲-۴-۳-۵	۱۲۱
سیستم تحریک استاتیک مدل ST2A.....	۳-۴-۳-۵	۱۲۳
سیستم تحریک استاتیک مدل ST3A.....	۴-۴-۳-۵	۱۲۳
سیستم تحریک استاتیک مدل ST4B.....	۵-۴-۳-۵	۱۲۴
نتایج بررسی تأثیر عدم قطعیت در مدل‌های تحریک استاتیک بر روی شیف‌ت فازی.....	۵-۳-۵	۱۲۵
فصل ۶.....		۱۳۸
نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....		۱۲۶
پیوست ۱.....		۱۲۹
پارامترها و مشخصات شبکه‌های تست.....		۱۲۹
الف. شبکه‌ی تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت.....		۱۲۹
ب. شبکه‌ی نمونه دو ناحیه‌ای ۴ ماشین.....		۱۲۹
مراجع.....		۱۳۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ : تغییرات زاویه روتور در اثر تغییرات گشتاور الکتریکی. ۲
- شکل ۲-۱ شاخه بندی پایداری سیستم قدرت. ۳
- شکل ۳-۱ : نمودار بلوکی پایدار ساز سیستم قدرت با ورودی سرعت- توان. ۱۰
- شکل ۴-۱ : دیاگرام سیستم تک ماشین و باس بی نهایت به همراه بلوک‌های اکسایتر و تنظیم کننده‌ی اتوماتیک ولتاژ. ۱۸
- شکل ۱-۲ : آرایش ارتباط و ترتیب مؤلفه‌های تحریک. ۲۳
- شکل ۲-۲ : بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحریک ماشین سنکرون. ۲۴
- شکل ۳-۲ : بلوک دیاگرام مبدل ولتاژ پایانه به همراه جبران ساز بار. ۲۵
- شکل ۴-۲ : تحریک کننده با کموتاتور DC- نوع DC1A ۲۸
- شکل ۵-۲ : تحریک کننده با کموتاتور DC- نوع DC2A با تغذیه تنظیم کننده ولتاژ از باس. ۲۹
- شکل ۶-۲ : تحریک کننده با کموتاتور DC- نوع DC3A ۳۱
- شکل ۷-۲ : تحریک کننده با کموتاتور DC- نوع DC4B ۳۲
- شکل ۸-۲ : اثر یکسو ساز کنترل نشده‌ی سه فاز بر خروجی تحریک کننده. ۳۳
- شکل ۹-۲ : سیستم تحریک به همراه یکسو ساز و منبع جریان متناوب با فیدبک از جریان میدان تحریک کننده- نوع AC1A ۳۴
- شکل ۱۰-۲ : سیستم تحریک با پاسخ اولیه سریع به همراه یکسو ساز کنترل نشده و منبع جریان متناوب با فیدبک از جریان میدان - نوع AC2A ۳۵
- شکل ۱۱-۲ : تحریک کننده با یکسو ساز و منبع جریان متناوب به همراه محدود کننده جریان میدان- نوع AC3A ۳۶
- شکل ۱۲-۲ : تحریک کننده با منبع تغذیه‌ی متناوب به همراه یکسو ساز قابل کنترل- مدل AC4A ۳۷
- شکل ۱۳-۲ : نمایش ساده شده سیستم تحریک با یکسو ساز دوار- نوع AC5A ۳۸
- شکل ۱۴-۲ : نمایش ساده شده سیستم تحریک با یکسو ساز دوار- نوع AC6A ۳۸
- شکل ۱۵-۲ : سیستم تحریک متناوب به همراه یکسو ساز- نوع AC8A ۳۹
- شکل ۱۶-۲ : یکسو ساز تمام پل کنترل شده سه فاز. ۴۱
- شکل ۱۷-۲ : تحریک کننده با یکسو ساز قابل کنترل و منبع پتانسیل نوع ST1A ۴۲
- شکل ۱۸-۲ : تحریک کننده با یکسو ساز و به همراه منبع کمپوند نوع ST2A ۴۳
- شکل ۱۹-۲ : تحریک کننده با یکسو ساز قابل کنترل و منبع کمپوند به همراه حلقه کنترل ولتاژ میدان - مدل ST3A ۴۴
- شکل ۲۰-۲ : تحریک کننده با یکسو ساز قابل کنترل و به همراه منبع کمپوند یا منبع پتانسیل - مدل ST4A ۴۵

شکل ۳-۱ :	حلقه کنترلی اضافی (PSS) برای سیستم تنظیم کننده ولتاژ.....	۴۷
شکل ۳-۲ :	مؤلفه‌های اصلی یک PSS.....	۴۷
شکل ۳-۳ :	PSS با یک ورودی - مدل PSS1A.....	۴۹
شکل ۳-۴ :	PSS با دو ورودی - مدل PSS2B.....	۴۹
شکل ۳-۵ :	PSS با دو ورودی - مدل PSS3B.....	۵۱
شکل ۳-۶ :	PSS مدل PSS4B.....	۵۲
شکل ۳-۷ :	ترانسدیوسر های انحراف سرعت PSS.....	۵۳
شکل ۳-۸ :	مدل تک ماشین و باس بی‌نهایت هفرون-فیلیپس.....	۵۶
شکل ۳-۹ :	دیاگرام بد برای تابع تبدیل پیش فاز- پس فاز.....	۵۷
شکل ۴-۱ :	شماتیک تک خطی سیستم تک ماشین و باس بی‌نهایت.....	۶۲
شکل ۴-۲ :	دیاگرام تک خطی مدل سیستم تحریک IEEE1.....	۶۴
شکل ۴-۳ :	اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک IEEE1 بر روی مد الکترومکانیکی.....	۶۷
شکل ۴-۴ :	اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک AC1A بر روی مد الکترومکانیکی.....	۶۹
شکل ۴-۵ :	اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک DC1A بر روی مد الکترومکانیکی.....	۷۲
شکل ۴-۶ :	اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک ST1A بر روی مد الکترومکانیکی.....	۷۴
شکل ۴-۷ :	نرخ تغییرات مد شبکه تک ماشین برای مدل‌های مختلف تحریک.....	۷۶
شکل ۴-۸ :	مدل شبکه‌ی نمونه دو ناحیه‌ای ۴ ماشین.....	۷۸
شکل ۴-۹ :	نرخ تغییرات مد شبکه ۴ ماشین برای مدل‌های مختلف تحریک.....	۸۰
شکل ۴-۱۰ :	اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک IEEE1 بر روی مد بین ناحیه‌ای.....	۸۱
شکل ۴-۱۱ :	اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک AC1A بر روی مد بین ناحیه‌ای.....	۸۲
شکل ۴-۱۲ :	اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک DC1A بر روی مد بین ناحیه‌ای.....	۸۳
شکل ۴-۱۳ :	اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک ST1A بر روی مد بین ناحیه‌ای.....	۸۴
شکل ۵-۱ :	منحنی مکان هندسی شیف‌ت فاز سیستم‌های تحریک متناوب.....	۱۰۱
شکل ۵-۲ :	منحنی مکان هندسی شیف‌ت فاز سیستم‌های تحریک AC1A, AC2A, AC4A, AC8B.....	۱۰۴
شکل ۵-۳ :	منحنی مکان هندسی شیف‌ت فاز سیستم‌های تحریک AC3A, AC5A, AC6A.....	۱۰۴
شکل ۵-۴ :	منحنی مکان هندسی شیف‌ت فاز سیستم‌های تحریک استاتیک.....	۱۱۹

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۴ : مقادیر ویژه شبکه تک ماشین بدون سیستم تحریک	۶۳
جدول ۲-۴ : آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی برای سیستم بدون تحریک	۶۳
جدول ۳-۴ : مقادیر نوعی پارامترهای مدل سیستم تحریک <i>IEEE1</i>	۶۵
جدول ۴-۴ : مد الکترومکانیکی شبکه تک ماشین با سیستم تحریک <i>IEEE1</i>	۶۵
جدول ۵-۴ : آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی با سیستم تحریک <i>IEEE1</i> . $M=8.1s$	۶۵
جدول ۶-۴ : تغییرات مد الکترومکانیکی بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک <i>IEEE1</i>	۶۷
جدول ۷-۴ : مقادیر نوعی مدل سیستم تحریک <i>AC1A</i>	۶۸
جدول ۸-۴ : مد الکترومکانیکی شبکه تک ماشین با سیستم تحریک <i>AC1A</i>	۶۸
جدول ۹-۴ : آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی با سیستم تحریک <i>AC1A</i> . $M=8.1s$	۶۹
جدول ۱۰-۴ : تغییرات مد الکترومکانیکی بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک <i>AC1A</i>	۷۰
جدول ۱۱-۴ : مقادیر نوعی مدل سیستم تحریک <i>DC1A</i>	۷۰
جدول ۱۲-۴ : مد الکترومکانیکی شبکه تک ماشین با سیستم تحریک <i>DC1A</i>	۷۱
جدول ۱۳-۴ : آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی با سیستم تحریک <i>DC1A</i> . $M=8.1s$	۷۱
جدول ۱۴-۴ : تغییرات مد الکترومکانیکی بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک <i>DC1A</i>	۷۲
جدول ۱۵-۴ : مقادیر نوعی مدل سیستم تحریک <i>ST1A</i>	۷۳
جدول ۱۶-۴ : مد الکترومکانیکی شبکه تک ماشین با سیستم تحریک <i>ST1A</i>	۷۳
جدول ۱۷-۴ : آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی با سیستم تحریک <i>ST1A</i> . $M=8.1s$	۷۴
جدول ۱۸-۴ : تغییرات مد الکترومکانیکی بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک <i>ST1A</i>	۷۵
جدول ۱۹-۴ : نتایج تأثیر تغییرات مدل تحریک بر مد الکترومکانیکی شبکه‌ی تک ماشین	۷۶
جدول ۲۰-۴ : نتایج تأثیر تغییرات مدل‌های تحریک بر مد الکترومکانیکی سیستم ۴ ماشینه	۷۹
جدول ۲۱-۴ : تغییرات مد بین ناحیه‌ای بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک <i>IEEE1</i>	۸۱
جدول ۲۲-۴ : تغییرات بین ناحیه‌ای بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک <i>AC1A</i>	۸۲

جدول ۴-۲۳ : تغییرات مد بین ناحیه‌ای بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک <i>DC1A</i>	۸۳
جدول ۴-۲۴ : تغییرات مد بین ناحیه‌ای بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک <i>ST1A</i>	۸۴
جدول ۵-۱ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل <i>AC1A</i>	۸۹
جدول ۵-۲ : مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل <i>AC1A</i> در فرکانس ۰/۲۷ هرتز.....	۹۰
جدول ۵-۳ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل <i>AC1A</i>	۹۰
جدول ۵-۴ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل <i>AC2A</i> و تغییرات اعمال شده.....	۹۱
جدول ۵-۵ : مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل <i>AC2A</i> در فرکانس ۰/۲۷ هرتز.....	۹۱
جدول ۵-۶ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل <i>AC2A</i>	۹۲
جدول ۵-۷ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل <i>AC3A</i> و تغییرات اعمال شده.....	۹۲
جدول ۵-۸ : مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل <i>AC3A</i> در فرکانس ۰/۲۷ هرتز.....	۹۳
جدول ۵-۹ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل <i>AC3A</i>	۹۳
جدول ۵-۱۰ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل <i>AC4A</i> و تغییرات اعمال شده.....	۹۴
جدول ۵-۱۱ : مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل <i>AC4A</i> در فرکانس ۰/۲۷ هرتز.....	۹۴
جدول ۵-۱۲ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل <i>AC4A</i>	۹۴
جدول ۵-۱۳ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل <i>AC5A</i> و تغییرات اعمال شده.....	۹۵
جدول ۵-۱۴ : مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل <i>AC5A</i> در فرکانس ۰/۲۷ هرتز.....	۹۶
جدول ۵-۱۵ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل <i>AC5A</i>	۹۶
جدول ۵-۱۶ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل <i>AC6A</i> و تغییرات اعمال شده.....	۹۷
جدول ۵-۱۷ : مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل <i>AC6A</i> در فرکانس ۰/۲۷ هرتز.....	۹۷
جدول ۵-۱۸ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل <i>AC6A</i>	۹۸
جدول ۵-۱۹ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل <i>AC8A</i> و تغییرات اعمال شده.....	۹۸
جدول ۵-۲۰ : مقادیر شیف‌ت فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل <i>AC8B</i> در فرکانس ۰/۲۷ هرتز.....	۹۹
جدول ۵-۲۱ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل <i>AC8B</i>	۹۹

- جدول ۵-۲۲: شیف‌ت فازی مدل‌های مختلف تحریک متناوب در ۴ مقدار فرکانسی ۱۰۳
- جدول ۵-۲۳: نرخ تغییرات اندازه‌ی تابع پایدارساز در ۴ مقدار فرکانسی ۱۰۵
- جدول ۵-۲۴: گروه‌بندی مدل‌های تحریک متناوب از لحاظ تشابه در تنظیم ۱۰۵
- جدول ۵-۲۵: آنالیز مدال شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک AC1A ۱۰۶
- جدول ۵-۲۶: مقادیر تنظیمی پارامترهای پایدارساز برای تمام مدل‌های سیستم تحریک متناوب ۱۰۷
- جدول ۵-۲۷: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک AC1A با PSS ۱۰۷
- جدول ۵-۲۸: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک AC2A قبل و بعد از اعمال PSS ۱۰۸
- جدول ۵-۲۹: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک AC4A قبل و بعد از اعمال PSS ۱۰۸
- جدول ۵-۳۰: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک AC8A قبل و بعد از اعمال PSS ۱۰۹
- جدول ۵-۳۱: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک AC5A قبل و بعد از اعمال PSS ۱۰۹
- جدول ۵-۳۲: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک AC6A قبل و بعد از اعمال PSS ۱۱۰
- جدول ۵-۳۳: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک AC3A قبل و بعد از اعمال PSS ۱۱۱
- جدول ۵-۳۴: مقادیر پارامترهای موثر در مدل ST1A و تغییرات اعمال شده ۱۱۲
- جدول ۵-۳۵: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل ST1A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز ۱۱۳
- جدول ۵-۳۶: مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل ST1A ۱۱۳
- جدول ۵-۳۷: مقادیر پارامترهای موثر در مدل ST2A و تغییرات اعمال شده ۱۱۴
- جدول ۵-۳۸: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل ST2A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز ۱۱۴
- جدول ۵-۳۹: مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل ST2A ۱۱۵
- جدول ۵-۴۰: مقادیر پارامترهای موثر در مدل ST3A و تغییرات اعمال شده ۱۱۵
- جدول ۵-۴۱: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل ST3A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز ۱۱۶
- جدول ۵-۴۲: مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل ST3A ۱۱۶
- جدول ۵-۴۳: مقادیر پارامترهای موثر در مدل ST4B و تغییرات اعمال شده ۱۱۷
- جدول ۵-۴۴: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل ST4B در فرکانس ۰/۲۷ هرتز ۱۱۷

- جدول ۴۵-۵ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل *ST4B* ۱۱۷
- جدول ۴۶-۵ : شیف‌ت فازی مدل‌های تحریک استاتیک در ۴ مقدار فرکانسی ۱۲۰
- جدول ۴۷-۵ : گروه‌بندی مدل‌های تحریک استاتیک از لحاظ تشابه در تنظیم ۱۲۰
- جدول ۴۸-۵ : نرخ تغییرات اندازه‌ی تابع تبدیل پایدارساز در ۴ مقدار فرکانسی ۱۲۱
- جدول ۴۹-۵ : مقادیر تنظیم پایدارساز برای تمام مدل‌های سیستم تحریک استاتیک ۱۲۱
- جدول ۵۰-۵ : آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک *ST1A* قبل و بعد از اعمال PSS ۱۲۲
- جدول ۵۱-۵ : آنالیز ضرایب مشارکت مد بین‌ناحیه‌ای با سیستم تحریک *ST1A* ۱۲۲
- جدول ۵۲-۵ : آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک *ST2A* قبل و بعد از اعمال PSS ۱۲۳
- جدول ۵۳-۵ : آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک *ST3A* قبل و بعد از اعمال PSS ۱۲۴
- جدول ۵۴-۵ : آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک *ST4B* قبل و بعد از اعمال PSS ۱۲۴

فصل ۱

دیباچه

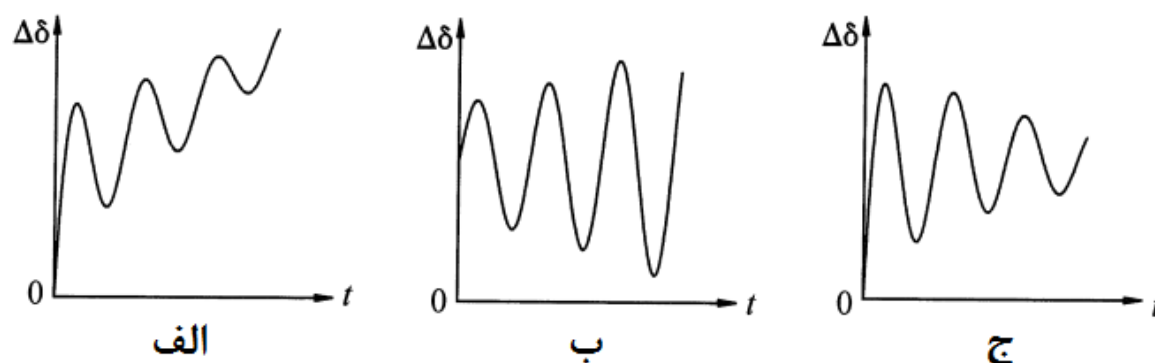
۱-۱ پیش زمینه

سیستم قدرت یکی از بزرگ‌ترین سیستم‌های دینامیکی و فیزیکی ساخت بشر می‌باشد. افزایش درخواست انرژی سبب گسترش روزافزون این سیستم‌ها شده است. این گسترده‌گی و پیچیدگی، در چند سال اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به جستجو و بررسی روش‌های بهبود و افزایش کرانه پایداری شبکه‌های قدرت واداشته است. پایداری یک شبکه قدرت را به صورت توانایی آن در حفظ یک نقطه کار پایدار در حالت کار دائمی و یا بازگشت به یک نقطه کار پایدار بعد از بروز یک اغتشاش تعریف می‌کنند. سیستم قدرت به سبب ماهیت غیر خطی و دینامیکی خود دائماً تحت تأثیر عواملی است که موجب خارج شدن آن از نقطه‌ی کار پایدار می‌شود. بنابراین اساسی‌ترین مسئله در بهره برداری موثر از سیستم‌های قدرت حفظ و بهبود پایداری آن‌ها است. می‌توان گفت مهم‌ترین عناصر در سیستم قدرت، ژنراتورها می‌باشند. بدین ترتیب ساده‌ترین شکل پایداری در یک شبکه‌ی قدرت به عملکرد پایدار یک ژنراتور سنکرون مربوط می‌شود. این نوع پایداری توسط عواملی همچون محدودیت‌های سیم بندی استاتور و روتور، ماکزیمم توان خروجی ماشین و محدودیت‌های پایداری ماشین محدود می‌شود [۱].

در حالت پایدار مابین گشتاور مکانیکی ورودی ژنراتور سنکرون و گشتاور الکتریکی خروجی آن تعادل خوبی برقرار است. بروز عدم تعادل مابین این گشتاورها، به دلیل بروز اغتشاش در سیستم، سبب افزایش یا کاهش

در سرعت محور ژنراتور می‌شود. اگر این حالت برای ژنراتوری اتفاق بیافتد، اختلاف سرعت مابین آن و ژنراتور دیگر سبب اختلاف زاویه بین آن‌ها می‌شود. این اختلاف زاویه سبب می‌شود تا بخشی از توان ماشین کندتر به ماشین تندتر منتقل شود. بنابراین نوسانات موجود در زاویه‌ی روتور سبب بروز نوسان در توان خروجی ژنراتور می‌شود. در صورت نبود سیستم کنترلی مناسب، این روند به صورت دائم اتفاق می‌افتد و منجر به ناپایداری سیستم می‌شود.

برای بیان چگونگی اثر گذاری یک اغتشاش بر پایداری سیستم، از تجزیه‌ی تغییرات گشتاور الکتریکی ماشین، حاصل شده از اغتشاش به دو مؤلفه‌ی گشتاورهای سنکرون کننده و میرا کننده استفاده می‌شود. گشتاور سنکرون کننده گشتاوری هم راستا با تغییرات زاویه‌ی روتور و گشتاور میرا کننده، گشتاوری هم راستا با تغییرات سرعت زاویه‌ی روتور می‌باشد و در صفحه‌ی مختلط 90° درجه جلوتر از مؤلفه‌ی سنکرون کننده می‌باشد. کمبود گشتاور سنکرون کننده منجر به ناپایداری غیر نوسانی زاویه‌ی روتور می‌شود (افزایش یکنواخت زاویه‌ی روتور) شکل ۱-۱-الف و از طرف دیگر کمبود گشتاور میراکنندگی منجر به ناپایداری نوسانی می‌شود (افزایش اندازه نوسان توان) شکل ۱-۱-ب. در نتیجه برای حصول پایداری وجود هر دو مؤلفه‌ی گشتاور لازم می‌باشد شکل ۱-۱-ج.

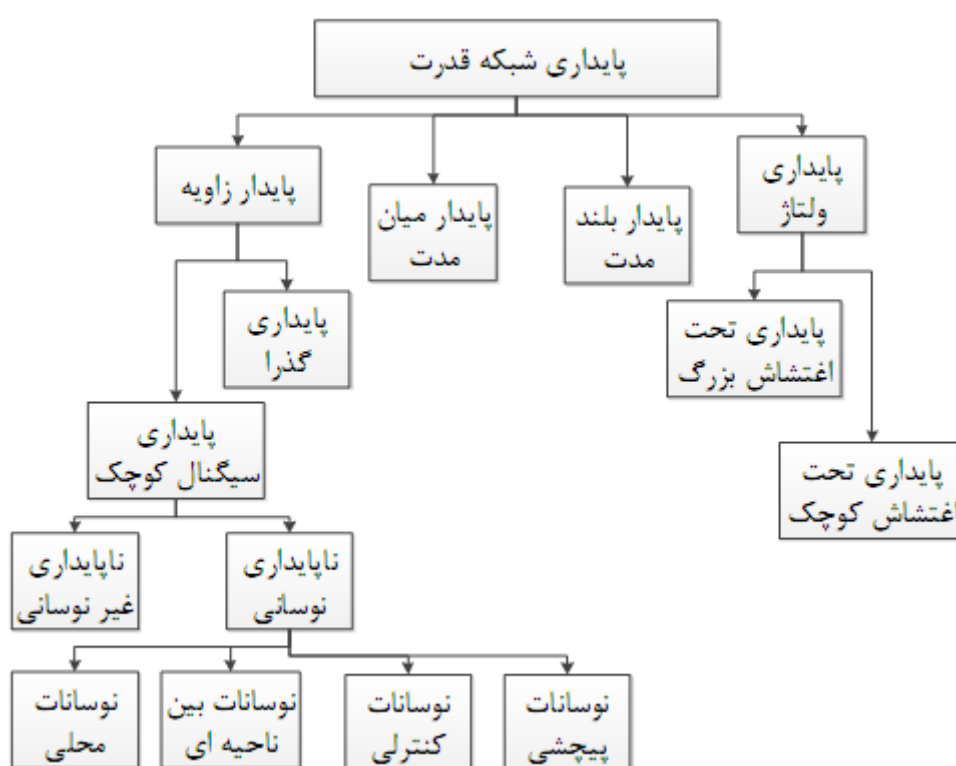


شکل ۱-۱ : تغییرات زاویه روتور در اثر تغییرات گشتاور الکتریکی. الف: گشتاور میراکننده مثبت و گشتاور سنکرون کننده منفی. ب: گشتاور میراکننده منفی و گشتاور سنکرون کننده مثبت. ج: گشتاور میراکننده مثبت و گشتاور سنکرون کننده مثبت [۱].

به منظور بررسی مشکلات پایداری و ارائه روش‌هایی برای بهبود آن، پایداری شبکه‌های قدرت به دو شاخه‌ی وسیع دسته بندی می‌شود (شکل ۱-۲):

الف. پایداری زاویه : توانایی شبکه در حفظ حالت هماهنگ ژنراتورها می‌باشد که نتیجه‌ی آن پایداری در روتور ماشین‌های سنکرون است.

ب. پایداری ولتاژ : توانایی شبکه در حفظ ولتاژهای حالت دائم کار می‌باشد.



شکل ۱-۲ : شاخه بندی پایداری سیستم قدرت [۱]

در این پایان‌نامه با توجه به اهمیت مسائل مطرح شده در حوزه پایداری سیگنال کوچک، توجه ویژه‌ای به بررسی پایداری زاویه شده است.

در حوزه‌ی پایداری زاویه دو شاخه‌ی زیر مطرح می‌باشند:

۱. پایداری گذرا.

۲. پایداری سیگنال کوچک یا فرکانس کوچک.

پایداری گذرا به ثابت زمانی و دامنه سیگنال اغتشاش وابسته است. این اغتشاش به طور معمول به صورت یک خطا در سیستم‌های انتقال تعریف می‌شود. معمولاً توجه بسیاری به بهبود پاسخ کوتاه مدت شبکه‌های قدرت می‌شود. بنابراین شبکه به گونه طراحی می‌شود تا از نظر پایداری گذرا قابل اطمینان باشد. این قابلیت اطمینان با نصب رله‌هایی مانند رله‌های اضافه جریان، رله ریکلوزر و ... مهیا می‌شود.

نوع دیگر پایداری زاویه‌ی روتور، پایداری سیگنال کوچک می‌باشد. این نوع پایداری در اثر بروز اغتشاش‌های کوچک در شبکه مطرح می‌شود. از اغتشاش‌های کوچک موجود در شبکه می‌توان به تغییرات دائمی تولید و مصرف اشاره کرد. این توانایی به عوامل چندی از قبیل نقطه کار اولیه، قدرت سیستم انتقال و نوع سیستم کنترل تحریک بستگی دارد [۱]. همان‌طور که گفته شده ایجاد پایداری به وجود هر دو مؤلفه‌ی گشتاور سنکرون کننده و میرا کننده بستگی دارد. با این حال در سال‌های اخیر، علت اصلی ناپایداری سیگنال کوچک را در سیستم‌های قدرت ناکافی بودن گشتاور میرا کننده می‌دانند و تلاش‌ها در جهت افزایش این مؤلفه گشتاور الکتریکی می‌باشد.

پدیده‌ی ناپایداری سیگنال کوچک سبب بروز نوساناتی می‌شود که می‌توان آن‌ها را در ۴ دسته زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱. نوسانات محلی: بر اثر نوسان یک واحد و یا واحدهای یک نیروگاه نسبت به بقیه سیستم قدرت به وجود می‌آیند. عبارت محلی به دلیل آنکه نوسانات در یک نیروگاه یا بخش کوچکی از سیستم قدرت رخ می‌دهند، به کار می‌رود.

۲. نوسانات بین ناحیه‌ای: بر اثر نوسان چندین ماشین سنکرون در یک ناحیه از سیستم قدرت، در برابر ماشین‌های سنکرون ناحیه‌ی دیگر به وجود می‌آیند. در این نوسانات ژنراتورهای هر ناحیه در فاصله نزدیکی از هم قرار دارند و ناحیه‌ها به وسیله‌ی خطوط ضعیفی به هم مرتبط می‌باشند.

۳. نوسانات مدهای سیستم کنترل: مربوط به کنترل کننده‌های نیروگاه‌ها و سایر کنترل کننده‌ها است. معمولاً در صورتی که سیستم‌های کنترلی نظیر، سیستم‌های تحریک، گاورنرها، کنورترهای HVDC و جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو (SVC) بد تنظیم شده باشند، رخ می‌دهد.

۴. نوسان مدهای پیچشی (نوسانات زیر سنکرون) : مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین - ژنراتور است. این نوسان ممکن است به علت تأثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، گاورنر، کنترل کننده‌های HVDC و خطوط انتقالی که با خازن جبران شده‌اند، اتفاق بیافتد.

با توجه به اهمیت نوسانات ذکر شده، در مطالعات سیگنال کوچک توجه خاصی به نوسانات بین ناحیه‌ای و محلی می‌شود. رنج فرکانسی مربوط به این نوسانات در مراجع مختلف متفاوت می‌باشد. بطوریکه در استاندارد IEEE 421.2 [۲] دامنه فرکانسی برای نوسان‌های محلی بین ۰/۷ هرتز تا ۲ هرتز تعریف شده است و این رنج برای نوسانات بین ناحیه‌ای کمتر از ۰/۵ هرتز می‌باشد. این در حالی است که مرجع [۳] این رنج‌ها را برای نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای به ترتیب حدود ۱ هرتز و کمتر از ۰/۲۵ هرتز تعریف کرده است. در مراجع [۱ و ۳-۴] رنج نوسانات فرکانس پایین بین ۰/۲ هرتز تا ۲ هرتز معرفی شده است. این بازه برای نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای به ترتیب بین ۰/۸ هرتز تا ۲ هرتز و ۰/۲ هرتز تا ۰/۸ هرتز می‌باشد. به دلیل آنکه این مراجع به عنوان منابع اصلی در مطالعات دینامیک سیستم‌های قدرت می‌باشند و در بسیاری از مقالات و کتاب‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ما نیز با استناد بر آن‌ها این بازه‌های فرکانسی را در نوسانات ذکر شده مد نظر قرار خواهیم داد. حال باید دید چگونه می‌توان میرایی این نوسانات را در شبکه‌های بزرگ و گسترده که دارای پدیده‌های متنوع و پیچیده‌ای می‌باشند، افزایش داد.

به طور معمول برای افزایش میرایی نوسانات فرکانس پایین از پایدار ساز سیستم قدرت (¹PSS) استفاده می‌شود [۱]. همان‌طور که گفته شد یکی از عوامل تأثیر گذار بر پایداری سیگنال کوچک، سیستم کنترل تحریک می‌باشد که می‌تواند با اعمال گشتاور میراکنندگی منفی موجبات ناپایداری را فراهم آورد. از این رو

¹ Power System Stabilizer

PSS با ایجاد یک حلقه‌ی کنترلی اضافی بر روی سیستم تحریک، و جبران سازی فاز سعی در اعمال گشتاور میراکنندگی مثبت و بهبود میرایی نوسانات ذکر شده می‌کند. با توجه به حضور سیستم تحریک در مطالعات تنظیم PSS و همچنین احتمال اثر گذاری متغیرهای حالت آن بر روی مکان نصب پایدار ساز، به نظر می‌رسد اطلاعات مربوط به اکسایتر باید از دقت خوبی برخوردار باشند. بنابراین باید دید بحث عدم قطعیت در اطلاعات اکسایتر که در سیستم‌های بزرگ و پیچیده چندان دور از انتظار نیست، چه اثراتی بر روی کارایی PSS خواهد گذاشت.

در این پایان‌نامه به طور گسترده بحث اثر گذاری عدم قطعیت در مدل و پارامترهای اکسایتر بر روی کارآمدی PSS مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا از مدل‌های مختلف تحریک و PSS ارائه شده در استاندارد IEEE 421.5 [۳۹] بهره برده‌ایم.

در ادامه پیکربندی و نکات مهم فصل‌های پایان‌نامه و روند انجام مطالعات بیان شده است.

۲-۱ پیکربندی پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه بررسی اثر گذاری مدل‌ها و پارامترهای مختلف سیستم تحریک بر روی تنظیم و موقعیت یابی پایدارساز سیستم قدرت می‌باشد. جزئیات مورد بحث در هر فصل بشرح زیر است:

در ادامه‌ی فصل اول پس از ارائه توضیحاتی در مورد پدیده‌ی پایداری سیگنال کوچک، مطالبی در خصوص عوامل موثر بر کارایی پایدار ساز سیستم قدرت بیان کرده‌ایم. همچنین مروری بر روش‌های مختلف تنظیم و موقعیت یابی PSS داشته‌ایم. در ادامه در مورد چگونگی اثر گذاری سیستم تحریک بر روی پایداری سیگنال کوچک نیز بحث شد. علاوه بر این در انتهای فصل اهمیت بررسی موضوع عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک توضیح داده شده است.

در فصل دوم با بررسی مدل‌های مختلف تحریک و بلوک‌های مدل شده در آن‌ها، مطالب مفید و جامعی در مورد سیستم‌های تحریک بیان شده است. در این فصل سعی شد انواع سیستم‌های تحریک مورد بررسی قرار گیرد.

فصل سوم به بررسی و تحلیل چگونگی عملکرد انواع پایدارسازهای سیستم قدرت می‌پردازد. همچنین روش‌های غالب در تنظیم و موقعیت یابی PSS نیز توضیح داده شده‌اند.

در فصل چهارم مطالب و نتایج مربوط به مطالعات عددی در شبکه‌های تک ماشینه و ۴ ماشینه ارائه شده است. در این فصل اثرگذاری پارامترها و مدل‌های مختلف سیستم تحریک بر روی مد الکترومکانیکی شبکه بررسی شده است.

در فصل پنجم بررسی‌های مربوط به تاثیر پذیری شیف‌ت فاز جبران سازی از تغییر در مدل و پارامترهای سیستم‌های تحریک متناوب و استاتیک ارائه شده است. همچنین در این فصل طراحی روبات جدید برای PSS تعریف شده است.

۱-۳ پایدار ساز سیستم قدرت

بهبود میرایی نوسانات فرکانس پایین یا مدهای الکترومکانیکی، تحت عنوان بهبود پایداری دینامیکی در مطالعات سیستم‌های قدرت شناخته می‌شود. برای بهبود رفتار دینامیکی سیستم‌های قدرت باید از پایدار سازهای مناسب بهره برد. یکی از این پایدار سازها که به طور عمده در مباحث مربوط به افزایش میرایی نوسان‌های الکترومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، پایدار ساز سیستم قدرت (PSS) می‌باشد. همان‌طور که گفته شد یکی از عوامل موثر در پایداری سیگنال کوچک، سیستم کنترل تحریک است. سیستم تحریک می‌تواند در بسیاری از شرایط کاری، موجب کاهش مؤلفه‌ی میرا کننده گشتاور الکتریکی شود. این موضوع در ادامه توضیح داده خواهد شد. سیستم کنترلی PSS با استفاده از سیگنال‌های کمکی پایدارکننده همانند سرعت زاویه‌ای روتور، فرکانس ترمینال و یا توان الکتریکی و اعمال آن‌ها به سیگنال خطای ولتاژ تحریک

سعی در تولید گشتاور الکتریکی هم فاز با تغییرات سرعت زاویه‌ای (گشتاور میرا کننده) دارد. در واقع PSS به عنوان کنترل کننده سیستم تحریک، آن را وامی دارد با اعمال میرایی بیشتری بر نوسانات الکترومکانیکی روتور ماشین سنکرون، پایداری کل را افزایش دهد. از نکات با اهمیت در این باب انتخاب سیگنال مناسب برای اعمال به پایدار ساز سیستم قدرت می‌باشد که به مبانی کاربردی طراحی ساختار کنترل مربوط می‌شود [۵]. نکته‌ی با اهمیت دیگر به محل نصب PSS در شبکه‌ی قدرت مربوط می‌شود که یکی از مشکلات مطرح در شبکه‌های قدرت چند ماشینه است. همچنین تنظیم درست PSS و تخصیص پارامترهای مناسب برای آن، به منظور دریافت کارایی بهینه PSS امری ضروری است. در ادامه به طور مختصر درباره‌ی این عوامل مطالبی ارائه خواهد شد.

۱-۳-۱ سیگنال ورودی پایدار ساز سیستم قدرت

همان‌طور که گفتیم انحراف سرعت محور ژنراتور، توان و فرکانس پایانه در میان سیگنال‌های متداول به کار گرفته شده به عنوان ورودی PSS قرار دارند [۱]. هر یک از این ورودی‌ها اثرات خاص خود را بر پایداری کلی سیستم می‌گذارند. بنابراین می‌توان PSS ها را بر مبنای ورودی‌های آن به سه دسته زیر تقسیم کرد:

۱. پایدار سازهای مبتنی بر سیگنال انحراف سرعت محور ژنراتور ($\Delta\omega_r$)

این نوع PSS ها به طور معمول می‌توانند به خوبی نوسانات مدهای الکترومکانیکی را بهبود دهند. این در حالی است که اگر سیگنال سرعت به طور مناسبی اندازه‌گیری نشود و تنظیم تنها با توجه به مد الکترومکانیکی انجام گیرد، ممکن است بعضی از مدهای پیچشی ناپایدار شوند. نتیجه‌ی این امر افزایش گشتاور نوسانی است که منجر به خستگی شفت می‌شود. به منظور رفع این پدیده، از نمونه‌گیری سرعت در دو یا چند نقطه از محور ژنراتور استفاده می‌شود و سرعت معادل بدست آمده به عنوان ورودی PSS بکار می‌روند. همچنین می‌توان از یک فیلتر پیچشی برای تضعیف نوسانات پیچشی در مسیر پایدار ساز استفاده کرد. این فیلتر علاوه بر تضعیف مؤلفه‌های پیچشی سیگنال پایدارکننده، تأثیر بسزایی بر مد تحریک کننده دارد (مدی که به طور عمده مربوط به ولتاژ تحریک است). این بدان دلیل

است که مدار فیلتر به گونه‌ای است که بهره را در گستره‌ی فرکانسی مربوط به مد تحریک افزایش می‌دهد. در نتیجه بهره سیگنال سرعت باید در مقداری که پایداری کافی برای مد تحریک کننده به وجود آید، محدود شود. از این رو بالاترین حد مجاز بهره پایدار ساز این گونه بدست خواهد آمد [۱]. مقدار محدود کننده بهره به امپدانس سیستم خارجی، مشخصه‌های ژنراتور و وضعیت کاری سیستم وابسته است [۱].

۲. پایدار سازهای سرعت-توان [۷-۸]

در این پایدار ساز از سیگنال کمکی انحراف توان برای تولید سیگنال معادل سرعت، بدون نوسانات پیچشی استفاده می‌شود. معادلات زیر روند تولید سیگنالی متناسب با سرعت از سیگنال توان را نمایش می‌دهند. اساس این نوع پایدار سازها با (رابطه ۱-۱) نمایش داده می‌شود.

$$\Delta\omega_{eq} = \frac{1}{M} \int (\Delta P_m - \Delta P_e) dt \quad (1-1)$$

که پارامترهای آن به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M = \text{ثابت اینرسی،}$$

$$\Delta P_m = \text{تغییر در ورودی توان مکانیکی،}$$

$$\Delta P_e = \text{تغییر در خروجی توان الکتریکی،}$$

$$\Delta\omega_{eq} = \text{انحراف سرعت معادل.}$$

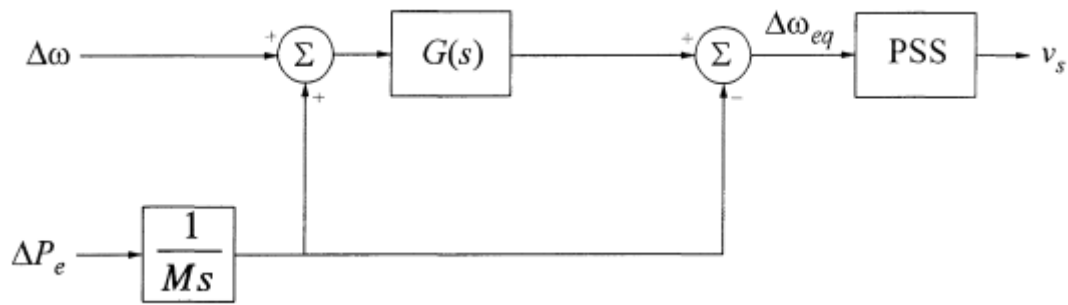
انتگرال توان مکانیکی را می‌توان به صورت رابطه (۱-۲)، معادل تغییر سرعت و انتگرال توان الکتریکی نمایش داد. این سیگنال، دارای نوسانات پیچشی می‌باشد و برای رفع این مشکل از یک فیلتر پیچشی یا همان فیلتر پایین گذر برای حذف فرکانس‌های پیچشی استفاده می‌شود. در نتیجه سیگنال سرعت معادل با جایگذاری رابطه (۱-۲) در (۱-۱) و اعمال فیلتر پیچشی به صورت رابطه (۱-۳) بیان می‌شود.

$$\int \Delta P_m dt = M\Delta\omega + \int \Delta P_e dt \quad (2-1)$$

$$\Delta\omega_{eq}(s) = -\frac{\Delta P_e(s)}{Ms} + G(s) \left[\frac{\Delta P_e(s)}{Ms} + \Delta\omega(s) \right] \quad (3-1)$$

که در آن $G(s)$ تابع تبدیل فیلتر پیچشی می‌باشد.

دیagram بلوکی این نوع پایدار ساز به صورت شکل ۳-۱ نمایش داده می‌شود.



شکل ۳-۱: نمودار بلوکی پایدار ساز سیستم قدرت با ورودی سرعت- توان [۱]

با توجه به مباحث مطرح شده، به دلیل آنکه در این نوع پایدار ساز محدودیت بهره آن ناشی از پایداری مد تحریک کننده وجود ندارد، می‌توان با افزایش مقدار بهره، به پایداری بیشتری در مد الکترومکانیکی دست یافت. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از پایدار ساز با ورودی سرعت- توان نسبت به ورودی سرعت مناسب‌تر است.

۳. پایدار سازهای مبتنی بر فرکانس

در این پایدار سازها، سیگنال فرکانس پایانه ژنراتور به طور مستقیم به عنوان ورودی استفاده می‌شود. عملکرد این نوع پایدار ساز نیز همانند پایدار ساز ورودی سرعت می‌باشد و باید در مورد فیلتر کردن نوسان‌های پیچشی و تنظیم آن دقت شود [۱]. نکته مهم در این پایدار سازها این می‌باشد که حساسیت سیگنال فرکانس به نوسانات روتور با ضعیف‌تر شدن خط انتقال افزایش می‌یابد و این امر، مسئله‌ای کاهش بهره پایدار ساز به دلیل در نظر گرفتن پایداری مد تحریک کننده و پیچشی را جبران می‌کند [۶].

۳-۲ مکان نصب پایدار ساز سیستم قدرت

هدف از اعمال پایدار ساز و انتخاب سیگنال مناسب برای اعمال به آن، دستیابی به عملکرد بهتر سیستم می‌باشد. لذا باید میرایی مدهای نوسانی دارای میرایی کم، بهبود یابد و به عبارت دیگر مد نوسانی مورد نظر در صفحه مختلط به سمت چپ حرکت نماید. همچنین لازم است عملکرد سایر حلقه‌های کنترلی و حدود

پایداری مختل نگردند. همان طور که گفته شد یکی از مؤلفه‌های مهم در کارآمدی PSS انتخاب محل نصب آن می‌باشد. از آنجا که PSS با اعمال سیگنال پایدارکننده‌ای در سیگنال خطای ولتاژ تحریک، سعی در بهبود گشتاور میرا کننده ماشین دارد، بنابراین بهترین مکان برای نصب آن، ژنراتوری است که بیشترین تأثیر را در میرایی مد الکترومکانیکی نوسانی داشته است. بدین ترتیب می‌بایست با انجام مطالعاتی، تأثیر ژنراتورهای مختلف بر میرایی مد نوسانی شناسایی شود. در واقع پس از تشخیص مد نوسانی باید دانست کدام ژنراتورها بیشترین تأثیر را در تشکیل آن داشته‌اند.

در بخش بعدی مروری کلی بر مقالات مهم منتشر شده در مورد موقعیت‌یابی پایدار ساز سیستم قدرت خواهیم داشت.

۱-۲-۳-۱ مروری بر روش‌های ارائه شده برای موقعیت‌یابی PSS

همان‌طور که اشاره کردیم، هدف تعیین ژنراتوری با حداکثر مشارکت در میرایی مد نوسانی می‌باشد. در این راستا فعالیت زیادی در انتخاب محل مناسب اعمال پایدار ساز سیستم قدرت صورت گرفته است. بر این اساس آقای دی‌ملو و همکارانش به عنوان پیشگامان این موضوع در سال ۱۹۸۰ روشی بر اساس حساسیت مقادیر ویژه را برای تعیین تأثیر ژنراتورها در میرایی مدها، ارائه کردند. در این روش به منظور تعیین بهترین واحد برای نصب پایدار ساز، بهره متناظر با تغییرات شار ماشین E_{qi} بر حسب سرعت f_i آن که معادل با تغییرات توان بر حسب ولتاژ داخلی هر واحد می‌باشد تغییر داده می‌شود و تأثیر پذیری مناسب مد نوسانی از این تغییر، به عنوان ملاک انتخاب استفاده می‌شود. بهره مورد نظر به صورت $g_i = E_{qi} / f_i$ تعریف می‌شود [۹]. آقای آبدولا و همکارانش نیز با استفاده از حساسیت مقادیر ویژه روشی دیگر ارائه کردند [۱۰]. بر پایه این روش حساسیت مد نوسانی به تغییر ضریب میرایی تک تک واحدها محاسبه می‌شود و مؤثرترین ژنراتور انتخاب خواهد شد. در کاری دیگر آقای ژاو و همکارانش حساسیت اثر پایدار ساز (SPE^1) را به صورت شاخصی جهت سنجش تغییرات مد نوسانی به تغییرات پایدار ساز معرفی کردند و از آن برای تشخیص مکان نصب PSS بهره بردند [۱۱]. این شاخص با استفاده از بردار ویژه چپ و راست و مشخصات

¹ Sensitivity of pss effects

سیستم تحریک، تعریف می‌شود. در اقدامی مشابه آقای ژانگ و همکارانش روشی دیگر بر پایه حساسیت مقادیر ویژه نسبت به پایدار ساز ارائه کردند [۱۲]. در این روش حساسیت مقادیر ویژه، به خصوص آن‌هایی که باید انتقال داده شوند، نسبت به تغییر بهره پایدار ساز به عنوان معیاری برای سنجش اثر گذاری ژنراتورها بر میرایی مدها معرفی شد. آقای فلیاچی روش دیگری بر مبنای شاخص کارایی ارائه کرد [۱۳]. در این روش ابتدا، با استفاده از تعریف شاخص کارایی انتگرالی، مد یا مدهای بحرانی سیستم تشخیص داده می‌شوند. سپس با تعیین حداقل تعداد پایدار سازهای مورد نیاز سیستم، با استفاده از شاخص حساسیت مناسب‌ترین مکان برای پایدار سازها تعیین می‌شود.

در روش‌های که در بالا به آن‌ها اشاره شد، اثر تمام متغیرهای حالت برای یک مد نوسانی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا از بزرگ‌ترین اثر مناسب‌ترین ژنراتور برای نصب PSS تشخیص داده شود. حال آنکه در شبکه‌های بزرگ این مدهای نوسانی یکتا نیستند و بسته به شرایط کار می‌توانند متعدد باشند، در نتیجه انجام محاسبات در چنین حالت‌های زمان‌بر و پیچیده خواهد بود.

در کاری دیگر آقای ین و همکارش روشی بر اساس تعقیب مقادیر ویژه را برای تعیین مناسب‌ترین مکان نصب پایدار ساز ارائه کردند [۱۴]. در این روش حرکت مقادیر ویژه سیستم از یک سیستم بهم پیوسته به سمت یک سیستم جدا از هم، برای تعیین مکان پایدار ساز بررسی می‌شود. در واقع این روش با رسم منحنی مکان هندسی مدهای سیستم محقق می‌شود. به دلیل آنکه در سیستم جدا از هم هر مد متأثر از یک ژنراتور می‌باشد، در نتیجه مؤثرترین ژنراتور برای مد نوسانی در سیستم بهم پیوسته مشخص خواهد شد. توسط آقای هیاما و همکارانش روشی دیگر مبتنی بر وابستگی مابین ژنراتورها، برای تعیین مکان بهینه نصب پایدار ساز پیشنهاد شد [۱۵]. در این روش پس از جداسازی یک سیستم قدرت چند ماشینه به چندین گروه جدا با عناصر وابسته، انتخاب مؤثرترین ژنراتور برای نصب پایدار ساز در هر گروه انجام می‌گیرد.

آقای انگوین روشی پویا بر مبنای کنترل پذیری گرامین را برای تعیین مکان نصب پایدار ساز ارائه کرد. در این روش بهترین مکان، بازتاب بهترین کنترل پذیری در میان تمام متغیرهای حالت سیستم می‌باشد [۱۶].

در واقع پس از محاسبه‌ی بردار کنترل پذیری برای مدهای نوسانی، بزرگ‌ترین مؤلفه نشان‌دهنده مناسب‌ترین مکان برای نصب PSS خواهد بود.

آقای هسو و همکارانش روشی با نام ضرایب مشارکت را برای تعیین مکان بهینه نصب پایدار ساز ارائه کردند. ضرایب مشارکت که از ضرب عناصر متناظر با حالات در بردارهای ویژه چپ و راست بدست می‌آید، در تعیین محل مناسب پایدار ساز و یا سیگنال مناسب جهت اعمال به آن استفاده می‌شود [۱۷]. این روش پس از محاسبه ماتریس مشارکت، ژنراتوری که بیشترین مشارکت را در مد نوسانی دارد، به عنوان محل نصب پایدار ساز معرفی می‌کند. اشکال ضرایب مشارکت اینست که در آن توجهی به ماتریس ورودی B و ماتریس خروجی C نشده و تنها از ماتریس حالت سیستم A بدست می‌آید. با این حال این روش به دلیل سادگی و کاربردی بودن به عنوان روشی غالب در مبحث مکان یابی PSS شناخته می‌شود.

آقای آو و همکارانش تأثیر تغییر بهره حلقه کنترل ولتاژ بر مدهای نوسانی را به عنوان معیاری جهت تعیین مؤثرترین واحد برای نصب PSS معرفی نمودند [۱۸]. روش دیگری که در این حوزه مطرح شد، توسط آقای کریم‌پور و همکارانش ارائه شد [۱۹]. آن‌ها روشی بر پایه تجزیه‌ی مقادیر تکین (SVD^1) تابع تبدیل، برای تعیین مکان نصب PSS ارائه کردند. بعلاوه می‌توان از این روش برای تعیین ژنراتورهایی که در برابر یکدیگر نوسان می‌کنند، استفاده کرد. در این روش به صورت غیر مستقیم کنترل پذیری و رویت پذیری مدهای نوسانی با توجه به مشارکت ژنراتورها، در نظر گرفته شده است. آقای میلانوویچ و همکارش از آرایه بهره نسبی در تشخیص ژنراتور مناسب جهت اعمال پایدار ساز سیستم قدرت استفاده کرده است. آرایه بهره نسبی به صورت ماتریسی از بهره نسبی تعریف شده است. بهره نسبی برای یک ورودی و خروجی مشخص به صورت نسبت بهره کنترل نشده به بهره کنترل شده تعریف می‌شود. [۲۰].

مارتینز و همکارانش روشی بر پایه ماتریس مانده‌ها برای تعیین مکان نصب PSS معرفی کردند. آن‌ها بیان کردند که مانده‌ها در واقع معیاری کمی از مقدار تغییر مد نوسانی می‌باشند. بدین ترتیب این تغییر می‌تواند

¹ Singular value decomposition

واحد مورد نظر و سیگنال مورد نظر را برای اعمال پایدار ساز تعیین کند [۲۱]. اساس این روش در نظر گرفتن توأم کنترل پذیری و رویت پذیری می باشد.

آقای لی و همکارانش با استفاده از ساده سازی ماتریس مانده ها، شاخصی را تعریف کردند، که با محاسبه و مقایسه بین ژنراتورها، مکان نصب پایدارساز را معرفی می کند [۱۹].

همان طور که قبلاً نیز اشاره کردیم در سیستم های بزرگ و پیچیده انجام روش ها و آنالیزهای بیان شده در بالا دشوار و زمان بر خواهد بود از این رو به نظر می رسد استفاده از روش های بر پایه الگوریتم جستجو برای تعیین مکان نصب PSS بسیار مفید و موثر باشد. در این راستا نیز تعدادی الگوریتم ارائه شده است. از آن جمله می توان به کار آقای سبا و همکارش اشاره کرد [۲۱]. آن ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی توانستند مناسب ترین واحد برای نصب PSS را معرفی کنند. در کاری دیگر آقای هسایو و همکارانش روشی بر پایه بهینه سازی را برای تعیین موقعیت پایدارساز معرفی کردند [۲۴]. روش آن ها مناسب ترین واحد برای نصب PSS را در چندین مد الکترومکانیکی به طور همزمان مشخص می کند. روش دیگری که ارائه شد، توسط خانم اسلامی و همکارانش مطرح گردید [۲۵]. این روش با استفاده از الگوریتم بهینه سازی دسته ذرات بهبود یافته، ژنراتور مناسب برای نصب پایدارساز را معرفی می کند.

اما سومین مسئله ی مورد اهمیت در مورد پایدار سازها، تنظیم و تخصیص پارامترهای مناسب برای آن ها می باشد. در بخش بعدی به مروری مختصر بر مقالات این مبحث می پردازیم.

۳-۳-۱ تنظیم پایدارساز سیستم قدرت

در دهه های اخیر، کارهای پژوهشی زیادی درباره ی تنظیم PSS ها ارائه شد. هدف اصلی اکثر این پژوهش ها دستیابی به کارایی بهینه PSS در دامنه ی وسیعی از نقاط کار سیستم است. استراتژی های مختلف کنترلی همانند کنترل تطبیقی، جایی قطب و یا الگوریتم های مختلف بهینه سازی برای دستیابی به این هدف ارائه شده اند. می توان گفت ارائه ی روش های تنظیم PSS و بررسی پایداری ماشین، ابتدا بر روی سیستم تک

ماشین متصل به باس بی‌نهایت مطرح و انجام پذیرفت و سپس با پیشرفت در این حوزه و توسعه مدل‌های چند ماشینه این مبحث به طور فزاینده‌ای گسترش یافت. در ادامه سعی شده است به طور مختصر برجسته‌ترین کارها در این حوزه معرفی شود.

ایده‌ی طراحی PSS به منظور تولید گشتاوری هم فاز با سرعت برای میرا کردن نوسانات در توان خروجی ژنراتور، اولین بار توسط دی ملو و کنکورديا [۲۶] مطرح شد. در این روش طراحی PSS بر اساس جبران سازی فاز انجام گرفت. فازی که باید توسط PSS جبران شود، زاویه‌ی پس فازی است که توسط سیستم تحریک به ماشین اعمال می‌شود. اعمال خروجی پایدارساز که دارای زاویه پیش فازی است به انحراف ولتاژ سیستم تحریک این پس فازی را جبران می‌کند. پس از آن‌ها آقایان کندور [۲۷] و لارسن و سوآن [۶] به توسعه طراحی سیستم‌های PSS با یک ورودی پرداختند. آن‌ها به طور گسترده نکاتی که باید در این روش لحاظ شود را بیان نموده‌اند. همچنین در کاری دیگر از دی ملو [۷]، او و همکارش طراحی یک PSS با ۲ ورودی را مورد بررسی قرار دادند. ورودی نهایی این PSS سرعت معادلی بود که از ترکیب سرعت زاویه‌ای و توان الکتریکی ژنراتور بدست می‌آمد. به دلیل آنکه این نوع پایدار سازها تحت تأثیر نوسانات پیچشی نمی‌باشند، عملکرد بهتری نسبت به مدل تک ورودی از خود نشان دادند.

کار دیگری که در ادامه این طراحی‌ها ارائه شد، تلاش برای هماهنگ کردن PSS ها در سیستم‌های چند ماشینه می‌باشد. آقای اوستاجیک با استفاده از یک روش هیبرید تلاشی برای هماهنگ کردن طراحی PSS های سیستم چند ماشینه انجام داد [۲۸]. او در این روش از آنالیزهای مدال و محدوده‌ی فرکانسی، بهره برد. هدف او از این کار برآوردن پایدارسازی مقاوم در سیستم‌های دارای چند مدالکترومکانیکی نوسانی با کاهش در تعداد PSS ها و افزایش هماهنگی مابین آن‌ها بوده است.

لیم و الانگووان، روشی را برای طراحی پایدار سازهای غیر متمرکز در یک سیستم چند ماشینه با استفاده از روش حوزه‌ی فرکانس ارائه دادند [۲۸]. با استفاده از این روش، پارامترهای PSS به گونه‌ای بدست می‌آیند

که برخی یا تمام مقادیر ویژه الکترومکانیکی سیستم ممکن است در نقاط از قبل تعیین شده صفحه مختلط قرار بگیرند.

حسنویچ و فلیاچی با استفاده از روش تحلیل پرونی تابع تبدیل مرتبه پایین شبکه‌ی قدرت دو ناحیه‌ای را به منظور طراحی PSS شناسایی نمودند [۲۹]. در این روش تابع تبدیل با استفاده از داده‌های حوزه‌ی زمان معروف به داده تخمین بدست می‌آید و می‌توان با بهره‌گیری از پاسخ فرکانسی این تابع، اقدام به تنظیم PSS نمود.

به منظور دستیابی به تنظیمی مقاوم برای پایدار سازها که قادر به پاسخ‌گویی مناسب برای دامنه‌ی وسیعی از نقاط کار باشد، روش‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های جستجوی متفاوتی مطرح شد. طراحی‌های معرفی شده در بالا معمولاً برای یک نقطه‌ی کار مشخص تعریف می‌شوند و این یکی از ضعف‌های آن‌ها می‌باشد. در این راستا [۳۰] و [۳۱] از روش کنترل H_∞ به منظور طراحی PSS بهره برده‌اند. این روش امکان در نظر گرفتن توابع کنترلی زیادی برای دستیابی به تنظیم مقاوم دارد. به عنوان مثال می‌توان، توابع کارایی پایدارساز و تنظیم مقاوم را در سیستم کنترلی ترکیب کرد. این روش از قوانین کنترل برای طراحی در حالت کاری نامی استفاده می‌کند و برای افزایش مقاومت، تنظیم در حالت غیر اسمی نیز تنظیم می‌شود. از آن برای تنظیم PSS در رنج وسیعی از شرایط کار می‌توان استفاده نمود.

طراحی به روش H_∞ ، به طور ذاتی یک روش در حوزه‌ی فرکانس می‌باشد و نمی‌تواند کنترل زیادی بر رفتار گذرا و مکان قطب حلقه بسته داشته باشد. بنابراین تمایل داریم یک پایدارساز مقاومی داشته باشیم که کارایی خوبی در مطالعات سیگنال کوچک داشته باشد. راو و سن روشی بر پایه جایابی قطب با استفاده از حل نامعادله ماتریس خطی ارائه کردند [۳۲-۳۳]. نامعادله ماتریس خطی، نمایش دهنده محدودیت مربوط به قرار گرفتن قطب‌ها در ناحیه‌ای از صفحه‌ی مختلط می‌باشد.

در اثر تغییر شرایط کاری سیستم، تضمینی برای کارایی بهینه PSS وجود ندارد. حتی ممکن است در بعضی از حالت‌ها شبکه ناپایدار نیز شود. به همین دلیل روش‌های دیگری بر پایه الگوریتم جستجو و بهینه‌سازی

برای طراحی مقاوم PSS معرفی شد. از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک (GA) [۳۴]، بهینه سازی دسته پرندگان (PSO) [۳۵] و جمعیت بر اساس یادگیری نموی (PBIL) [۳۶] اشاره کرد.

الگوریتم ژنتیک روشی است که با الهام از کروموزوم‌های انسان و رفتار آن‌ها به هنگام ترکیب با یکدیگر، به انتخاب جمعیت اولیه برای داده‌ها و ترکیب آن‌ها برای تشکیل داده‌های مراحل بعد در الگوریتم جستجو، می‌پردازد. این الگوریتم از طریق جستجو در میان داده‌های وسیعی، امکان تخصیص بهینه برای پارامترهای PSS را فراهم می‌آورد [۳۴]. روش جستجوی دیگری که می‌توان نام برد الگوریتم PSO می‌باشد [۳۵ و ۳۷-۳۸]. الگوی این روش نیز همانند الگوریتم GA از طبیعت استخراج شده است. اساس این روش از رفتار دسته‌ی پرندگان و گروه ماهی‌ها الهام گرفته شده است. این روش با محاسبه تابع خطا برای تمام جمعیت، و تشخیص گروهی از جمعیت که دارای خطای کمتری می‌باشند، از آن‌ها برای تشکیل جمعیت بعدی استفاده می‌کند. در واقع این روش سعی در بهینه کردن انتخاب جمعیت اولیه در ابتدای اجرای هر تکرار دارد و به همین دلیل باید گفت تعداد پارامترهای کمتری نسبت به GA استفاده می‌کند. بنابراین می‌توان اجرای این روش را ساده‌تر از GA دانست. روش جمعیت بر پایه یادگیری نموی، روش دیگری است که در این حوزه معرفی شده است. این روش ترکیبی از مشخصه‌های GA با شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) می‌باشد [۳۶]. می‌توان با ترکیب تابع هدف‌های متفاوتی طراحی مقاومی برای پایدار سازها بدست آورد.

۴-۱ سیستم‌های تحریک

در سیستم‌های قدرت یکی از کنترل کننده‌های واحد تولید، سیستم اکسایتر آن می‌باشد که وظیفه‌ی تنظیم ولتاژ ژنراتور و توان راکتیو خروجی آن را بر عهده دارد. سیستم‌های تحریک بنا بر آنکه منبع تولید میدان dc مورد نیاز برای سیم پیچ‌های تحریک ژنراتور چگونه تغذیه می‌شود در ۳ نوع زیر طبقه بندی می‌شوند [۳۹]:

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

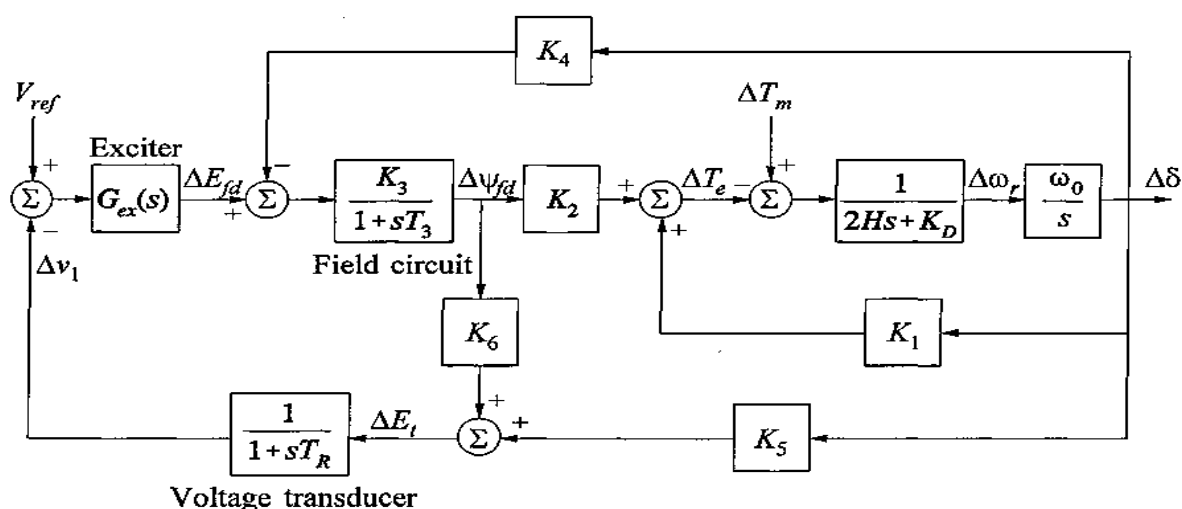
۲. سیستم‌های تحریک جریان متناوب: که از یک ژنراتور متناوب به همراه یکسو سازهای چرخان یا ساکن برای تولید جریان مستقیم مورد نیاز میدان ماشین سنکرون استفاده می‌کند.

۳. سیستم‌های تحریک استاتیک: که در آن‌ها توان منبع تحریک از طریق ترانسفورمرها یا سیم‌پیچ اضافی ژنراتور و همراه با یکسو ساز تأمین می‌شود.

در فصل ۳ به طور کامل به بررسی انواع مختلف سیستم تحریک خواهیم پرداخت.

همان‌طور که بیان کرده‌ایم یکی از عوامل موثر در پایداری سیگنال کوچک، سیستم تحریک ماشین می‌باشد. سیستم‌های تحریک متفاوت اثرات مختلفی بر روی پایداری خواهند داشت. به عنوان مثال در کار تحقیقاتی مرجع [۴۰]، اثر سیستم‌های تحریک خود تحریک و تحریک مستقل بر روی پایداری سیگنال کوچک در یک سیستم چند ماشینه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که سیستم تحریک مستقل نسبت به سیستم خود تحریک در برابر یک اغتشاش یکسان، مشخصه‌های دینامیکی بهتری دارد.

برای تشریح چگونگی اثر گذاری سیستم اکسایتر بر روی پایداری سیگنال کوچک از دیاگرام شکل ۴-۱ بهره خواهیم برد. این شکل نمایش‌دهنده مدل سیستم تک ماشین متصل به باس بی نهایت می‌باشد که به همراه سیستم‌های کنترلی اکسایتر و تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱: دیاگرام سیستم تک ماشین و باس بی نهایت به همراه بلوک‌های اکسایتر و تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ [۱]

اثر گذاری سیستم اکسایتر بر روی پایداری وابسته به شرایط کاری و ساختار خود سیستم تحریک است [۱]. در سیستم‌های قدرت برای آنکه بتوانند تحلیل درستی از پایداری سیگنال کوچک در اثر بروز اغتشاش داشته باشند، از تجزیه‌ی تغییرات گشتاور الکتریکی استفاده می‌کنند.

می‌توان با رجوع به شکل ۴-۱ تغییر گشتاور الکتریکی ماشین ΔT_e را در اثر تغییر شار میدان $\Delta \psi_{fd}$ به سبب تغییر زاویه‌ی روتور، به صورت رابطه‌ی دیفرانسیلی (۴-۱) بر گرفته از مرجع [۱] بیان کرد.

$$\Delta T_e \Big|_{\Delta \psi_{fd}} = \frac{-K_2 K_3 [K_4 (1 + ST_R) + K_5 Gex]}{S^2 T_3 T_R + S(T_3 + T_R) + 1 + K_3 K_6 Gex} \Delta \delta \quad (4-1)$$

در این رابطه ضرایب K_2 تا K_6 ضرایب شش‌گانه‌ی مدل هفرون فیلیپس [۴۱] می‌باشند، T_R ثابت زمانی بلوک ترانس‌دیوسر ولتاژ و T_3 برابر با حاصل ضرب ثابت زمانی گذرای مدار باز ماشین T_{d0} در ضریب K_3 می‌باشد. بلوک Gex نیز نشان دهنده‌ی تابع تبدیل مدل اکسایتر در سیستم می‌باشد که به وضوح مشخص است که می‌تواند اثر گذاری بر روی تغییرات گشتاور باشد. با تجزیه‌ی تغییرات گشتاور بر حسب مؤلفه‌های سنکرون کننده و میرا کننده می‌توان به نحوه‌ی اثر گذاری سیستم‌های اکسایتر و پارامترهایشان بر روی پایداری سیگنال کوچک شبکه پی برد. برای حصول پایداری وجود هر دو مؤلفه‌ی گشتاور الکتریکی لازم می‌باشد.

توجه کنید که به دلیل اختلاف در ساختار سیستم‌های اکسایتر و در نتیجه تفاوت حاصله در تابع تبدیل‌های آن‌ها باید انتظار اثرات متفاوت آن‌ها بر روی پایداری شبکه را داشته باشیم. از سوی دیگر به دلیل حضور ضریب K_5 در رابطه‌ی (۵-۱) و اینکه علامت این ضریب بسته به شرایط کاری و امپدانس معادل شبکه می‌تواند مثبت یا منفی باشد (سایر ضرایب معمولاً مثبت هستند) [۲۶]، اثر گذاری اکسایتر بر روی تغییرات گشتاور، بسته به شرایط شبکه دست خوش تغییر خواهد شد. این موضوع تأثیر ساختار شبکه بر روی پایداری را نشان می‌دهد.

بنابراین با توجه به مباحث مطرح شده در بالا باید گفت تأثیر سیستم تحریک بر روی پایداری شبکه، وابسته به شرایط کاری و ساختار خود آن متفاوت است.

در بسیاری از روش‌های مطرح شده برای تنظیم PSS، رابطه‌ی (۱-۴) نقش کلیدی را در تعیین زاویه‌ی جبران سازی ایفا می‌کند. در واقع تخصیص ثابت زمانی‌های مناسب برای بلوک‌های پس فاز- پیش فاز وابسته به میزان جبران سازی فازی دارد که توسط این رابطه مقدار پس فاز آن محاسبه می‌شود. در این رابطه همان‌طور که گفتیم حضور تابع تبدیل سیستم تحریک برای مدل و پارامترهای مختلف آن از نظر فازوری دامنه و فاز متفاوتی خواهد داشت. با فرض مشخص و در دسترس بودن مشخصات ماشین و ساختار شبکه از دید همان ماشین (که چندان فرض اشتباهی نیست)، مشخصات سیستم تحریک نقش تعیین کننده‌ای در محاسبه زاویه جبران سازی و به طبع آن تنظیم پایدارساز خواهد داشت.

حال اگر اطلاعات تحریک در دسترس باشد تنظیم و موقعیتیابی PSS انجام خواهد شد. حال آنکه بر پایه مطالعات صورت گرفته، در شبکه‌های بزرگ و پیچیده همانند شبکه‌ی کشور به نظر می‌رسد که نقص اطلاعات در حوزه‌ی سیستم‌های تحریک امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. این نکته از مطالعه و مقایسه اطلاعات موجود در بعضی از سیستم‌های اکسایتر شبکه‌ی شبیه‌سازی شده‌ی کشور با اطلاعات واقعی گرفته شده از بعضی نیروگاه‌ها [۴۲] استنتاج شده است. به دلیل آنکه انجام مطالعات به منظور از بین بردن عدم قطعیت در اطلاعات سیستم‌های تحریک کاری زمان بر و پر هزینه می‌باشد، بنابراین می‌بایست به دنبال پاسخ مناسبی برای این سؤال که آیا اثر گذاری عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک منجر به عدم اطمینان ما از نتایج مطالعات مربوط به پایدارساز سیستم قدرت خواهد شد یا خیر؟ باشیم.

در این پایان‌نامه سعی شده است با بهره‌گیری از مدل‌ها و پارامترهای مختلف سیستم تحریک و بررسی اثر آن‌ها بر مباحث حوزه‌ی PSS، پاسخ مشخصی به پرسش بالا داده شود. همچنین در ادامه بررسی با توجه به نتایج حاصله، گروه‌بندی‌هایی برای سیستم‌های تحریک ارائه شده است. این گروه‌بندی بر طبق تشابه تنظیم PSS بدست آمده است، بطوریکه مدل‌های تحریک قرار گرفته در یک گروه دارای تنظیم مشابهی می‌باشند و

در صورت طراحی PSS برای مدلی مشخصی از یک گروه، پروسه طراحی برای سایر مدل‌های همان گروه انجام نخواهد شد و مقادیر بدست آمده در تنظیم ابتدایی در سایر مدل‌ها نیز پاسخگو خواهد بود.

فصل ۲

بررسی مدل‌های استاندارد سیستم‌های تحریک

۲-۱ مقدمه

در مطالعات مرتبط با پایداری سیستم قدرت، مدل سیستم تحریک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیستم تحریک مؤثرترین حلقه کنترلی در ایجاد و همچنین کنترل نوسانات سیگنال کوچک توان الکتریکی می‌باشد. از دهه ۱۹۶۰ میلادی با محرز شدن اهمیت مدل‌سازی دقیق این سیستم، تا کنون چندین گزارش توسط نهاد انجمن مهندسين برق و الكترونیک آمریکا IEEE منتشر شده و در نهایت منجر به تدوین مدل‌های استاندارد گردیده که آخرین بازنگری بر روی آن‌ها در سال ۲۰۰۵ صورت پذیرفته است.

۲-۲ مدل‌های سیستم تحریک به منظور انجام مطالعات پایداری سیستم

قدرت

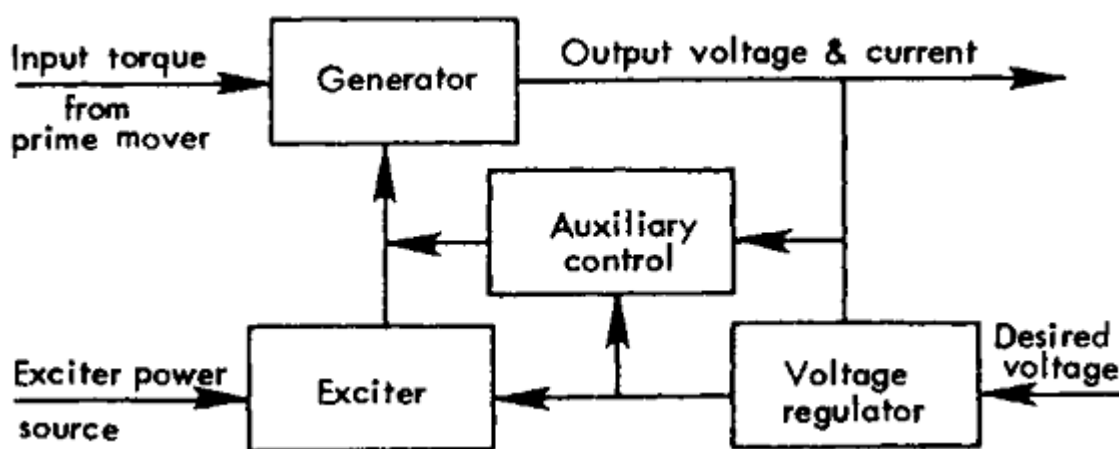
هنگامی که عملکرد دینامیکی ماشین‌های سنکرون به منظور انجام بررسی‌های مرتبط با پایداری سیستم قدرت شبیه‌سازی می‌شوند، باید سیستم‌های تحریک ماشین‌های سنکرون با جزئیات کافی مدل شوند. لازم است مدل‌های بدست آمده قابلیت نمایش عملکرد واقعی سیستم تحریک را در مقابل اغتشاشات بزرگ و همچنین اختلالات کوچک را داشته باشند. مدل‌هایی که برای سیستم تحریک در نظر گرفته می‌شوند برای انحرافات فرکانس تا $\pm 5\%$ درصد از مقدار فرکانس نامی و فرکانس‌های نوسان تا ۳ هرتز صادق می‌باشند. این

مدل‌ها برای بررسی‌های مربوط به رزونانس زیر سنکرون^۱ (SSR) و یا مشکلات مربوط به تداخلات پیچشی شفت مناسب نیستند. چرا که فرکانس این نوع نوسانات بیشتر از ۴ هرتز است [۲].

۳-۲ نمایش سیستم‌های تحریک ماشین سنکرون در مطالعات سیستم

قدرت

وظیفه اصلی سیستم تحریک، تأمین جریان مستقیم سیم‌پیچ تحریک ماشین سنکرون است. بعلاوه سیستم تحریک با کنترل ولتاژ تحریک (و در نتیجه جریان تحریک) وظیفه‌ی کنترل و حفاظت را که در عملکرد مناسب یک سیستم قدرت مهم است اجرا می‌کند. وظایف کنترل شامل کنترل ولتاژ و توان راکتیو انتقالی و تقویت پایداری سیستم می‌شود. شکل ۱-۲ چگونگی ارتباط میان سیگنال‌های ژنراتور و مؤلفه‌های تحریک را نمایش می‌دهد.



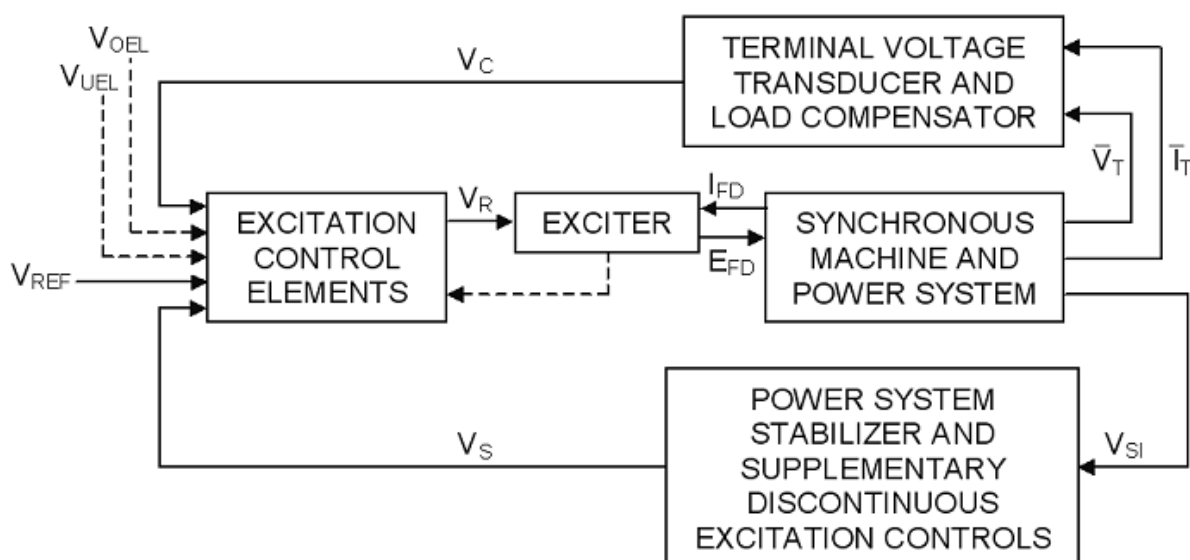
شکل ۱-۲: آرایش ارتباط و ترتیب مؤلفه‌های تحریک [۴۳]

می‌توان نمای مجتمع شده‌ی این دیاگرام به همراه سایر بلوک‌های معمول در سیستم کنترل تحریک را در شکل ۲-۲ مشاهده نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید سیستم کنترل تحریک شامل زیر سیستم‌هایی شامل مبدل^۲ ولتاژ به همراه جبران ساز بار، مؤلفه‌های کنترل تحریک، تحریک کننده، و در بسیاری از موارد

¹ Subsynchronous resonance

² Transducer

دارای یک پایدارساز سیستم قدرت نیز می‌باشد. در این میان مؤلفه‌ی کنترل تحریک شامل تابع‌های تنظیم کننده^۱ و پایدارکننده 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.



شکل ۲-۲: بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحریک ماشین سنکرون [۳۹]

با توجه به مطالب فوق ذکر، توابع معمول و ضروری سیستم‌های تحریک عبارتند از:

مبدل ولتاژ پایانه و جبران‌کننده بار

تنظیم‌کننده

پایدارساز سیستم قدرت

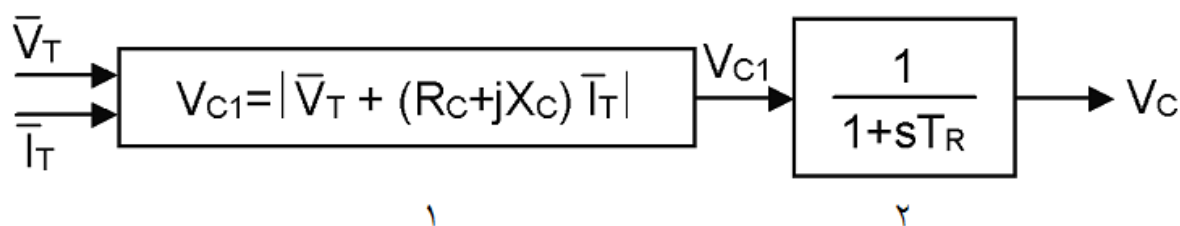
مدارهای محدودکننده و حفاظتی

۲-۳-۱ مبدل ولتاژ پایانه و جبران‌کننده بار

نمای این دو تابع در شکل ۲-۳ آورده شده است. بلوک شماره ۱ نمایش دهنده تابع جبران‌کننده بار می‌باشد. ورودی این بلوک سیگنال‌های اندازه‌گیری شده‌ی جریان I_T و ولتاژ V_T پایانه ژنراتور می‌باشد. به

¹ Regulator

طور معمول این اندازه‌گیری در پایانه ژنراتور صورت می‌پذیرد، با این حال اگر V_T و I_T در نقطه‌ای داخل یا خارج ماشین اندازه‌گیری شوند، بلوک جبران ساز مقدار ولتاژی که باید به ولتاژ پایانه اضافه شود (اندازه‌گیری داخل ماشین) و یا از آن کم شود (اندازه‌گیری خارج از ماشین) را از طریق محاسبه‌ی امپدانس $Z_C = R_C + jX_C$ ، جبران می‌کند. البته در بسیاری از موارد مقدار R_C بسیار ناچیز است و در نظر گرفته نمی‌شود. بدیهی است اگر سیگنال‌های ولتاژ و جریان در پایانه ماشین اندازه‌گیری شوند، نیازی به جبران سازی نیست و مؤلفه‌های R_C و X_C مساوی صفر خواهند بود.



شکل ۲-۳: بلوک دیاگرام مبدل ولتاژ پایانه به همراه جبران ساز بار

بلوک شماره‌ی ۲ معرفی کننده تابع مبدل ولتاژ می‌باشد. پس ساختن سیگنال ولتاژ V_{C1} از سیگنال‌های پایانه ماشین، بلوک مبدل ولتاژ وظیفه‌ی یکسو سازی و آماده‌سازی آن را برای اعمال به تنظیم‌کننده ولتاژ بر عهده دارد. ثابت زمانی T_R در این بلوک، مقدار بسیار کوچکی دارد.

۲-۳-۲ تنظیم کننده ولتاژ

این بلوک با مقایسه‌ی مابین سیگنال اندازه‌گیری شده‌ی V_{C1} ، سیگنال مرجع V_{REF} و سیگنال‌های کنترلی V_{OEL} ، V_{UEL} و ... و با اعمال عملگرهایی بر روی سیگنال خروجی از این مقایسه، ولتاژ تحریک، تحریک کننده را می‌سازد. همچنین این بلوک به همراه یک بلوک پایدارساز سیستم تحریک مورد استفاده قرار می‌گیرد. بلوک پایدارساز، به صورت یک کنترل کننده‌ی فیدبکی عمل می‌کند. ورودی پایدارساز، خروجی مدار تحریک کننده و خروجی آن به صورت یک سیگنال کنترلی اضافی وارد تنظیم کننده می‌شود. نکته‌ای که می‌بایست در مورد تنظیم‌کننده‌ها دقت شود، سرعت پاسخ‌گویی آن‌ها می‌باشد. در واقع در صورت به وجود آمدن تغییری در ورودی، سیستم تحریک تا زمانی از تنظیم کننده دستوری دریافت نکند،

پاسخ را تغییر نمی‌دهد. بدین ترتیب سیستم‌هایی که دارای تنظیم‌کننده‌های کندی می‌باشند، بدون توجه به سرعت پاسخ‌گویی تحریک‌کننده، از آن‌ها با نام سیستم‌های ضعیف یاد می‌شود. همچنین برای داشتن سیستمی با قابلیت اطمینان و دسترسی بالا، استفاده از تنظیم‌کننده‌هایی که دارای عملکرد پیوسته می‌باشند، ضروری است. یعنی هر گونه عملکرد اصلاحی می‌بایست متناسب با انحراف ولتاژ پایانه ac از مقدار مرجع و بدون توجه به کوچکی دامنه‌ی آن، اعمال شود [۴۳].

۲-۳-۳ پایدارساز سیستم قدرت

این بلوک با اعمال سیگنال کنترلی کمکی به ورودی تنظیم‌کننده ولتاژ وظیفه‌ی میرا کردن نوسانات فرکانس پایین را بر عهده دارد. در فصل آینده در مورد بعضی از انواع مدل‌های پایدارساز توضیحاتی ارائه شده است.

۲-۳-۴ مدارهای محدودکننده و حفاظتی

مدارها و المان‌های کنترلی و حفاظتی زیادی برای اطمینان از کارکرد سیستم تحریک مورد استفاده قرار می‌گیرند. اثر این المان‌ها به سه صورت در مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود. نوع اول در نظر گرفتن آن‌ها، اعمال سیگنالی به عنوان ورودی یک بلوک کنترلی می‌باشد. به عنوان مثال سیگنال‌های V_{UEL} ، V_{OEL} در شکل ۲-۲ از این نوع می‌باشند. نوع دوم محدودی می‌باشند که بر روی بلوک‌های کنترلی و یا خروجی آن‌ها اعمال می‌شوند. وظیفه‌ی هر دو آن‌ها محدود کردن سیگنال خروجی در محدوده‌ی تعریفی می‌باشد. نوع سوم استفاده از بلوک‌های مزایده‌ای^۱ می‌باشد. در این بلوک‌ها، پس از مقایسه‌ی بین سیگنال خروجی و سیگنال مرجع بنا بر تعریف نوع مزایده، سیگنال کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر به عنوان خروجی عبور می‌کند [۱].

¹ auctioneer

۴-۲ انواع سیستم‌های تحریک

همان‌طور که گفتیم سیستم‌های تحریک بنا بر نوع منبع تغذیه تحریک ماشین به سه دسته‌ی زیر تقسیم می‌شوند.

۱- سیستم‌های تحریک جریان مستقیم

۲- سیستم‌های تحریک جریان متناوب

۳- سیستم‌های تحریک استاتیک

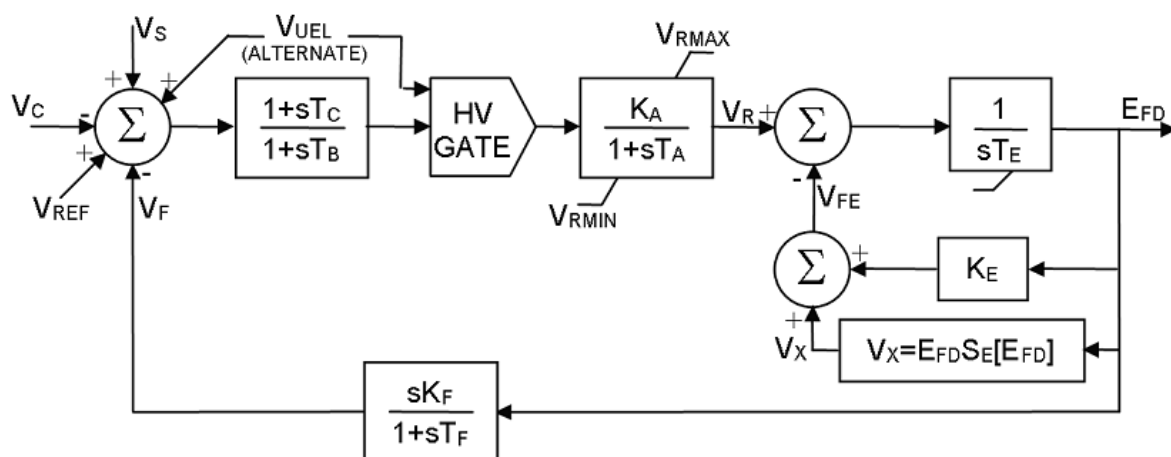
هر یک از طبقه‌بندی‌هایی بالا در بخش ذیل به صورت مختصر و جامع توضیح داده شده‌اند.

۴-۲-۱ تحریک‌کننده جریان مستقیم - نوع dc [۳۹]

تعداد محدودی از ماشین‌های سنکرون جدید به این نوع سیستم‌های تحریک مجهز شده‌اند، و بسیاری از آن‌ها نیز با سیستم‌های متناوب و یا استاتیک جایگزین شده‌اند. با این حال تعداد زیادی از آن‌ها در حال سرویس می‌باشند. در ادامه مدل‌های $DC1A$ ، $DC2A$ ، $DC3A$ و مدل جدیدتر $DC4B$ به تفصیل بررسی خواهند شد.

۴-۲-۱-۱ مدل سیستم تحریک نوع $DC1A$

این مدل که شمای آن در شکل ۴-۲ آورده شده است به منظور نمایش تحریک‌کننده‌ها با کموتاتورهای جریان dc کنترل شده با میدان که به همراه تنظیم‌کننده‌های ولتاژ می‌باشند، بکار گرفته می‌شود. از آن جایی که این مدل در صنعت بسیار بکار گرفته شده است در زمانی که اطلاعات مربوط به سایر نوع‌های سیستم تحریک در دست نباشد و یا مدل ساده‌ای از سیستم تحریک dc مورد نیاز باشد از این مدل استفاده می‌گردد. ورودی اصلی این مدل ولتاژ خروجی، V_c ، است که از ترانس‌دیوسر ولتاژ ترمینال و جبران ساز بار گرفته می‌شود.



شکل ۲-۴: تحریک کننده با کموتاتور DC-DC نوع DC1A

در قسمتی که ولتاژها با یکدیگر جمع می‌شوند، خروجی ترانس دیوسر ولتاژ ترمینال (V_C) از مرجع تنظیم شده ولتاژ (V_{REF}) کم می‌شود. ولتاژ فیدبک پایدار ساز (V_F) هم از حاصل کاسته می‌گردد و در نهایت با اضافه شدن ولتاژ پایدار ساز سیستم قدرت (V_S)، ولتاژ خطا ساخته می‌شود. در حالت دائمی ولتاژهای فیدبک و پایدار ساز سیستم قدرت صفر هستند. ثابت زمانی اصلی تنظیم کننده ولتاژ T_A و بهره آن K_A می‌باشد. همراه تنظیم کننده ولتاژ، محدود کننده‌هایی هستند که نشان دهنده اشباع و یا محدوده‌های تأمین توان تقویت کننده^۱ می‌باشند. ثوابت زمانی T_B و T_C ممکن است به منظور مدل کردن ثوابت زمانی معادل در تنظیم کننده‌های ولتاژ بکار گرفته شوند ولی این ثابت‌های زمانی اغلب کوچک هستند و می‌توان از آن صرف نظر نمود.

خروجی تنظیم کننده ولتاژ، V_R ، به منظور کنترل تحریک کننده که ممکن است به صورت تحریک مجزا یا خود تحریک باشد بکار گرفته می‌شود. زمانی که میدان شنت به صورت خود تحریک مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقدار K_E نشان دهنده مقدار تنظیمی رئوستای شنت میدان است.

اکثر تحریک کننده‌ها از میدان‌های شنت خود تحریک به همراه تنظیم کننده‌های ولتاژی که به طور معمول در حالت افزایشنده-کاهنده^۲ قرار دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بعضی کاربردها مقدار K_E صفر

^۱ amplifier

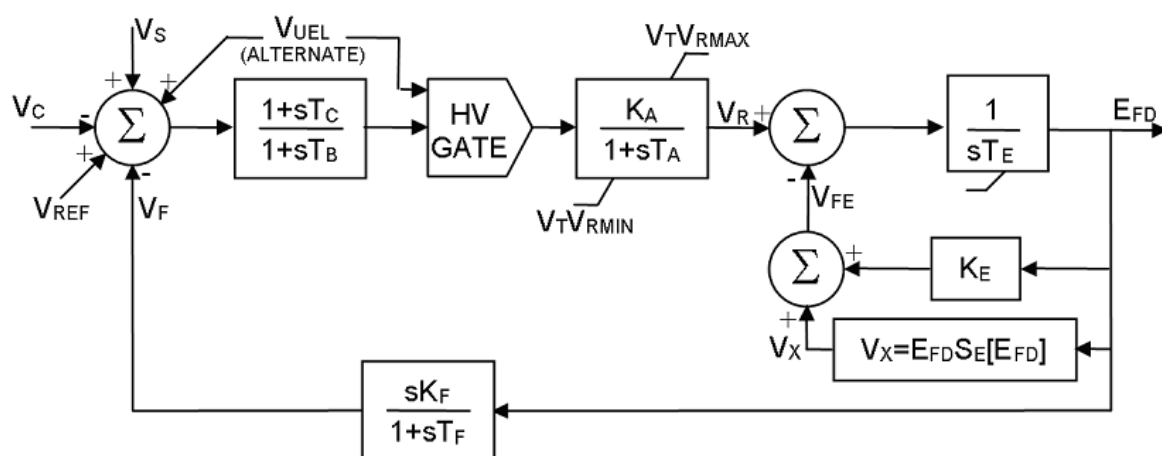
^۲ buck-boost

برای حالت خود تحریک بکار گرفته می‌شود. همچنین در بسیاری از آن‌ها مقدار K_E ثابت می‌باشد. این مقدار به صورتی انتخاب می‌شود که خود تحریکی در حالتی نزدیک شرایط نامی باشد. مقدار K_E برابر با یک به منظور نشان دادن تحریک‌کننده‌ها با تحریک مجزا بکار گرفته می‌شود. تابع $S_E[E_{FD}]$ یک تابع غیرخطی برای در نظر گرفتن اثر اشباع می‌باشد و معمولاً از تابع نمایی برای نمایش آن استفاده می‌شود. خروجی این بلوک اشباع، V_X ، حاصل ضرب ولتاژ تحریک E_{FD} در مقدار تابع اشباع $S_E[E_{FD}]$ در همان ولتاژ تحریک است.

سیگنال پایدارساز سیستم تحریک با نمونه‌گیری از ولتاژ میدان، V_F ، و از طریق فیدبک با بهره K_F و ثابت زمانی T_F ساخته می‌شود.

۲-۱-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع DC2A

مدلی که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است به منظور نشان دادن تحریک‌کننده‌های کموتاتور dc کنترل شونده با میدان به همراه تنظیم‌کننده‌های ولتاژ با عملکرد پیوسته که منبع تغذیه‌ی آن‌ها ژنراتور و یا باس کمکی است، بکار گرفته می‌شود. تفاوت این مدل با مدل $DC1A$ فقط در محدودکننده‌های خروجی تنظیم کننده ولتاژ می‌باشد که در این حالت حدود اعمالی متناسب با ولتاژ ترمینال ژنراتور، V_T ، هستند.



شکل ۲-۵: تحریک‌کننده با کموتاتور DC- نوع DC2A با تغذیه تنظیم‌کننده ولتاژ از باس

۲-۴-۱-۳ مدل سیستم تحریک نوع DC3A

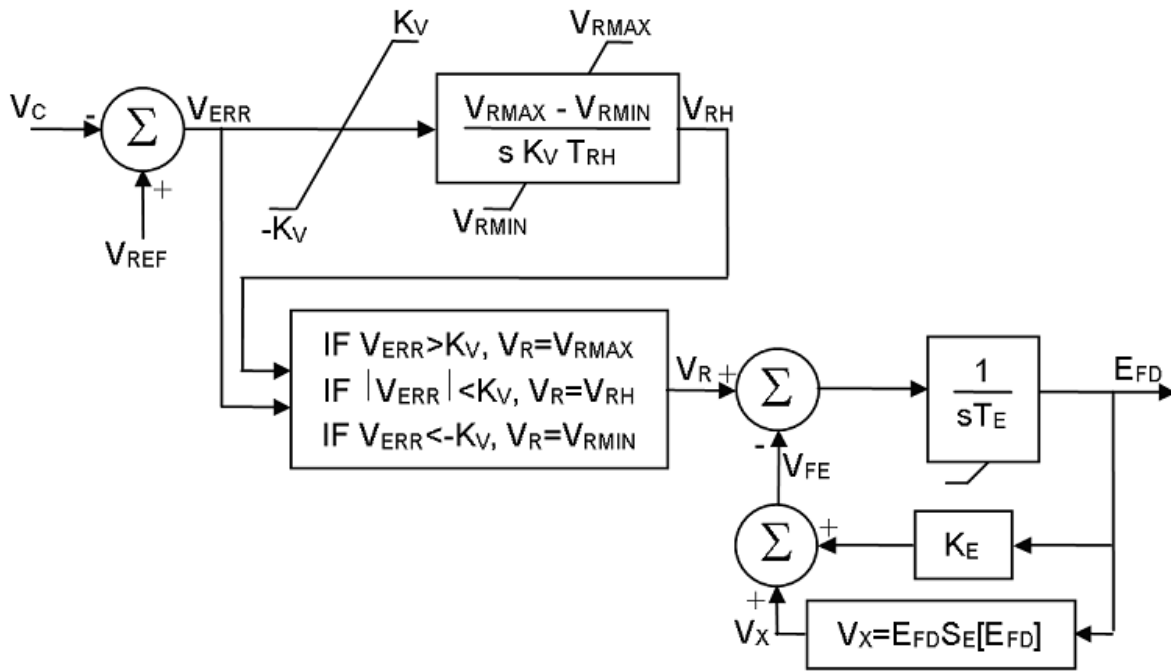
سیستمی که در قسمت قبل توضیح داده شد نشان‌دهنده نسل اول منابع تحریک با سرعت بالا و بهره زیاد می‌باشد. مدل DC3A نشان‌دهنده سیستم‌های قدیمی‌تر، به خصوص تحریک‌کننده‌هایی با کموتاتور dc به همراه تنظیم‌کننده‌هایی با عملکرد گسسته می‌باشد که قبل از نوع پیوسته‌ی آن به طور معمول استفاده می‌شدند.

پاسخ‌دهی این سیستم‌ها بسته به مقدار خطای ولتاژ، با دو سرعت مختلف انجام می‌پذیرد. برای خطاهای کوچک، تنظیم به صورت متناوب با اعمال سیگنالی به موتور گرداننده رئوستا انجام می‌گیرد. خطاهای بزرگ‌تر باعث می‌شوند که مقاومت‌ها به سرعت اتصال کوتاه و یا وارد مدار شوند و سیگنال بزرگی به تحریک‌کننده اعمال شود. در شکل ۲-۶ تحریک‌کننده به مانند سیستم‌های قبلی عمل می‌کند. توجه داشته باشید که پایدارساز سیستم تحریک استفاده نشده است.

بسته به مقدار خطای ولتاژ، $V_{REF}-V_C$ ، حالت‌های مختلف تنظیم‌کننده به وقوع می‌پیوندد. اگر مقدار خطای ولتاژ از مقدار تنظیمی K_V مربوط به افزایش یا کاهش سریع^۱ (معمولاً ۵٪) بیشتر باشد، V_{RMAX} و یا V_{RMIN} بسته به علامت خطای ولتاژ، به تحریک‌کننده اعمال می‌شوند. اگر مقدار خطای ولتاژ از K_V کمتر باشد ورودی تحریک‌کننده برابر با مقدار تنظیم‌شده رئوستا (V_{RH}) می‌شود.

بسته به علامت خطا، مقدار تنظیمی رئوستا درجه بالا یا پایین پیدا می‌کند. زمان گذار که نشان‌دهنده حرکت پیوسته موتور گرداننده رئوستا می‌باشد برابر با T_{RH} است. محدودکننده‌ای که دور این بلوک قرار گرفته است نشان‌دهنده این حقیقت است که در زمانی که رئوستا به هر یک از محدوده‌هایش می‌رسد آمادگی این را دارد که به سرعت آن را اعمال کند.

¹ Fast raise/lower



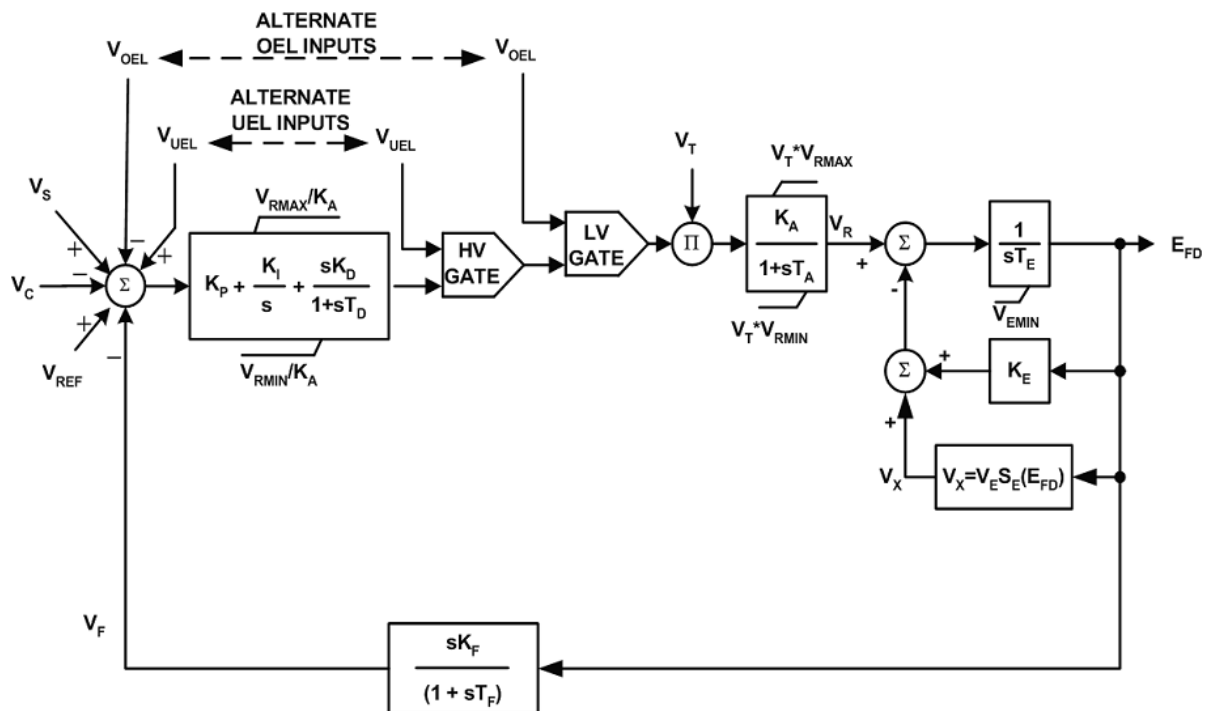
شکل ۶-۲: تحریک کننده با کموتاتور DC - نوع DC3A

فرض های مدل در خصوص حدود مربوط به افزایش/کاهش سریع همانند محدودیت های رئوس تا می باشند.

۴-۱-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع DC4B

شکل ۷-۲ نمایش دهنده نوع جدیدتر سیستم تحریک مستقیم می باشد. در این نوع نیز همانند نوع DC2A از تحریک کننده با کموتاتور dc کنترل شونده با میدان به همراه تنظیم کننده های ولتاژ با منبع تغذیه ای از ژنراتور و یا باس های کمکی استفاده می شود. تفاوت آن با دیگر مدل ها جایگزینی کنترلرها و حدود اعمالی می باشد. همچنین در مقایسه با سایر مدل ها از یک تنظیم کننده ولتاژ به صورت بلوک کنترلی تناسبی-انتگرالی-دیفرانسیلی^۱ (PID) بهره می برد. مدل مناسب PSS برای این مدل تحریک، مدل PSS2B است.

¹ Proportional-integral-differential



شکل ۷-۲: تحریک کننده با کموتاتور DC- نوع DC4B

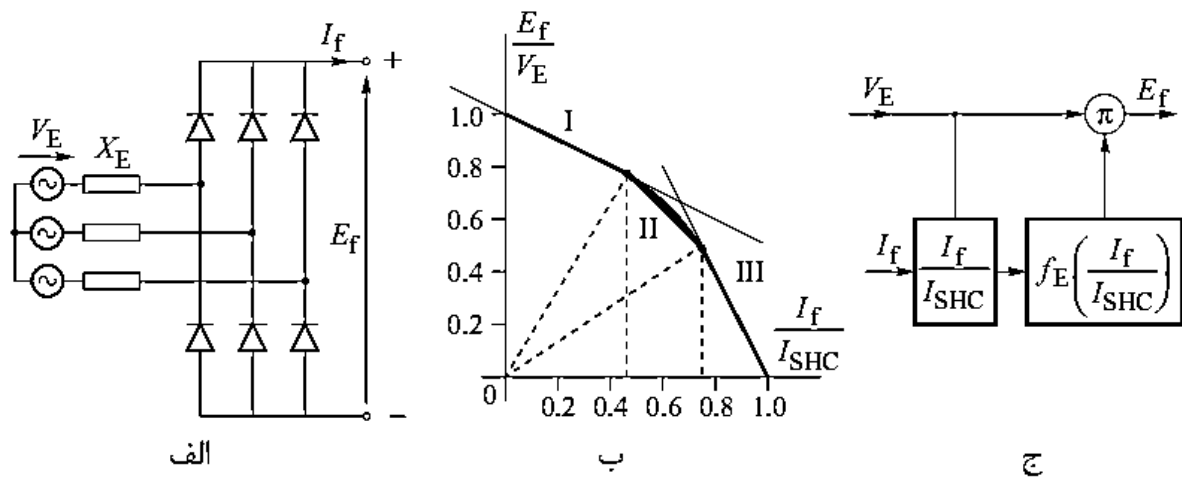
۲-۴-۲ سیستم‌های تحریک به همراه یکسو ساز و تغذیه شده از منبع جریان متناوب-

نوع AC

در این سیستم‌های تحریک از یک منبع متناوب و همچنین یکسو کننده‌های ساکن یا گردان برای تولید میدان dc مورد نیاز استفاده می‌گردد. اثرات بار روی این چنین تحریک کننده‌هایی قابل ملاحظه است و استفاده از جریان میدان ژنراتور به عنوان ورودی مدل‌ها اجازه نمایش دقیق این اثرات را می‌دهد. اگر از این مدل در محاسبه‌ی پیش فازی شبکه برای تنظیم PSS استفاده شود، انجام یک بررسی جزئی تر درباره‌ی ماشین ac مورد نیاز است.

در این مدل‌ها سیگنال V_{FE} متناسب با جریان میدان تحریک کننده، از مجموع سیگنال‌های ولتاژ خروجی تحریک کننده، V_E ، ضربدر $K_E + S_E[V_E]$ (که S_E تابع اشباع می‌باشد) و همچنین مؤلفه $K_D I_{FD}$ (که K_D مؤلفه‌ی ضد مغناطیسی می‌باشد) بدست می‌آید. در بعضی مدل‌ها، V_{FE} سیگنال جریان میدان تحریک کننده به عنوان ورودی بلوک پایدارساز سیستم تحریک با خروجی V_F بکار می‌رود.

معمولاً این نوع تحریک‌کننده‌ها از یکسو ساز ۳ فاز شامل ۶ دیود بهره می‌برند (شکل ۲-۸-الف). یکسو ساز از یک منبع AC ۳ فاز با ولتاژ V_E و راکتانس X_E تغذیه می‌شود. ولتاژ خروجی تحریک به مشخصه‌ی کموتاسیون^۱ یکسو ساز وابسته است. اثر کموتاسیون وابسته به جریان عبوری از یکسو ساز و راکتانس آن (X_E)، در سه حالت اصلی تقسیم می‌شود. می‌توان این حالت‌ها را به صورت تابعی از جریان میدان بیان کرد (شکل ۲-۸-ب). همان‌طور که از شکل ۲-۸-ج پیداست برای در نظر گرفتن اثر کموتاسیون در مدل‌سازی‌ها، می‌بایست عددی متناسب با یکی از این سه حالت در ولتاژ V_E ضرب شود تا مقدار واقعی ولتاژ خروجی تحریک E_f محاسبه شود. این عدد از محاسبه‌ی نسبت جریان میدان (I_f) به جریان اتصال کوتاه یکسو ساز (I_{sh})، و تطبیق آن با دیاگرام ولتاژ-جریان شکل ۲-۸-ب بدست می‌آید [۴۴].



شکل ۲-۸: اثر یکسو ساز کنترل نشده‌ی سه فاز بر خروجی تحریک‌کننده. الف: مدار معادل یکسو ساز. ب: مشخصه جریان ولتاژ. ج: بلوک دیاگرام مربوط به اثر یکسو ساز در مدل‌سازی تحریک [۴۴]

مدل‌هایی از سیستم‌های تحریک متناوب که در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت عبارتند از:

AC1A, AC2A, AC3A, AC4A, AC5A, AC6A و AC8B.

۲-۴-۱-۲ مدل سیستم تحریک نوع AC1A [۳۹]

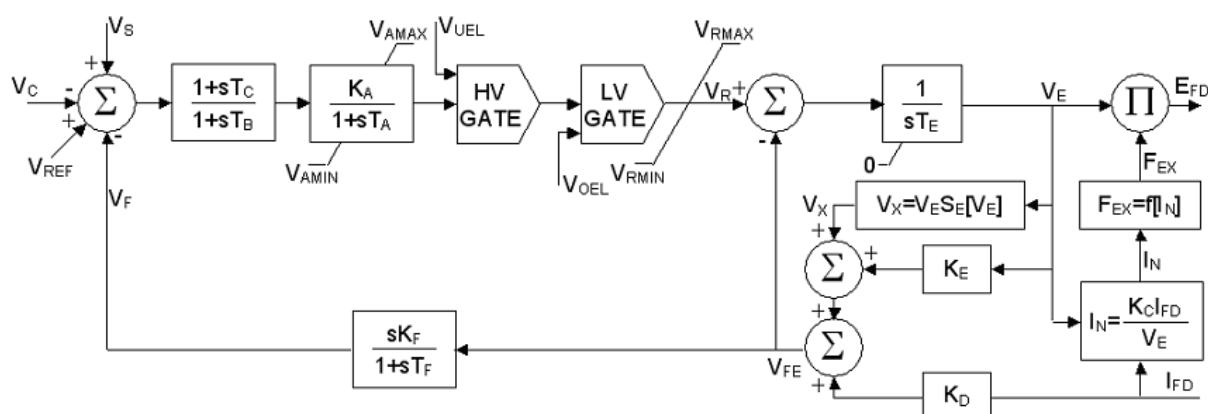
مدلی که در شکل ۲-۹ نشان داده شده است مربوط به مدل سیستم تحریک کنترل شونده با میدان به همراه یکسو ساز گردان و از نوع AC1A است. این نوع از سیستم‌های تحریک شامل یک مولد جریان

¹ commutation

متناوب اصلی به همراه یکسو ساز غیرقابل کنترل می‌باشند. تحریک‌کننده دارای خاصیت خود تحریکی نمی‌باشد و توان مورد نیاز تنظیم‌کننده ولتاژ از منبعی که تحت تأثیر حالات گذرا خارجی قرار نمی‌گیرد تأمین می‌شود. همان‌طوری که در شکل نشان داده شده است، وجود دیود در تحریک‌کننده باعث اعمال حد پایینی صفر به خروجی تحریک‌کننده می‌شود.

اثر مغناطیس زدایی جریان بار، I_{FD} ، روی ولتاژ خروجی تحریک‌کننده متناوب، V_E ، از طریق فیدبک با بهره K_D اعمال می‌شود. این ثابت به صورت تابعی از تحریک‌کننده‌ی ماشین سنکرون و راکتانس‌های گذرا تعریف می‌شود. افت ولتاژ خروجی تحریک‌کننده به علت رگولاسیون یکسو ساز^۱، با اعمال ضریب K_C (تابعی از راکتانس کموتاسیون) و منحنی رگولاسیون یکسو ساز شبیه‌سازی می‌شود.

در مطالعات پایداری مربوط به سیستم‌های قدرت بزرگ، می‌توان از مدل ساده شده‌ی این مدل برای سیستم تحریک ماشین سنکرون بهره برد.



شکل ۲-۹: سیستم تحریک به همراه یکسو ساز و منبع جریان متناوب با فیدبک از جریان میدان تحریک‌کننده- نوع AC1A

۲-۲-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع AC2A [۳۹]

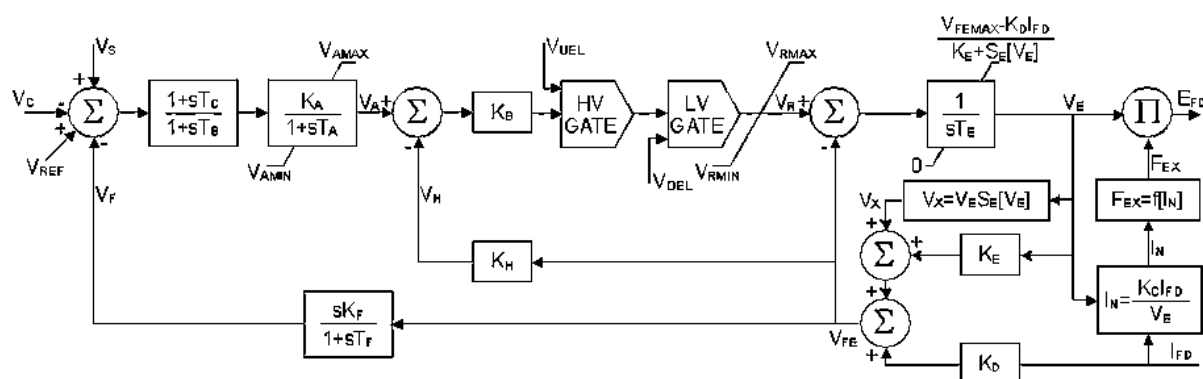
شکل ۲-۱۰ نمایش‌دهنده سیستم تحریک نوع AC2A می‌باشد. این تحریک‌کننده کنترل شونده با میدان است و از یک یکسو ساز نوع گردان برای تغذیه‌ی میدان dc استفاده می‌کند. مدل AC2A مانند مدل

¹ Rectifier regulation

AC1A می‌باشد. تفاوتی که این مدل با مدل AC1A دارد وجود المان‌های محدودکننده جریان میدان تحریک‌کننده و همچنین جبران سازی ثابت زمانی تحریک‌کننده است

جبران سازی ثابت زمانی تحریک‌کننده که شامل فیدبک منفی، V_H ، حول ثابت زمانی میدان تحریک‌کننده است، با کاهش جریان موثر آن، سبب افزایش پهنای باند پاسخ فرکانس پایین سیستم تحریک می‌شود. ثابت زمانی در حلقه‌ی جبران سازی با فاکتوری متناسب با حاصل ضرب K_B و K_H کاهش پیدا می‌کند.

به منظور دستیابی به پاسخ اولیه سریع با این سیستم، ولتاژ اعمالی زیادی V_{RMAX} به میدان تحریک‌کننده اعمال می‌گردد. محدودکننده‌ای به جریان میدان تحریک‌کننده اعمال می‌گردد و به این ترتیب ولتاژ خروجی تحریک‌کننده، V_E ، هم در مقداری که توسط پاسخ نامی سیستم تحریک تعیین می‌شود محدود می‌گردد.

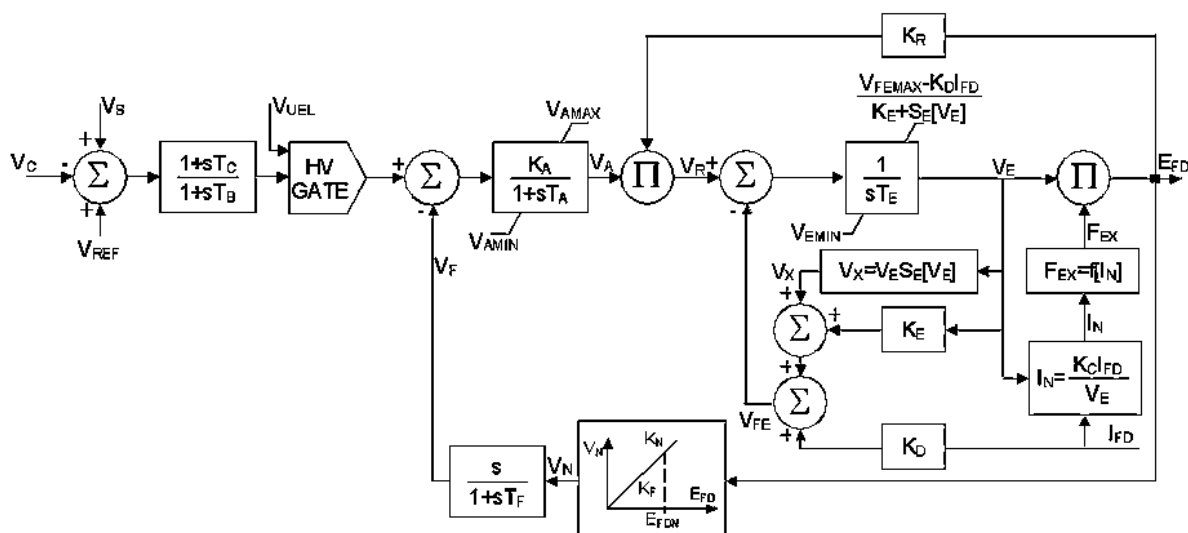


شکل ۲-۱۰ : سیستم تحریک با پاسخ اولیه سریع به همراه یکسو ساز کنترل نشده و منبع جریان متناوب با فیدبک از جریان میدان - نوع AC2A

۲-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع AC3A [۳۹]

مدلی که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است مربوط به سیستم تحریک AC نوع AC3A است. این سیستم شامل یک تحریک‌کننده متناوب با یکسو سازهای کنترل نشده است. تحریک‌کننده در این مدل به صورت خود تحریک است و توان تنظیم‌کننده ولتاژ از ولتاژ خروجی تحریک‌کننده تأمین می‌گردد. لذا این سیستم به صورت یک سیستم غیرخطی است که با استفاده از یک ضرب کننده که ورودی‌های آن سیگنال

فرمان تنظیم کننده ولتاژ V_A و ولتاژ خروجی تحریک کننده E_{FD} ضربدر بهره K_R است، شبیه سازی می شود. این مدل قابل اعمال به سیستم های تحریکی که از تنظیم کننده های ولتاژ استاتیک استفاده می کنند می باشد.



شکل ۲-۱۱: تحریک کننده با یکسو ساز و منبع جریان متناوب به همراه محدودکننده جریان میدان- نوع AC3A

در مطالعات پایداری سیستم های قدرت بزرگ، از مدل ساده شده ی تحریک کننده های متناوب ماشین سنکرون استفاده می شود.

اثر مغناطیس زدایی جریان بار (I_{FD}) بر روی ولتاژ خروجی تحریک کننده، V_E ، از طریق مسیر فیدبک دارای بهره ثابت، K_D ، که تابعی از راکتانس های گذرا و سنکرون منبع جریان متناوب تحریک کننده است، در نظر گرفته می شود.

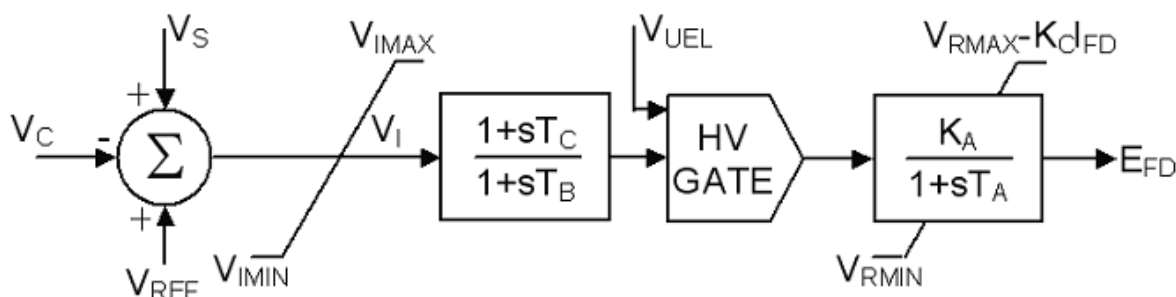
افت ولتاژ خروجی تحریک کننده به علت رگولاسیون یکسو ساز با بکار گیری ثابت K_C که تابعی از راکتانس کموتاسیون است و منحنی رگولاسیون F_{EX} شبیه سازی می شود.

پایدارساز سیستم تحریک در این مدل دارای خاصیت غیرخطی است. برای خروجی تحریک کمتر از E_{FDN} بهره این مسیر K_F است. و هنگامی که خروجی تحریک کننده از E_{FDN} بیشتر شود، مقدار بهره برابر با K_N می شود.

۴-۲-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع AC4A [۳۹]

سیستم تحریک متناوب نوع AC4A که دارای یکسو ساز کنترل شده می‌باشد، به طور کل نسبت به سایر انواع سیستم‌های AC متفاوت می‌باشد. این سیستم تحریک با پاسخ اولیه‌ی سریع، از یک پل کامل ترستوری در مدار خروجی تحریک‌کننده استفاده می‌کند.

تنظیم‌کننده ولتاژ زاویه‌ی آتش پل ترستوری را بر عهده دارد. تحریک‌کننده از یک تنظیم‌کننده ولتاژ مستقل، برای کنترل ولتاژ خروجی‌اش در یک مقدار ثابت استفاده می‌کند. این اثرات در مدل گنجانده نشده‌اند هرچند که اثرات بارگذاری گذرا روی منبع تحریک‌کننده لحاظ شده‌اند. می‌توان اثرات بارگذاری را با استفاده از جریان بار تحریک‌کننده و راکتانس کموتاسیون برای اصلاح حدود سیستم تحریک در نظر گرفت. پایداری سیستم تحریک در سیستم‌های ترستوری به جای فیدبک، با شبکه پیش فاز- پس فاز سری انجام می‌شود. ثابت‌های زمانی T_B و T_C اجازه شبیه‌سازی این تابع کنترلی را می‌دهند. بهره و ثابت زمانی معادل برای تنظیم‌کننده و یا مربوط به آتش ترستورها توسط ضرایب K_A و T_A شبیه‌سازی می‌شود.

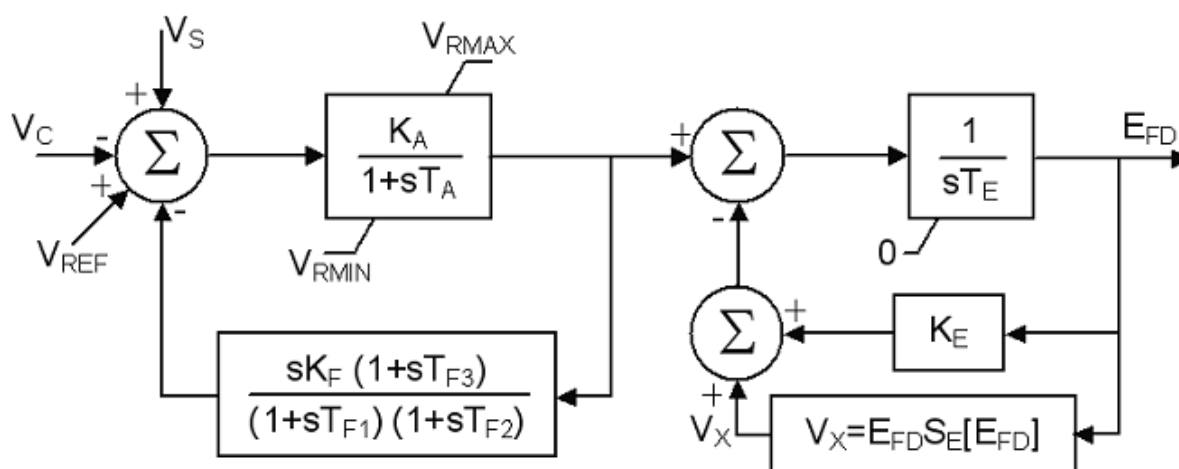


شکل ۲-۱۲: تحریک‌کننده با منبع تغذیه‌ی متناوب به همراه یکسو ساز قابل کنترل- مدل AC4A

۵-۲-۴-۲ مدل سیستم تحریک نوع AC5A [۳۹]

شکل ۲-۱۳ مدل ساده شده‌ای برای سیستم‌های تحریک بدون جاروبک را نمایش می‌دهد. تنظیم‌کننده از منبعی مثل ژنراتور مغناطیس دائم که تحت تأثیر اغتشاشات سیستم قرار نمی‌گیرد، تغذیه می‌شود. از آن جایی که این مدل به طور گسترده در صنعت بکار گرفته شده است، گاهی اوقات به منظور نمایش

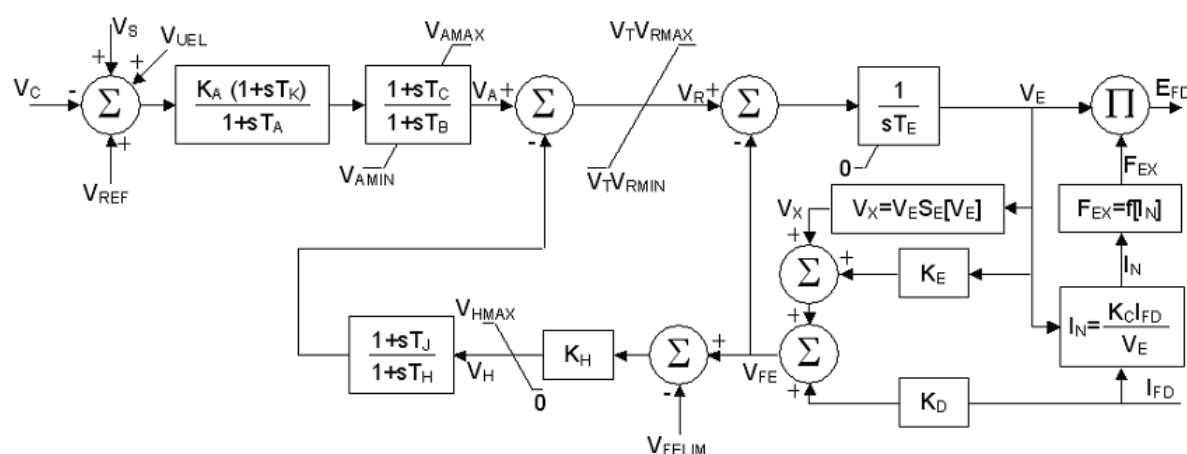
سیستم‌هایی که اطلاعات کامل آن‌ها در دسترس نیست و یا در مواردی که مدل‌های ساده شده‌ای مورد نیاز هستند استفاده می‌شود.



شکل ۲-۱۳: نمایش ساده شده سیستم تحریک با یکسو ساز دوار- نوع AC5A

۲-۴-۲-۶ مدل سیستم تحریک متناوب نوع AC6A [۳۹]

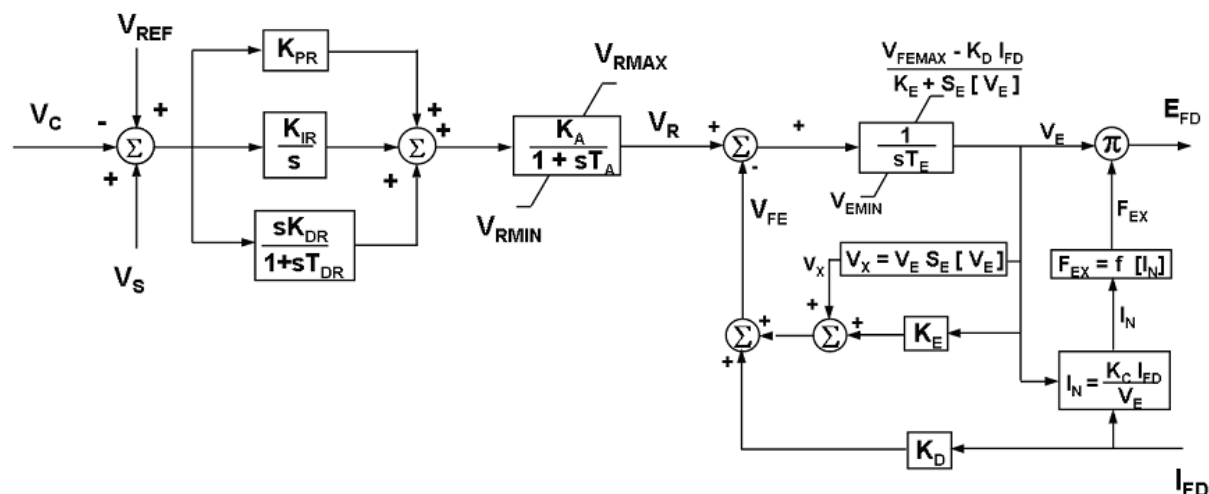
شکل ۲-۱۴ نمایی از سیستم‌های تحریک متناوب کنترل شونده با میدان به همراه یکسو ساز را نمایش می‌دهد. ماکزیمم خروجی تنظیم‌کننده، V_R ، تابعی از ولتاژ ترمینال، V_T ، است. همچنین به دلیل استفاده از پل دیودی، یکسو ساز مورد استفاده کنترل پذیر نمی‌باشد. تابع‌های کنترلی و حدود استفاده شده در این‌جا، در مدل‌های پیشین توضیح داده شده است.



شکل ۲-۱۴: نمایش ساده شده سیستم تحریک با یکسو ساز دوار- نوع AC6A

۷-۲-۴-۲ مدل سیستم تحریر یک متناوب نوع AC8B [۳۹]

بلوک دیاگرام این مدل در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است. تنظیم کننده‌ی ولتاژ در این مدل شامل یک بلوک PID، با ثابت‌های مجزای تناسبی (K_{PR})، انتگرالی (K_{IR})، و دیفرانسیلی (K_{DR}) می‌باشد. مقدار ثابت‌ها به منظور رسیدن به بهترین کارایی در هر سیستم تحریکی، انتخاب می‌شوند. نمای تحریک‌کننده‌ی بدون جاروبک (یعنی شامل پارامترهای T_E ، K_E ، S_E ، K_C ، K_D)، مشابه مدل نوع AC2A می‌باشد. همچنین از مدل AC8B می‌توان برای نمایش تنظیم‌کننده‌های استاتیکی ولتاژ با سیستم تحریک بدون جاروبک استفاده کرد. تنظیم‌کننده‌های دیجیتالی ولتاژ که تحریک‌کننده اصلی dc را تغذیه می‌کنند، با صفر کردن پارامترهای K_C و K_D در مدل AC8B نمایش داده می‌شوند. برای حالتی که توان ورودی ترستورها از ترمینال ژنراتور تغذیه می‌شود، حدود V_{RMAX} و V_{RMIN} باید تابعی از ولتاژ ترمینال باشند. در این حالت باید باس کمکی و یا تغذیه‌کننده‌ی PMG^1 که وظیفه‌ی تغذیه‌ی تنظیم‌کننده‌ی ولتاژ را از ترمینال سیستم بر عهده دارد، در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفت.



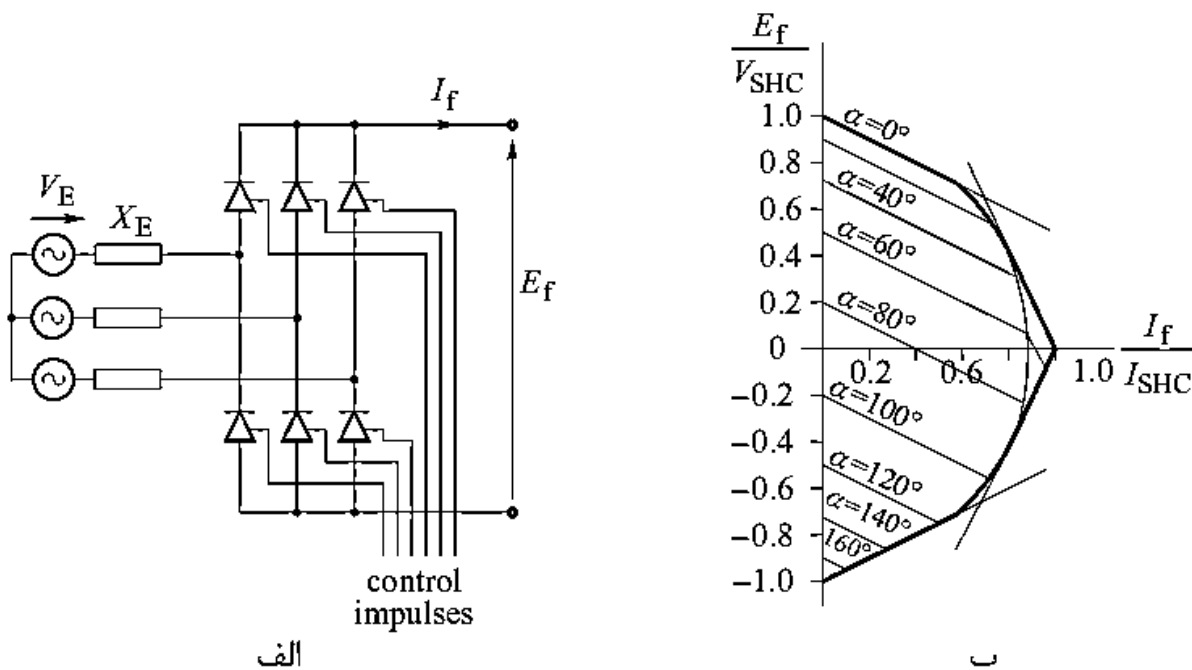
شکل ۲-۱۵: سیستم تحریک متناوب به همراه یکسو ساز - نوع AC8A

¹ Permanent Magnet Generator

۲-۴-۳ سیستم‌های تحریک استاتیک - نوع ST

در این نوع سیستم‌های تحریک، ولتاژ (همچنین جریان در سیستم‌های کمپوند) به سطح مناسبی رسانده می‌شوند. یکسو سازها، چه به صورت قابل کنترل و چه به صورت غیرقابل کنترل، فراهم کننده جریان مستقیم مورد نیاز برای میدان ژنراتور می‌باشند. ولتاژ سقف تحریک‌کننده برای بسیاری از سیستم‌های تحریک بسیار بالاست. برای این‌چنین سیستم‌هایی ممکن است مدارهای محدودکننده کمکی جریان میدان به منظور حفاظت از تحریک‌کننده و روتور ژنراتور استفاده شود. این مدارهای کمکی شامل المان‌های تأخیری و لحظه‌ای می‌باشند ولی این نوع از سیستم‌های تحریک فقط محدودکننده‌های لحظه‌ای را شامل می‌شوند (فقط برای مدل‌های ST1A و ST6B).

در سیستم‌های تحریک دارای یکسو ساز سه فاز کنترل شده با ۶ تریستور، مشخصه‌ی خروجی یکسو ساز وابسته به زاویه‌ی آتش α و مشخصه‌ی کموتاسیون سیستم به صورت شکل ۲-۱۶ خواهد بود. هنگامی که زاویه‌ی آتش برابر با صفر باشد، مشخصه‌ی خروجی همانند مشخصه‌ی یکسو ساز کنترل نشده در شکل ۲-۸-ب است. نکته‌ی مهم در این مشخصه قابلیت تولید ولتاژ منفی در خروجی تحریک‌کننده است. اگر چه ولتاژ خروجی ممکن است منفی شود ولی جهت شارش جریان همواره در یک جهت می‌باشد. با افزایش زاویه آتش، ولتاژ خروجی یکسو ساز کنترل شده متناسب با $\cos\alpha$ همانند شکل ۲-۱۶-ب کاهش می‌یابد [۴۴].



شکل ۲-۱۶: یکسو ساز تمام پل کنترل شده سه فاز. الف: مدار معادل. ب: مشخصه‌ی جریان ولتاژ [۴۵].

مدل‌هایی که در ادامه بررسی شده‌اند شامل ST1A، ST2A، ST3A و ST4B می‌باشند.

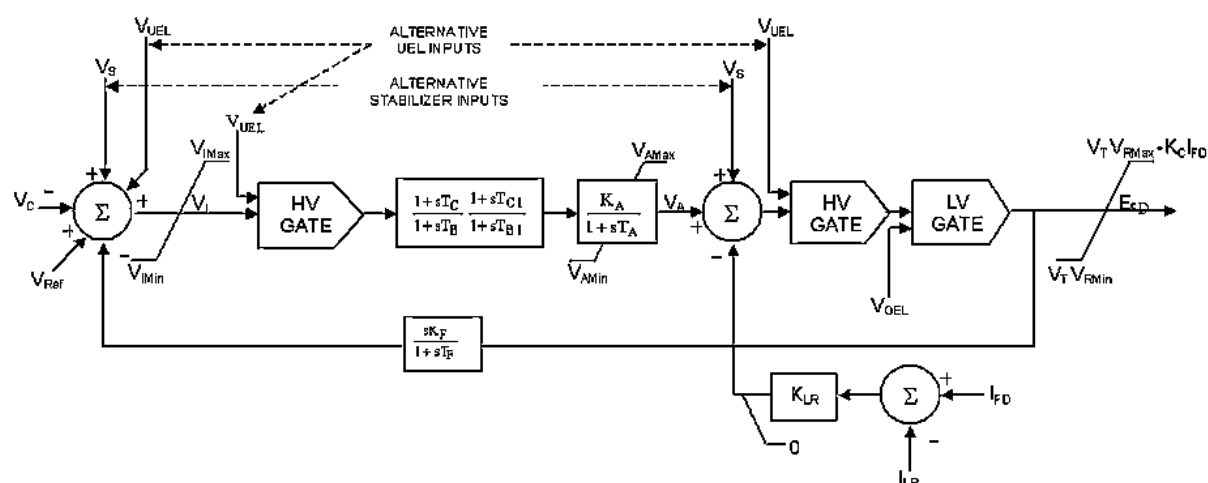
۲-۴-۳-۱ مدل سیستم تحریک استاتیک نوع ST1A [۳۹]

مدل سیستم تحریک استاتیک منبع ولتاژ با یکسو ساز کنترل شده نوع ST1A در شکل ۲-۱۷ نمایش داده شده است. در این سیستم‌ها توان تحریک از طریق ترانسفورمر ترمینال‌های ژنراتور (و یا باس کمکی واحد) تأمین می‌گردد و پس از آن از طریق یکسو ساز قابل کنترل تنظیم می‌شود. ماکزیمم مقدار ولتاژی که در این چنین سیستم‌هایی در دسترس است، وابسته به ولتاژ ترمینال ژنراتور می‌باشد. در این نوع سیستم تحریک، ثوابت زمانی اصلی مربوط به تحریک‌کننده بسیار کوچک هستند و ممکن است پایداری‌سازی تحریک مورد نیاز نباشد. به عبارت دیگر در این سیستم‌ها کاهش بهره گذاری مطلوب است. این مدل ارائه شده تطابق بسیار خوبی در جهت کاهش بهره گذرا در مسیر مستقیم از طریق تنظیم ثوابت T_B و T_C در جایی که K_F برابر با صفر تنظیم شده است و یا در مسیر فیدبک با انتخاب مناسب پارامترهای K_F و T_F دارد. بهره تنظیم‌کننده ولتاژ و ثابت زمانی سیستم تحریک به ترتیب با K_A و T_A نمایش داده می‌شود.

ثابت زمانی‌های T_{C1} و T_{B1} ، امکان افزایش بهره گذرا را فراهم می‌کند. در این حالت T_{C1} مایل است بزرگ‌تر از T_{B1} باشد.

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

در بسیاری از موارد، کران‌های داخلی روی V_I قابل صرف نظر کردن هستند. کران‌های ولتاژ میدان که تابعی از ولتاژ ترمینال و جریان میدان ماشین سنکرون هستند بایستی مدل سازی شوند. کران مثبت ولتاژ میدان به صورت تابع 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.



شکل ۲-۱۷: تحریک کننده با یکسو ساز قابل کنترل و منبع پتانسیل نوع ST1A

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

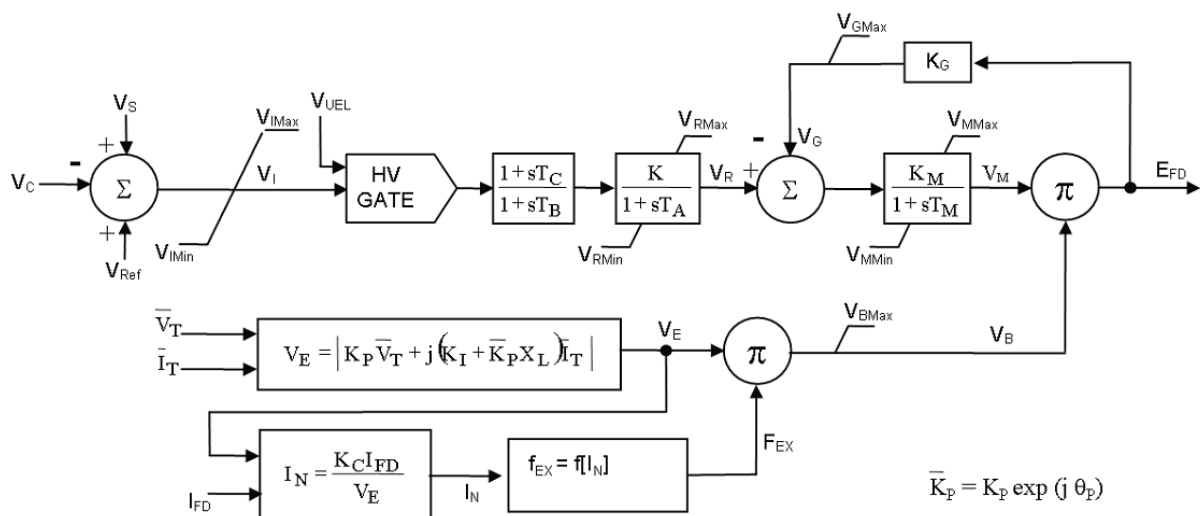
برخی از سیستم‌های استاتیک از هر دو منبع ولتاژ و جریان پایانه ژنراتور به منظور تشکیل منبع توان استفاده می‌کنند. این نوع از سیستم‌های تحریک به همراه یکسو ساز و منبع تغذیه کمپوند در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است. ضروری است که منبع تغذیه‌ای برای توان تحریک‌کننده با استفاده از ترکیب فازوری ولتاژ V_T و جریان I_T ترمینال ساخته شود. در شکل زیر E_{FDMAX} نشان‌دهنده کران روی ولتاژ تحریک‌کننده به علت اشباع در اجزای مغناطیسی می‌باشد. تنظیم‌کننده، کنترل خروجی تحریک‌کننده را از طریق کنترل اشباع اجزای ترانس قدرت بر عهده دارد و T_E ثابت زمانی مربوط به اندوکتانس سیم‌پیچی‌های کنترل است.

شکل ۲-۱۸: تحریک کننده با یکسو ساز و به همراه منبع کمپوند نوع ST2A

۲-۳-۳ مدل سیستم تحریک استاتیک نوع ST3A [۳۹]

شکل ۲-۱۹ سیستم تحریک نوع را نشان می‌دهد که در آن از حلقه کنترل ولتاژ میدان به منظور خطی سازی مشخصه کنترل تحریک کننده استفاده شده است. نتیجه‌ی این امر مستقل بودن خروجی از تغییرات منبع تغذیه تا زمانی که منبع به کران‌های خود نرسد می‌شود. این سیستم‌ها از طرح‌های یکسو ساز تمام کنترل شونده متنوعی استفاده می‌کنند. پل تمام ترستوری و یا پل‌های هیبرید در پیکربندی سری یا موازی از جمله این موارد هستند. منبع توان می‌تواند فقط شامل یک منبع ولتاژ باشد که از پایانه‌های ماشین و یا از سیم‌پیچی‌های داخلی تغذیه می‌شود. ممکن است در برخی از طرح‌ها منابع توان به صورت کمپوند هم از ولتاژ و هم از جریان ماشین استفاده کنند. این منابع توان به صورت ترکیب فازوری جریان و ولتاژ ترمینال ماشین با تخصیص پارامترهای مناسب در مدل نشان داده می‌شوند.

پایدارساز سیستم تحریک برای این سیستم‌ها با یک المان پیش فاز- پس فاز سری که در تنظیم کننده ولتاژ قرار می‌گیرد و توسط ثوابت زمانی T_B و T_C نمایش داده می‌شود تأمین می‌گردد. حلقه داخلی تنظیم کننده ولتاژ میدان شامل بهره‌های K_M و K_G و ثابت زمانی T_M می‌شود. ثابت زمانی T_M با توجه به هدف مطالعه می‌تواند افزایش پیدا کند که در این صورت از اضافه شدن محاسبات کوچک جلوگیری می‌شود. این در حالی است که در اطراف ۳ هرتز دقت مورد نظر باقی بماند. کران V_{BMAX} توسط سطح اشباع اجزای سیستم قدرت تعیین می‌شود.

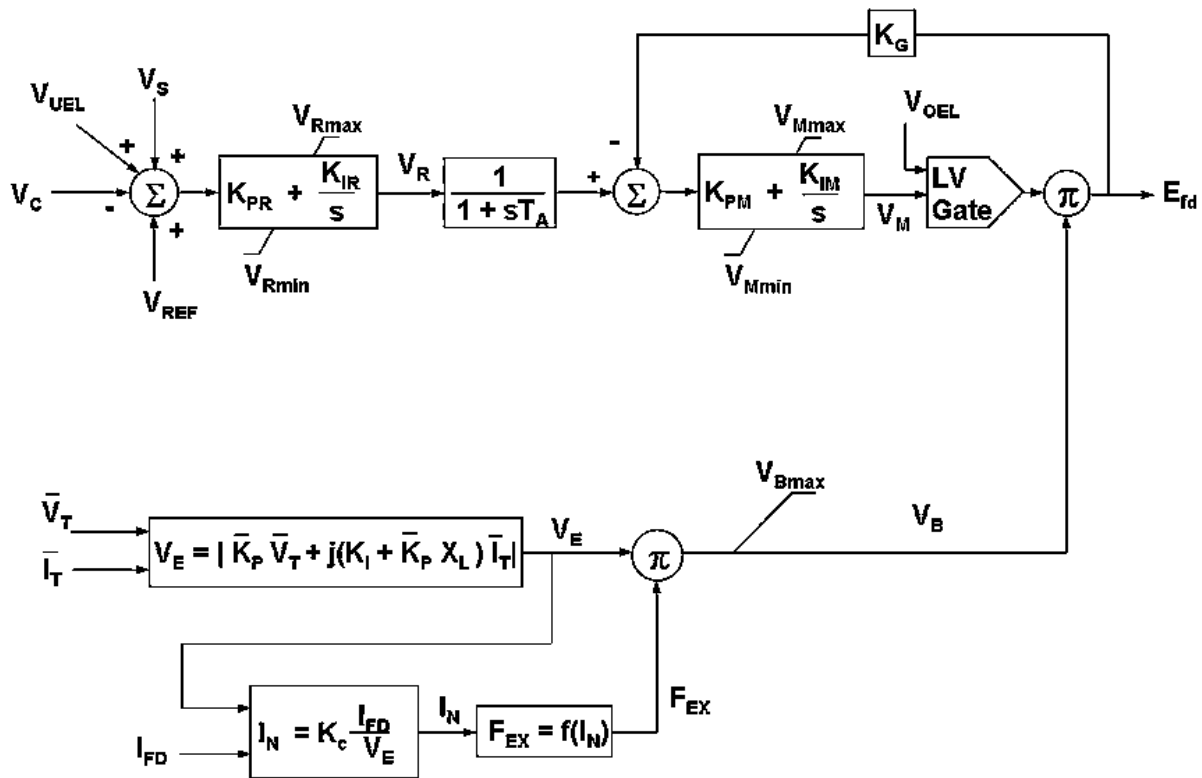


شکل ۲-۱۹: تحریک کننده با یکسو ساز قابل کنترل و منبع کمپوند به همراه حلقه کنترل ولتاژ میدان - مدل ST3A

۴-۳-۴-۲ مدل سیستم تحریک استاتیک نوع ST4A [۳۹]

تفاوتی که این مدل با مدل نوع ST3A دارد، جایگزینی مشخصه تنظیم‌کننده پیش فاز- پس فاز با یک بلوک تنظیم‌کننده انتگرالی- تناسبی می‌باشد. شکل ۲-۲۰ سیستم تحریک نوع ST4A با یکسو ساز و به همراه هر دو منبع ولتاژ و کمپوند را نمایش می‌دهد. تنظیم‌کننده ولتاژ این مدل به صورت دیجیتال می‌باشد و به همین علت است که نام مدل دارای پسوند B است. از دیگر ویژگی‌های این تنظیم‌کننده می‌توان به بهره کوچک حد OEL و اضافه شدن سیگنال کنترلی ولت بر هرتز و همچنین UEL به ورودی تنظیم‌کننده ولتاژ اشاره کرد.

منبع توان در این مدل انعطاف‌پذیری زیادی دارد بطوریکه با صفر شدن هر دو پارامتر K_I و X_L ، تبدیل به منبع ولتاژ و با صفر بودن تنها X_L به منبع کمپوند تبدیل می‌شود و در صورتی که هیچ‌کدام صفر نباشد هر دو منبع ولتاژ و کمپوند را خواهیم داشت. مدل مناسب PSS برای استفاده با تحریک ST4B، مدل PSS2B است.



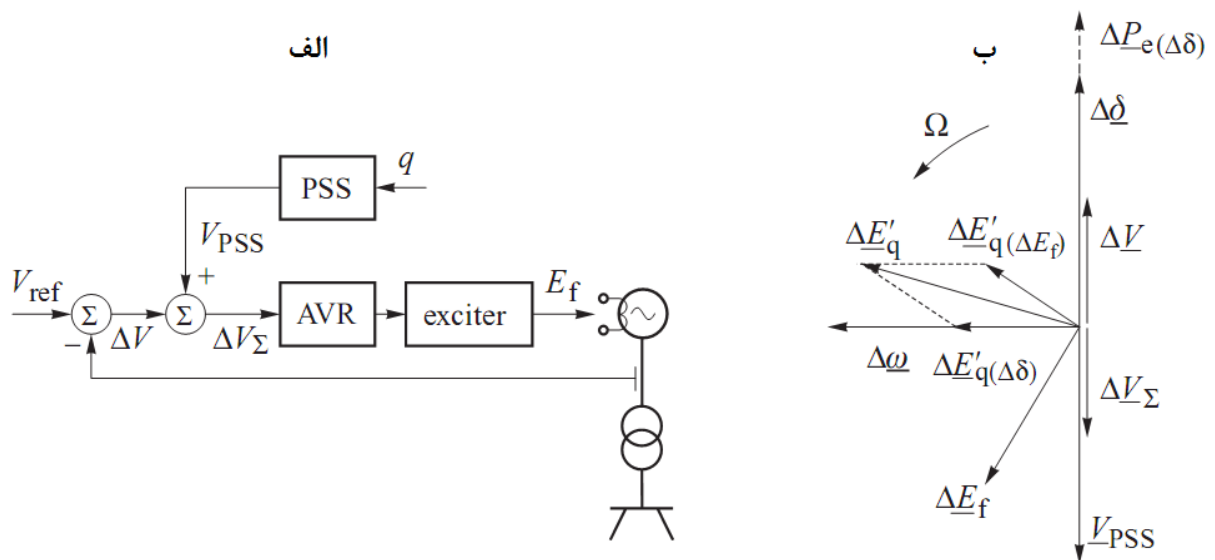
شکل ۲-۲۰: تحریک‌کننده با یکسو ساز قابل کنترل و به همراه منبع کمپوند یا منبع پتانسیل - مدل ST4A

فصل ۳

پایدار سازهای سیستم‌های قدرت

۳-۱ مقدمه

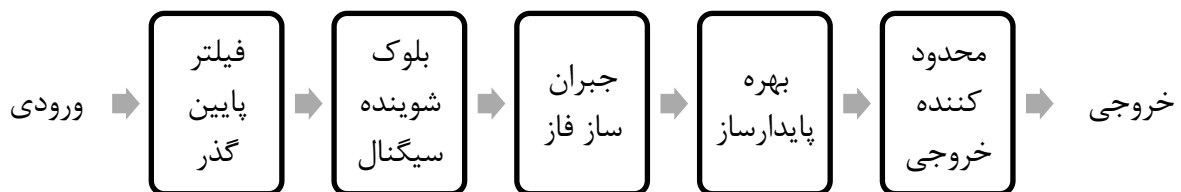
ایده‌ی اصلی استفاده از PSS، صفر بودن و یا نزدیک صفر بودن انحراف سرعت ژنراتور در حالت پایدار می‌باشد. با این حال در هنگام وقوع یک اغتشاش کوچک، سرعت ژنراتور دیگر ثابت نیست و در این حالت، روتور و انحراف ولتاژ (ΔV) دچار نوسان خواهند شد که این نوسان‌ها نتیجه‌ی تغییر انحراف زاویه‌ی روتور می‌باشد. وظیفه‌ی PSS در این حالت اضافه کردن سیگنالی برای جبران سازی نوسانات ΔV و به وجود آوردن یک مؤلفه‌ی میراکنندگی هم‌فاز با انحراف سرعت ($\Delta \omega$) می‌باشد. این امر در شکل ۳-۱ 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 ۳-۱-ب دیاگرام فازوری سیگنال‌ها در حالت اغتشاش را نمایش می‌دهد. فازور V_{PSS} دقیقاً مخالف ΔV می‌باشد و دامنه‌ی آن بزرگ‌تر است. در نتیجه فازور سیگنال‌های خطای ولتاژ کل ΔV_{Σ} نسبت به انحراف سرعت $\Delta \omega$ برخلاف حالت بدون PSS مثبت است. در نتیجه با توجه به شکل ۳-۱-ب گشتاور میراکنندگی مثبتی به سیستم اعمال می‌شود. توجه داشته باشد در صورتی که V_{PSS} کوچک‌تر از ΔV باشد، گشتاور میراکنندگی منفی خواهد بود [۴۴].



شکل ۳-۱: حلقه کنترلی اضافی (PSS) برای سیستم تنظیم‌کننده ولتاژ. الف: بلوک دیاگرام. ب: دیاگرام فازوری [۴۴].

۳-۲ نمایش ساختار پایدار سازهای سیستم قدرت

ساختار عمومی PSS در شکل زیر نمایش داده شده است. سیگنال ورودی که از ترمینال ژنراتور اندازه‌گیری می‌شود، پس از عبور از فیلترهای پایین و بالا گذر، به منظور دستیابی به شیفت فاز مورد نیاز از مؤلفه‌ی جبران ساز پیش فاز-پس فاز عبور داده می‌شود. و در نهایت پس از تقویت شدن و گذر از محدودساز نهایی، خروجی V_{PSS} ساخته می‌شود. در هنگام طراحی جبران‌ساز، لازم است به شیفت فازی سیگنال ورودی به سبب فیلترهای پایین و بالا گذر توجه شود. گاهی اوقات فیلترها به منظور رسیدن به شیفت فازی صفر در فرکانس نوسانات روتور تنظیم می‌شوند [۴۴].



شکل ۳-۲: مؤلفه‌های اصلی یک PSS [۴۴]

۳-۳ انواع سیستم‌های پایدارساز قدرت

مدل‌هایی که برای پایدارساز در این قسمت توضیح داده می‌شوند با مدل‌های مربوط به تحریک ارائه شده در فصل قبل سازگار می‌باشند و می‌توان از آن‌ها در بررسی‌های مربوط به عدم پایداری مدهای کنترلی که در فرکانس‌های پایین‌تر از ۳ هرتز رخ می‌دهند می‌باشند.

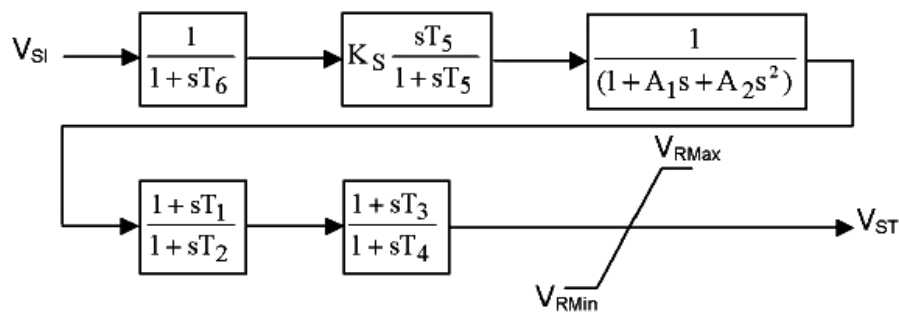
پارامترهای پایدارساز بایستی با نوع سیگنال ورودی به پایدارساز مطابقت داشته باشند. پارامترهای پایدارسازها با سیگنال‌های ورودی متفاوت ممکن است نسبت به یکدیگر بسیار متفاوت باشند در حالی که در نهایت مشخصه‌های میراکنندگی یکسانی را از خود به نمایش می‌گذارند.

در ادامه مدل‌های پایدارساز PSS1A، PSS2B، PSS3B و PSS4B معرفی خواهند شد.

۳-۳-۱ مدل پایدارساز سیستم قدرت نوع PSS1A [۳۹]

شکل ۳-۳ نشان‌دهنده قالب کلی PSS با یک ورودی است. برخی از سیگنال‌های ورودی رایج پایدارساز، V_{SI} ، عبارتند از سرعت، فرکانس و توان. پارامتر T_6 به منظور نمایش ثابت زمانی ترانس‌دیوسر استفاده می‌شود. بهره پایدارساز با K_S و ثابت زمانی مربوط به مدار شوینده سیگنال با T_5 نمایش داده شده است. در بلوک بعدی، A_1 و A_2 اجازه در نظر گرفتن برخی اثرات روی نوسانات فرکانس پایین مربوط به فیلترهای پیچشی فرکانس بالا را می‌دهند. دو بلوک بعدی نشان‌دهنده جبران سازی دو مرحله‌ای پیش فاز-پس فاز با ثابت‌های T_1 تا T_4 هستند. خروجی پایدارساز را می‌توان به چندین روش محدود کرد. می‌توان از حدود ساده خروجی پایدارساز V_{STMAX} و V_{STMIN} استفاده کرد. همچنین در بعضی از سیستم‌ها، حدود بر اساس ولتاژ خروجی ترمینال ژنراتور تعریف می‌شود و یا در بعضی دیگر، اگر خروجی ترمینال ژنراتور در باند انتخابی خود نباشد، خروجی پایدارساز حذف می‌شود.

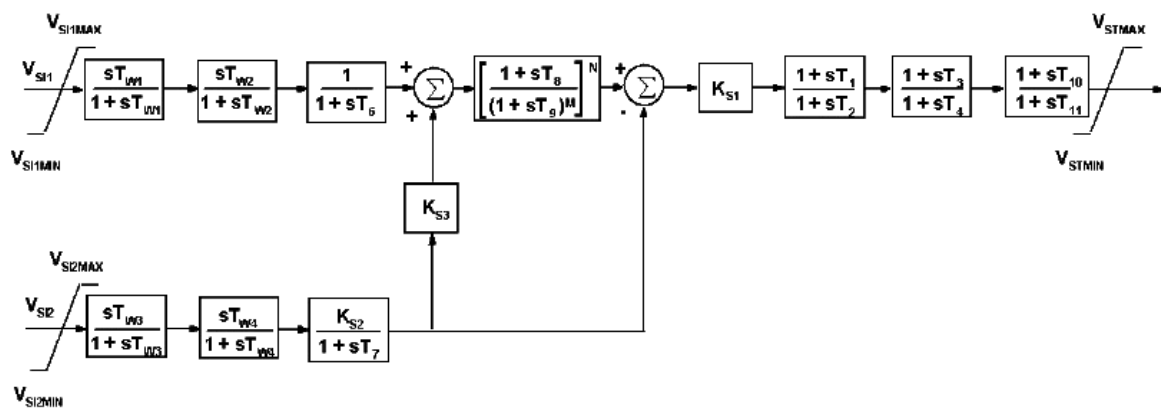
می‌توان از کنترلرهای گسسته کمکی با ورودی، خروجی پایدارساز، V_{ST} ، و خروجی V_S استفاده کرد. واضح است در جایی که از این مدل‌های کنترلی استفاده نشود، V_{ST} برابر با V_S می‌شود.



شکل ۳-۳: PSS با یک ورودی- مدل PSS1A

۲-۳-۳ مدل پایدارساز سیستم قدرت نوع PSS2B [۳۹]

مدل پایدارسازی که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است به منظور نمایش پایدار سازها با دو ورودی بکار می‌رود. این دو ورودی به طور معمول توان و سرعت یا فرکانس می‌باشند که سیگنال پایدارسازی از آنها ساخته می‌شود.



شکل ۴-۳: PSS با دو ورودی- مدل PSS2B

مدل فوق قابلیت نمایش دو نوع مجزا از پایدار سازها با دو ورودی را به شرح زیر دارد:

الف. پایدار سازهایی که در بازه نوسانات سیستم به عنوان پایدار سازهایی با ورودی توان الکتریکی عمل می‌کنند. این پایدار سازها از ورودی سرعت یا فرکانس برای تولید سیگنال توان مکانیکی معادل به منظور تولید سیگنالی کلی که به تغییرات توان مکانیکی حساسیت نداشته باشد استفاده می‌کنند.

ب. پایدار سازهایی که از ترکیب سرعت (یا فرکانس) و توان الکتریکی استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها از سرعت به صورت مستقیم (بدون استفاده از جبران سازی پیش فاز) استفاده می‌کنند و سیگنالی متناسب با توان الکتریکی برای دستیابی به سیگنال پایدارسازی مورد نظر اضافه می‌کنند.

در حالی که برای دو نوع پایدارساز با دو ورودی که در بالا توضیح داده شد از یک مدل استفاده می‌شود، پارامترهای مربوط به هر نوع نسبت به دیگری بسیار متفاوت خواهد بود. به ازای هر ورودی، دو بلوک شوینده نشان داده شده است ($T_{W1}-T_{W4}$) که این بلوک‌ها به همراه یک ترانسدیوسر یا انتگرال گیر با ثوابت زمانی T_6 و T_7 می‌باشند. برای اولین نوع از پایدارساز با دو ورودی، K_{S3} برابر با یک و K_{S2} برابر با $T_7/2H$ است که H ثابت اینرسی ماشین سنکرون می‌باشد. ورودی V_{SI1} نشان‌دهنده سرعت یا فرکانس و V_{SI2} نشان‌دهنده سیگنال توان می‌باشد. اندیس‌های M و N بسته به اینکه چه نوع فیلتری مورد استفاده قرار بگیرد تعیین می‌شود. به طور نمونه، $M=5$ و $N=1$ یا $M=2$ و $N=4$ انتخاب می‌شوند جبران سازی فاز با دو بلوک پیش فاز- پس فاز (T_1 تا T_4) انجام می‌شود. محدود سازی خروجی نیز همانند آنچه در مدل PSS1A شرح داده شد می‌باشد.

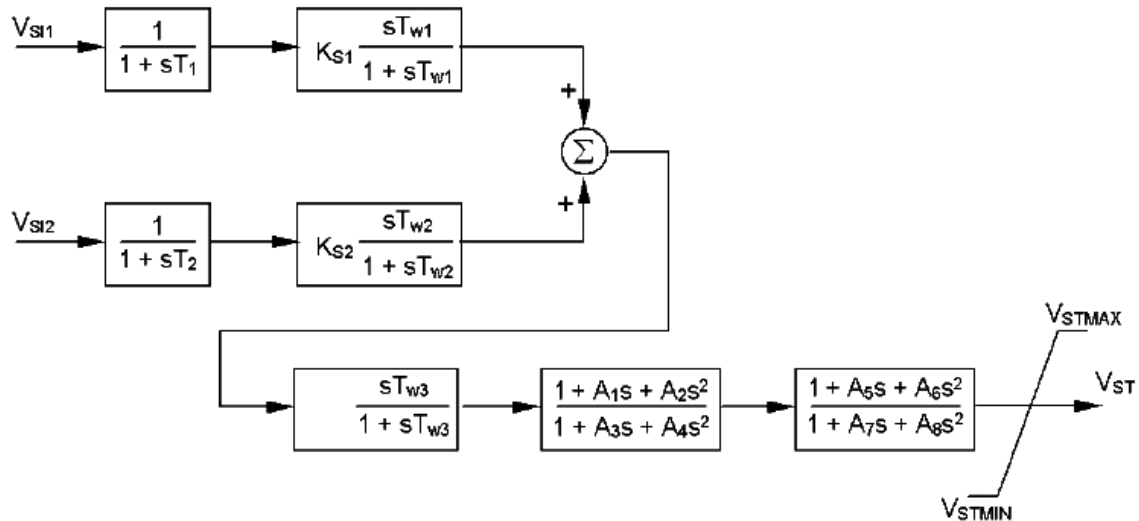
همچنین در این مدل نسبت مدل قدیمی آن، یک بلوک کمکی با ثابت زمانی پس فاز T_{11} و ثابت زمانی پیش فاز T_{10} به منظور مدل‌سازی پایدار سازهایی که دارای تابع پیش فاز- پس فاز سوم هستند بکار می‌رود.

در بسیاری از موارد، ممکن است از مدل ساده تک ورودی PSS1A با پارامترهای مناسب در جایی که مدل PSS2B با دو ورودی استفاده شده است، استفاده شود.

۳-۳-۳ مدل پایدارساز سیستم قدرت نوع PSS3B [۳۹]

مدل پایدارساز PSS3B دارای ۲ ورودی توان الکتریکی ($V_{SI1} = P_E$) و انحراف سرعت زاویه‌ای روتور ($V_{SI2} = \Delta\omega$) در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. این سیگنال‌ها به منظور بدست آوردن سیگنال توان

مکانیکی معادل بکار گرفته می‌شود. با ترکیب این سیگنال با توان الکتریکی، سیگنالی متناسب با توان شتاب دهنده تولید می‌گردد.

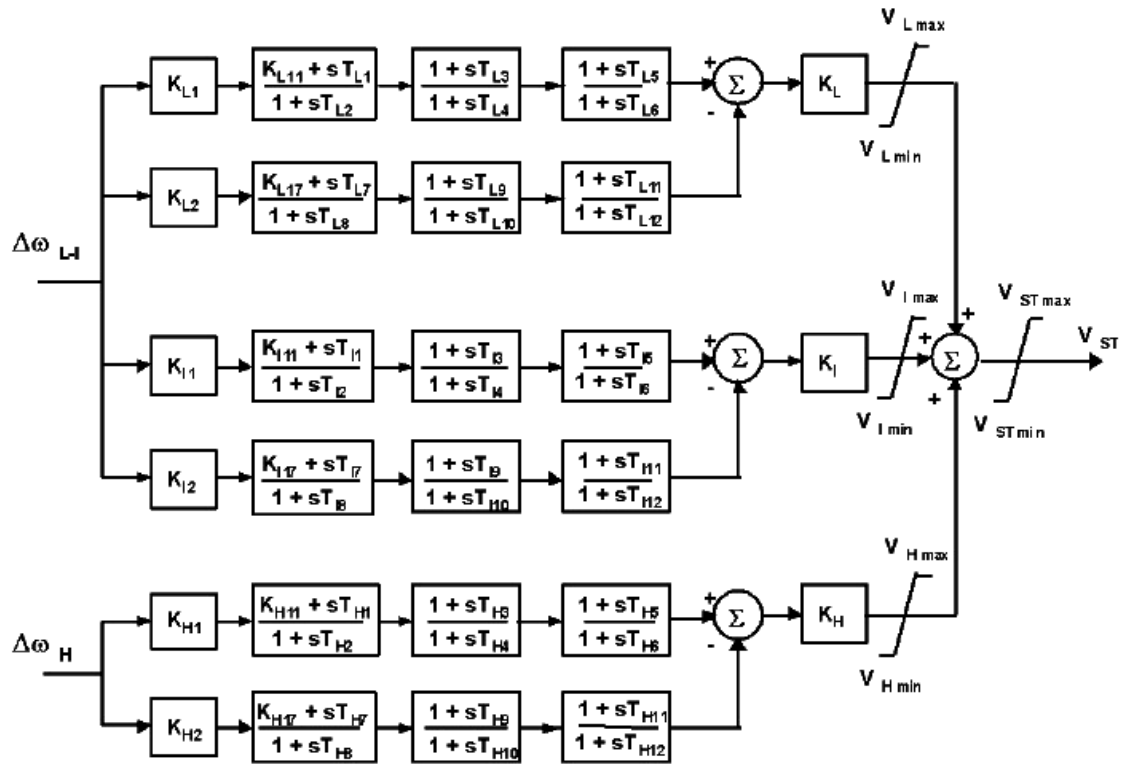


شکل ۳-۵: PSS با دو ورودی- مدل PSS3B

ثابت زمانی‌های T_1 و T_2 نشان‌دهنده ثوابت زمانی مربوط به ترانسدیوسر و ثوابت زمانی T_{W1} تا T_{W3} نشان‌دهنده ثوابت زمانی شوینده برای توان الکتریکی، سرعت زاویه‌ای روتور و توان مکانیکی بدست آمده می‌باشد. در این مدل سیگنال پایدارسازی V_{ST} از جمع برداری سیگنال‌های توان الکتریکی و انحراف سرعت زاویه‌ای روتور بدست می‌آید. دامنه و فاز مورد نظر سیگنال پایدارسازی با تطبیق پلاریته و اندازه بهره‌های K_{S1} و K_{S2} بدست می‌آید. جبران سازی فاز توسط دو فیلتر بعدی انجام می‌پذیرد (A_1 تا A_8). ماکزیمم مقدار تأثیر مجاز سیگنال پایدارسازی روی AVR با تنظیم کران‌های بالایی و پایینی V_{STMAX} و V_{STMIN} تنظیم می‌شود.

۴-۳-۳ مدل پایدارساز سیستم قدرت نوع PSS4B [۳۹]

همان‌طوری که در شکل ۳-۶ ملاحظه می‌شود این مدل نشان‌دهنده ساختاری بر پایه باندهای فرکانس کاری متنوع است. سه باند مجزای مربوط به مد نوسانی با فرکانس‌های بالا، میانی و پایین با ورودی انحراف سرعت زاویه‌ای ($\Delta\omega$) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

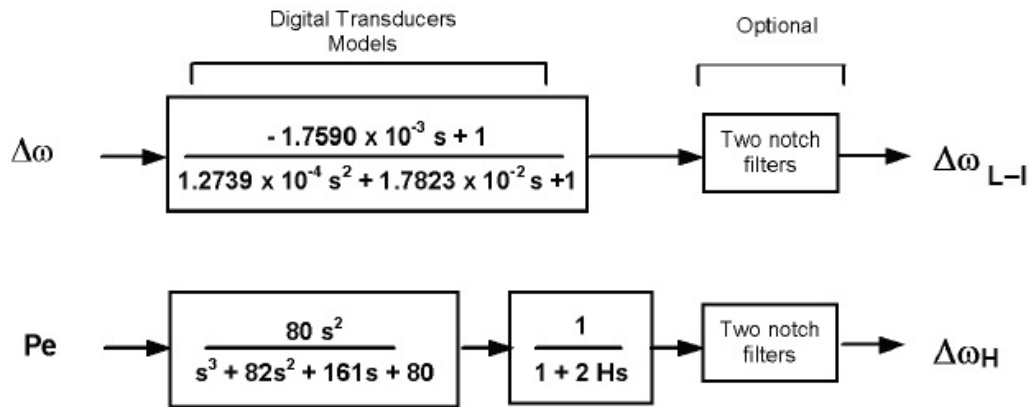


شکل ۳-۶: مدل PSS PSS4B

باند فرکانس پایین مربوط به مد سراسری سیستم قدرت است و باند فرکانس میانی مربوط به مدهای بین ناحیه‌ای و باند فرکانس بالا نیز مربوط به مدهای محلی می‌باشد. هر یک از سه باند دارای یک فیلتر دیفرانسیلی، بهره و محدودکننده می‌باشند. خروجی‌های آن‌ها با یکدیگر جمع می‌شوند و پس از عبور از محدودکننده نهایی V_{STMIN}/V_{STMAX} ، سیگنال خروجی PSS، V_{ST} ساخته می‌شود.

برای هر باند فرکانسی انحراف سرعت متفاوتی به عنوان ورودی استفاده می‌شود. در این مدل انحراف سرعت روتور را از دو راه اندازه‌گیری می‌شود. $\Delta\omega_{L-I}$ تغذیه‌کننده باندهای میانی و پایینی است در حالی که $\Delta\omega_H$ به باند فرکانس بالا اختصاص دارد. مدل معادل مدار تبدیل‌کننده این دو سرعت در شکل ۲-۷ آورده شده است. فیلتر قابل تنظیم $N_i(s)$ به صورت دلخواه برای مدهای پیچشی توربوژنراتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد، و چگونگی محاسبه‌ی آن در رابطه‌ی زیر تعریف شده است. در این رابطه، ω_{ni} نشان‌دهنده فرکانس فیلتر، و B_{wi} نشان‌دهنده پهنای باند ۳ دسی‌بل می‌باشد.

$$N_i = \frac{S^2 + \omega_{ni}^2}{S^2 + B_{wi}S + \omega_{ni}^2} \quad (۱-۳)$$



شکل ۷-۳: ترانسدیوسر های انحراف سرعت PSS

۴-۳ اصول عملکرد بهینه پایدار ساز سیستم قدرت

همان طور که می دانیم رایج ترین روش برای بهبود میرایی نوسانات فرکانس پایین استفاده از پایدار ساز سیستم قدرت است [۱]. محل نصب و طراحی مناسب پایدار ساز سیستم قدرت عواملی هستند که باعث می شود PSS بهترین عملکرد ممکن را در مقابل نوسانات فرکانس پایین داشته باشد. سایر پارامترهای موجود در PSS بر اساس کیفیت سیگنال های ورودی در دسترس و گستره سیگنال های خروجی مورد نیاز تعیین شده و تقریباً مستقل از شرایط کاری شبکه می باشند [۴۵] و برای بعضی از آنها مقادیری در استانداردها و یا کتابها و مقالات تعریف شده است.

۳-۴-۱ موقعیت یابی پایدار ساز سیستم قدرت

می توان گفت که برای دست یافتن به ژنراتور مناسب برای نصب PSS، نیازمند تحلیلی خواهیم بود که در یک مد الکترومکانیکی مشخص، میزان تأثیر تمام ژنراتورها را برای آن مد در اختیار ما بگذارد و این تحلیل چیزی جز آنالیز مدال و محاسبه ی ماتریس ضرایب مشارکت نیست. با استفاده از ماتریس مشارکت، اندازه ی مشارکت متغیرهای حالت ژنراتورها در مقادیر ویژه سیستم بدست می آید [۱۷].

معادلات دیفرانسیل هر سیستم خطی را می توان به صورت معادلات فضای حالت استاندارد رابطه (۲-۳)

نوشت:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i \quad y_i = C_i x_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2-3)$$

که، x_i : عناصر بردار متغیرهای حالت

u_i : عناصر بردار ورودی

y_i : عناصر بردار خروجی

n : تعداد متغیرهای حالت

حال از معادله حالت بالا، ماتریس $A_{n \times n}$ را در نظر بگیرید. اسکالر λ را یک مقدار ویژه از ماتریس A می‌نامند اگر یک بردار غیر صفر v وجود داشته باشد که رابطه ۳-۳ را تصدیق کند.

$$Av = \lambda v, \quad (A - \lambda I)v = 0 \quad (3-3)$$

به بردار غیر صفر v که این رابطه را برقرار می‌سازد بردار ویژه راست A متناظر با مقدار ویژه λ گفته می‌شود. به همین ترتیب به بردار w که برابر با v^{-1} است بردار ویژه چپ می‌گویند.

ضرایب مشارکت از ضرب عناصر متناظر با حالات در بردارهای ویژه چپ و راست بدست می‌آید. با توجه به روابط بالا v_i بردار ویژه راست و w_i بردار ویژه چپ مد i می‌باشند. نسبتاً بزرگ حاکی رابطه قوی بین متغیر حالت k ام با مود i ام است. بنابراین پیشنهاد شد که از اندازه $v_{ki} w_{ik}$ به عنوان مشخص کننده رابطه بین یک حالت و یک مود استفاده شود. برای یک متغیر حالت معین k ام، مجموعه اعداد مثبت $|w_{ki} v_{ki}|$ برای i های مختلف از ۱ تا n ضرایب مشارکت مدهای مختلف در ساختار متغیر حالت k ام نامیده می‌شود که از رابطه (۴-۳) محاسبه می‌شود. و این مجموعه ماتریس مشارکت شامل تمام متغیرهای حالت و مدهای مکانیکی را در بر دارد.

$$p_{ki} = v_{ki} w_{ik} \quad (4-3)$$

بنابراین مشارکت هر واحد به وسیله متغیر حالتش برای هر مد الکترومکانیکی حساب می‌شود و بزرگ‌ترین مقدار مشارکت برای هر مد تأثیرگذارترین ژنراتور و مناسب‌ترین مکان برای نصب PSS را در آن تعیین

خواهد کرد. پس از تعیین مکان نصب پایدارساز نوبت به تنظیم پارامترهای آن بر اساس ماشین مورد نظر و ساختار شبکه می‌رسد. در زیر بخش بعدی این موضوع به تفصیل بیان شده است.

۳-۴-۲ تنظیم پایدارساز سیستم قدرت

یکی از نکات مورد توجه در استفاده از PSS برای افزایش میرایی مدهای بین ناحیه‌ای در سیستم‌های قدرت بزرگ و گسترده، بهره‌گیری از روش طراحی آسان با کارایی بالا در شبکه‌های بزرگ و عملی می‌باشد. بر پایه مطالعات انجام شده برای تنظیم PSS، روش غالب در این حوزه، استفاده از تکنیک پاسخ فرکانسی می‌باشد. با توجه به سادگی اجرا، این روش در بسیاری موارد بر روی شبکه‌های واقعی پیاده‌سازی شده که نتایج آن بسیار موفقیت‌آمیز بوده است [۴۵-۴۶]. در این روش سعی می‌شود بر مبنای ارتباط ما بین شبکه، ژنراتور و سیستم تحریک، در فرکانس مشخص مد نوسانی، مقدار درست زاویه‌ی پس فاز به منظور جبران سازی توسط PSS محاسبه شود. سپس می‌توان با استفاده از روابط موجود، پارامترهای مناسبی برای پایدارساز تخصیص داد.

در پروسه تنظیم PSS، رسیدن به زاویه جبران سازی و بهره مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است.

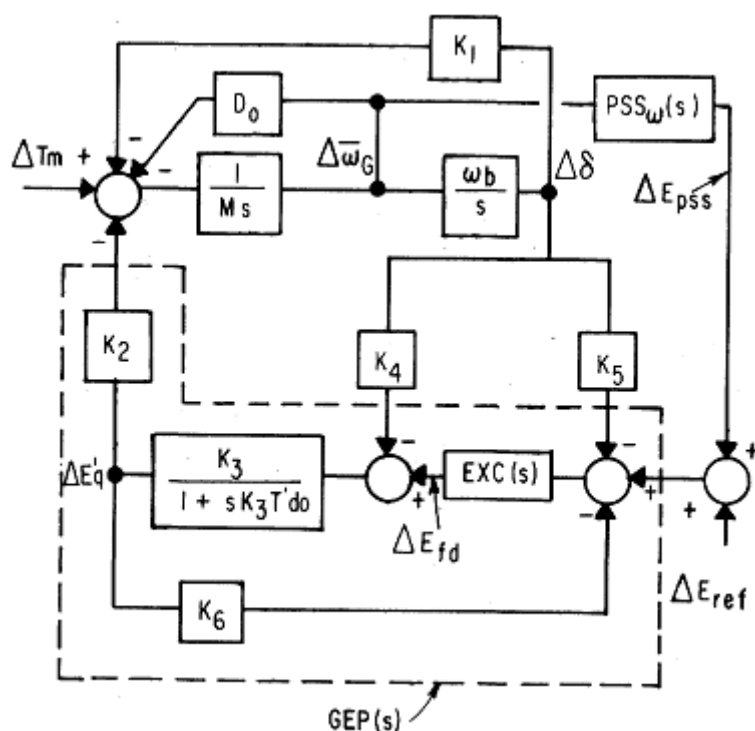
الف. طراحی جبران‌ساز پیش فاز-پس فاز [۴۳]

بلوک دیاگرام شکل ۳-۸ نمایش دهنده مدل تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت به همراه سیستم تحریک و پایدارساز سیستم قدرت می‌باشد. با توجه به موقعیت بلوک PSS و وظیفه‌ی آن برای جبران سازی زاویه‌ی پس فازی در مسیر بلوک تحریک، پایدارساز باید فاز تابع تبدیلی که ورودی آن برابر با خروجی پایدارساز (ΔV_s) و خروجی آن برابر با گشتاور الکتریکی (ΔT_e) می‌باشد را جبران کند. در شکل ۳-۸ این تابع تبدیل با استفاده از خطوط مقطع از باقی سیستم جدا شده است. در این شکل بلوک $EXC(s)$ نشان‌دهنده سیستم تحریک ماشین است. بدین ترتیب مذکور به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$GEP = \frac{K_2 EXC(s) K_3}{1 + s K_2 T_{do}' + K_6 K_3 EXC(s)} \quad (۵-۳)$$

بدین ترتیب فاز تابع تبدیل GEP در فرکانس نوسان مد الکترومکانیکی مشخص کننده زاویه ی پس فازی است که باید توسط PSS جبران شود.

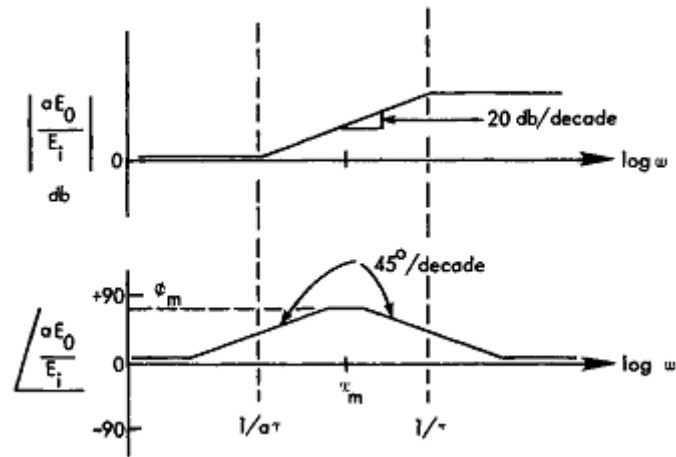
خاطر نشان می کنیم که ضرایب بکار رفته در رابطه بالا نشان دهنده ی اثر بارگذاری ژنراتور و مشخصه ی سیستم قدرت (خط انتقال) می باشند [۴۳].



شکل ۳-۸: مدل تک ماشین و باس بی نهایت هفرون-فیلیپس [۷]

می توان برای هر تابع تبدیلی به مانند رابطه (۳-۶)، که در آن $T_1 = aT_2$ است، منحنی دیاگرام بد را به صورت شکل ۳-۹ نمایش داد.

$$G(s) = \frac{1 + ST_1}{1 + ST_2} = \frac{1 + SaT_2}{1 + ST_2} \quad (۳-۶)$$



شکل ۳-۹: دیاگرام بد برای تابع تبدیل پیش فاز- پس فاز [۴۳]

همان طور که مشاهده می کنید ماکزیمم پیش فازی ϕ_m در فرکانس میانی ω_m رخ می دهد. بنابراین می توان بر مبنای این دیاگرام با استفاده از روابط ۳-۷ و ۳-۸، مقدار ω_m را محاسبه کرد.

$$\log \omega_m = \left(\frac{1}{2}\right) \left[\log \left(\frac{1}{aT_2} \right) + \log \left(\frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (۳-۷)$$

$$\omega_m = \frac{1}{T_2 \sqrt{a}} \quad (۳-۸)$$

همچنین با دانستن مقدار زاویه ی جبران سازی ϕ_m ، با بهره گیری از روابط ۳-۹ و ۳-۱۰، ثابت a محاسبه خواهد شد. در نتیجه مقادیر ثابت زمانی های بلوک جبران گر فاز محاسبه خواهند شد.

$$\tan \phi_m = \frac{1-a}{2\sqrt{a}} \quad (۳-۹)$$

$$a = \frac{1 + \sin \phi_m}{1 - \sin \phi_m} \quad (۳-۱۰)$$

در تنظیم PSS بهتر است میزان جبران سازی برای هر بلوک پیش فاز- پس فاز حداکثر برابر با ۶۰ درجه باشد [۴۵]. بنابراین در صورت نیاز به میزان جبران سازی بیشتر باید از دیگر بلوک های جبران سازی تعبیه شده در مدل استفاده کرد.

فاز جبران سازی در فرکانس مد محلی کمتر از ۴۵ درجه می‌باشد که ترجیحاً نزدیک ۲۰ درجه مقدار مناسبی خواهد بود. همچنین باید ماکزیمم پس فازی که می‌بایست جبران شود کمتر از ۹۰ درجه باشد. معمولاً مقدار ماکزیمم با ورودی سرعت و توان در فرکانس‌های ۳ تا ۳/۵ هرتز و برای ورودی فرکانس در ۲ هرتز رخ می‌دهد [۶].

معمولاً اندکی زیر جبران سازی به فوق جبران سازی ترجیح داده می‌شود تا از ساخته نشدن گشتاور منفی توسط PSS مطمئن شویم. زیر جبران سازی در حدود ۱۰ درجه برای تمامی بازه‌ی فرکانسی مورد نظر، می‌تواند نتایج بهتری را فراهم آورد [۱].

ب. محاسبه بهره پایدارساز [۴۷]

پس از دست یافتن به میزان جبران سازی فاز، محاسبه بهره پایدار ساز از اهمیت بالایی برخوردار است. بهره پایدارساز اثر مهمی بر میرایی نوسان‌های روتور دارد. مقدار بهره با بررسی اثر آن در بازه‌ی وسیعی از مقادیر انتخاب می‌شود. با افزایش بهره پایدارساز تا یک بهره خاص میرایی افزایش می‌یابد و برای بهره‌های بالاتر از آن، میرایی کاهش پیدا می‌کند. بهره پایدارساز باید در مقداری متناظر با میرایی حداکثر انتخاب شود. بنابراین بهره بهینه در شرایط کار مشخص می‌شود [۱-۶] و مقدار بهره محاسبه شده در این بخش می‌تواند مقدار اولیه‌ای برای تنظیم PSS باشد.

می‌توانیم معادله حرکت ماشین را به صورت رابطه‌ی (۱۱-۳) بنویسیم:

$$[MS^2 + (D_m + D_E + D)S + \omega K_1]\Delta\delta = 0 \quad (11-3)$$

که در آن D_m ، D_E و D به ترتیب ضریب گشتاور مکانیکی، الکتریکی و میرایی، M ضریب اینرسی و K_1 از ضرایب شش‌گانه مدل تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت هفرون - فیلپس می‌باشد. با تطبیق رابطه (۱۱-۳) با رابطه استاندارد درجه ۲، می‌توان ضریب میرایی ξ را به صورت رابطه (۱۲-۳) بدست آورد.

$$\xi_n = \frac{(D_m + D_E + D)}{2\omega_b M} \quad (12-3)$$

با صرف نظر کردن از ضریب گشتاور مکانیکی و الکتریکی و مقدار دهی ضریب میرایی، می‌توان ضریب گشتاور الکتریکی را محاسبه نمود و رابطه‌ای بین تغییرات گشتاور الکتریکی و انحراف سرعت زاویه‌ای روتور بدست آورد.

$$\Delta T_e = D_E \Delta \omega \quad (13-3)$$

از طرف دیگر با استفاده از شکل ۳-۸ می‌توان برای ورودی انحراف سرعت زاویه‌ای روتور $(\Delta \omega)$ و خروجی تغییرات گشتاور الکتریکی (ΔT_e) رابطه‌ای نوشت که با برابر قرار دادن آن با رابطه (۳-۱۳)، رابطه (۳-۱۴) برای محاسبه بهره‌ی PSS بدست خواهد آمد.

$$K_c = \frac{2\omega_n M \xi}{K_2 |G_{pss}(j\omega)| |GEP(j\omega)|} \quad (14-3)$$

در رابطه‌ی بالا K_2 از ضرایب شش‌گانه مدل هفرون-فیلیپس می‌باشد. G_{pss} و GEP به ترتیب تابع تبدیل‌های مربوط به مدار پایدارساز و قسمت مشخص شده با خط مقطع در شکل ۳-۸ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، GEP شامل بلوک EXC می‌باشد که نشان دهنده تابع تبدیل سیستم تحریک است.

بدین ترتیب با بهره‌گیری از روابط ذکر شده در بالا می‌توان طراحی پارامترهای اصلی پایدارساز را انجام داد.

فصل ۴

بررسی اثر عدم قطعیت در اطلاعات سیستم‌های

تحریک بر روی مد الکترومکانیکی

۴-۱ مقدمه

همان‌طور که گفته شد، تنظیم پایدارساز سیستم قدرت بر مبنای جبران سازی زاویه‌ی پس فاز بدست آمده از مشخصه‌ی فرکانسی سیستم انجام می‌شود. مقدار زاویه جبران سازی بر اساس اطلاعات شبکه، ژنراتور و سیستم تحریک و در فرکانس معین مد الکترومکانیکی بدست خواهد آمد [۱]. بنابراین مشاهده می‌کنید این مقدار می‌تواند متأثر از چندین عامل ذکر شده در بالا تغییر کند. همان‌طور که گفته‌ایم با فرض معین بودن اطلاعات شبکه و ماشین‌ها، عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک غیر قابل چشم‌پوشی است. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت که این عدم قطعیت بتواند به طور مستقیم بر محاسبه‌ی زاویه‌ی جبران سازی اثر بگذارد. از طرف دیگر عدم قطعیت مذکور می‌تواند با اثر گذاری بر روی فرکانس مد الکترومکانیکی، این بار به طور غیر مستقیم زاویه‌ی جبران سازی را تغییر دهد. بنابراین برای در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت بر روی تنظیم پایدارساز سیستم قدرت می‌بایست هر دو صورت مستقیم و غیر مستقیم اثرگذاری مورد بررسی قرار گیرد. در این فصل با بهره‌گیری از مدل‌ها و شبکه‌های مختلف تست اثرگذاری عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک بر روی مد الکترومکانیکی شبکه (اثرگذاری غیر مستقیم بر روی تنظیم PSS) بررسی

خواهد شد و در فصل آینده تأثیر این عدم قطعیت بر روی شیفت فاز جبران سازی (اثرگذاری مستقیم بر تنظیم PSS) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

همچنین می‌توان با مطالعه‌ی تأثیر پذیری قسمت حقیقی مد الکترومکانیکی، به نوعی اثر عدم قطعیت مزبور را بر روی پایداری سیگنال کوچک شبکه بررسی کرد.

پروژه انجام بررسی‌ها و نتیجه‌گیری‌ها به شرح زیر خواهد بود.

به دلیل آنکه عدم قطعیت در سیستم تحریک از دو منظر مدل و پارامتر مد نظر می‌باشد، ابتدا باید اثرگذاری اعمال مدل‌های مختلف تحریک بر روی نتایج بررسی شود. سپس نتایج ثبت شده در مرحله‌ی قبل را این بار برای هر مدل اعمالی با تغییر مقادیر پارامترهای آن بدست خواهیم آورد. بدین ترتیب می‌توان با مقایسه نتایج بدست آمده در مدل‌ها و پارامترهای مختلف سیستم‌های تحریک، در مورد تأثیر عدم قطعیت اظهار نظر کرد.

۴-۲ اثر گذاری عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک بر روی مدهای

الکترومکانیکی

در این بخش برای انجام مطالعات عدم قطعیت در اطلاعات سیستم‌های تحریک علاوه بر مدل‌های تحریک AC1A، ST1A و DC1A که در فصل ۲ توضیح داده شده‌اند، از مدل‌های کلاسیک و مدل استاندارد IEEE هم استفاده شده است. همچنین برای انجام آنالیزها از شبکه‌های تست تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت و شبکه‌ی نمونه ۲ ناحیه‌ای ۴ ماشین بهره برده‌ایم. به دلیل اهمیت مد الکترومکانیکی، پس از تشخیص این مد با استفاده از آنالیز ضرایب مشارکت، نتایج تنها برای این مد ارائه خواهد شد. مطالعات و نتایج مربوطه در دو زیر بخش مربوط به شبکه‌های تست ارائه شده است.

۴-۲-۱ شبکه تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت

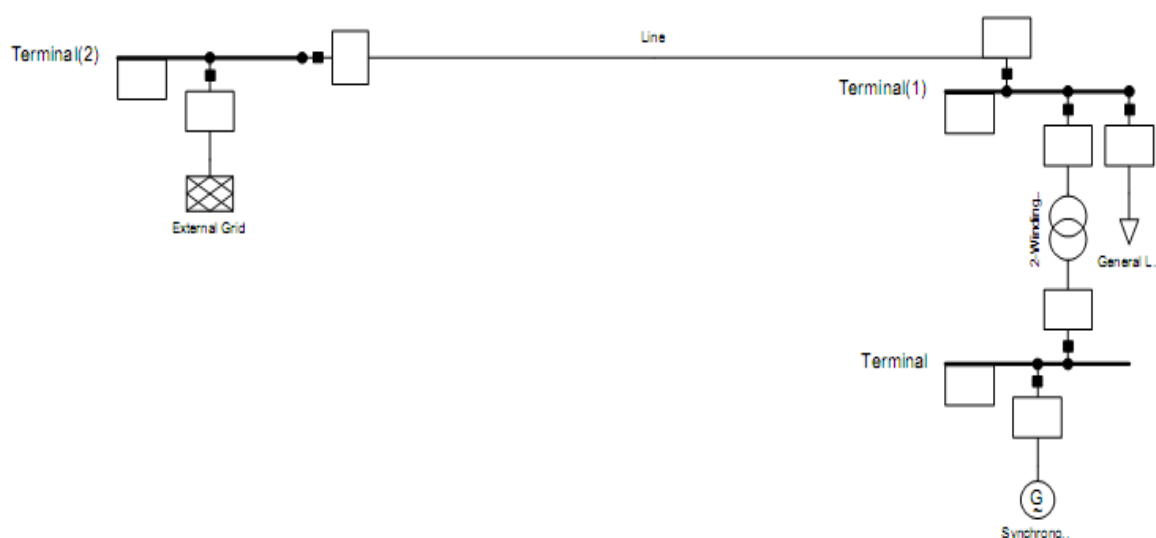
مدل یک ماشین سنکرون متصل به باس بی‌نهایت به صورت دیاگرام تک خطی در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. ژنراتور سنکرون به صورت یک مدل درجه ۵ مدل شده است و متغیرهای حالت آن عبارتست از:

$$X = [\delta, \omega, \psi_f, \psi_D, \psi_Q] \quad (4-1)$$

که δ و ω به ترتیب زاویه قدرت و سرعت زاویه‌ای روتور و ۳ متغیر حالت دیگر به ترتیب شار سیم پیچ میدان، شار سیم بندی میرا ساز محور d و شار سیم بندی میرا ساز محور q می‌باشند.

باس بی‌نهایت را به صورت یک ژنراتور با ثابت اینرسی بالا متصل به باس مرجع شبیه سازی کرده‌ایم تا بتواند خواسته‌های ما را از باس بی‌نهایت که شامل ثابت نگه داشتن ولتاژ و زاویه می‌باشد را برآورده کند. لازم به ذکر می‌باشد که اگر سیستم‌های ژنراتور-توربین و دیگر اجزا را به صورت دیاگرامی از اتصالات فنر، جرم در نظر بگیریم، ژنراتور با اینرسی بالا به مانند جسم صلبی عمل می‌کند که نوسانات فرکانسی بسیار پایینی دارد و به ثابت ماندن فرکانس و پارامترهای مرتبط به آن کمک می‌کند.

پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی در پیوست ۱ آورده شده است.



شکل ۴-۱: شماتیک تک خطی سیستم تک ماشین و باس بی‌نهایت

ابتدا آنالیز مقادیر ویژه را برای حالت بدون سیستم تحریک محاسبه خواهیم کرد تا مقدار مبنایی برای مقایسه بدست آید. به طور نمونه نتایج آنالیز مقادیر ویژه شامل تمامی مقادیر ویژه در جدول ۴-۱ آورده شده است. همان طور که از مقایسه قسمت‌های حقیقی و موهومی مدها مشخص است انتظار داریم مد مزدوج ۸-۹ به دلیل میرایی پایین و دارا بودن فرکانس نوسانی ۰/۵۸۷ هرتز تنها مد الکترومکانیکی این شبکه باشد. آنالیز ضرایب مشارکت را برای مد شماره‌ی ۸ در جدول ۴-۲ وابستگی شدید این مد به متغیرهای مکانیکی ماشین را نمایش می‌دهد. بنابراین تنها مد الکترومکانیکی شبکه همان مد مزدوج ۸-۹ است.

جدول ۴-۱: مقادیر ویژه شبکه تک ماشین بدون سیستم تحریک

M=8.1	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00001	-1	0	0	0	1
Mode 00002	-10	0	0	0	1
Mode 00003	-1	0	0	0	1
Mode 00004	-10	0	0	0	1
Mode 00005	0	0	0	0	0
Mode 00006	-22.64206	0	0	0	1
Mode 00007	-16.78181	0	0	0	1
Mode 00008	-0.2242464	3.687813	0.5869336	1.70377	0.06069533
Mode 00009	-0.2242464	-3.687813	0.5869336	1.70377	0.06069533
Mode 00010	-0.00027858	0.00077633	0.00012356	8093.422	0.3377572
Mode 00011	-0.00027858	-0.00077633	0.00012356	8093.422	0.3377572
Mode 00012	0	0	0	0	0

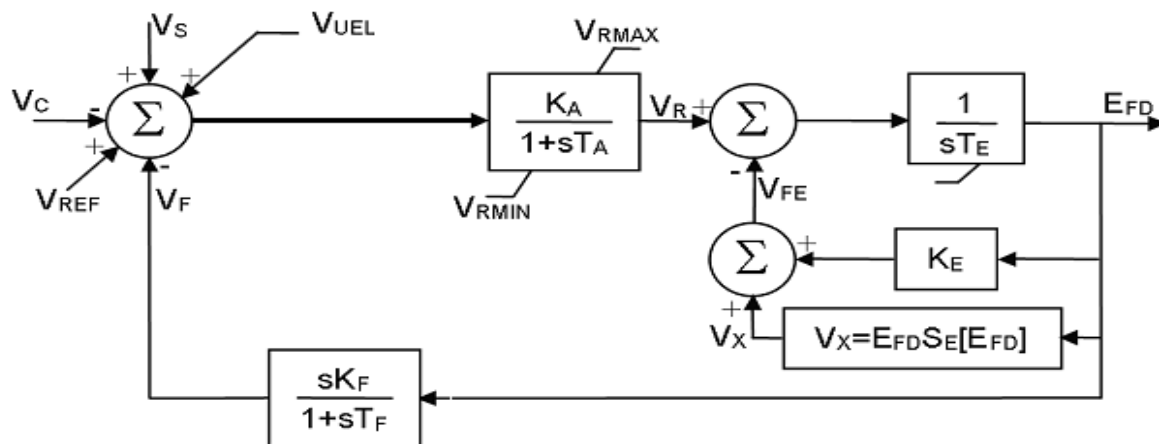
جدول ۴-۲: آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی برای سیستم بدون تحریک

متغیرهای حالت	شماره مد	ضرایب مشارکت
Synchronous Machine; phi	8	1
Synchronous Machine; speed	8	0.9881167

در ادامه، معرفی کوتاهی از مدل تحریک استاندارد به همراه دیاگرام تک خطی آن، ارائه خواهیم کرد سپس ابتدا اثر گذاری مدل‌های مختلف سیستم تحریک (ذکر شده در بالا) را بر روی مدهای شبکه مورد بررسی قرار می‌دهیم، سپس برای هر مدل معین تأثیر تغییر در پارامترهای مهم آن را بر روی مدها بررسی می‌کنیم. این پارامترها را می‌توان بر مبنای ساختار شبکه و مقادیر نوعی آن‌ها انتخاب کرد. در این مطالعه پارامترهای K_a (بهره تنظیم‌کننده) و T_e (ثابت زمانی تحریک کننده) به عنوان پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر روی مدها خواهند داشت در نظر گرفته شده‌اند که انتخاب آن‌ها چندان دور از ذهن نمی‌باشد. توجه داشته باشید که به دلیل آنکه در مدل استاتیک تحریک‌کننده نداریم، در این حالت اثر تغییر T_a (ثابت زمانی تنظیم‌کننده) بررسی شده است. این پروسه تأثیر عدم قطعیت در مدل و پارامترهای اکسایتر را بر روی مد الکترومکانیکی شبکه‌ی تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت در اختیار ما قرار می‌دهد.

۱-۱-۲-۴ مدل سیستم تحریک استاندارد IEEE1

دیاگرام تک خطی مدل تحریک IEEE1 در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است. این مدل دارای بلوک‌های تنظیم‌کننده ولتاژ، تحریک‌کننده، پایدارساز سیستم تحریک و اشباع می‌باشد. عملکرد بلوک‌های بیان شده همانند سایر مدل‌ها می‌باشد و تنها مقادیر تنظیمی آن‌ها متفاوت می‌باشد. جدول ۳-۴ مقادیر نوعی پارامترهای این مدل را نمایش می‌دهد. همچنین حدود اعمالی بر روی تنظیم‌کننده و سیگنال‌های کنترلی مانند فوق تحریک و زیر تحریک همانند مدل‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



شکل ۲-۴: دیاگرام تک خطی مدل سیستم تحریک IEEE1

جدول ۴-۳: مقادیر نوعی پارامترهای مدل سیستم تحریک *IEEE1*

پارامتر بلوک اشباع	$Tr=0.02$	ثابت زمانی مبدل ولتاژ ترمینال	$E1=3.9$
پارامتر بلوک اشباع	$Ka=300$	بهره تنظیم کننده ولتاژ	$Se=0.1$
پارامتر بلوک اشباع	$Ta=0.03$	ثابت زمانی تنظیم کننده ولتاژ	$E2=5.2$
پارامتر بلوک اشباع	$Ke=1$	بهره سیستم تحریک	$Se2=0.5$
حد پایین ولتاژ	$Te=0.2$	ثابت زمانی سیستم تحریک	$V_{rmin}=-10$
حد بالای ولتاژ	$Kf=0.05$	بهره پایدارساز تحریک	$V_{rmax}=10$
	$Tf=1.5$	ثابت زمانی پایدارساز تحریک	

جدول ۴-۴ نتیجه آنالیز مقادیر ویژه برای مد الکترومکانیکی در وضعیت استفاده از مدل استاندارد IEEE سیستم تحریک را نمایش می‌دهد. توجه داشته باشید که نتیجه‌ی ارائه شده در ۲ مقدار متفاوت ثابت اینرسی بدست آمده است. می‌دانیم هر چه ثابت اینرسی بزرگ‌تر باشد به علت افزایش خاصیت سلبی ژنراتور، فرکانس نوسانات کاهش و پریود آن افزایش می‌یابد. این امر در نتایج جدول ۴-۴ تایید شده است بطوریکه با کاهش ثابت اینرسی از ۸/۱ به ۵/۴ ثانیه مقدار فرکانس مد از ۰/۵۹۵ به مقدار ۰/۷۱۲ هرتز افزایش یافت.

جدول ۴-۴: مد الکترومکانیکی شبکه تک ماشین با سیستم تحریک *IEEE1*

ضریب میرایی	پریود زمانی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	$M=8.1$
-0.0686228	1.680506	0.595059	3.738866	0.2571777	Mode 00011
-0.0686228	1.680506	0.595059	-3.738866	0.2571777	Mode 00012
ضریب میرایی	پریود زمانی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	$M=5.4$
-0.0551609	1.404437	0.7120293	4.473812	0.2471557	Mode 00011
-0.0551609	1.404437	0.7120293	-4.473812	0.2471557	Mode 00012

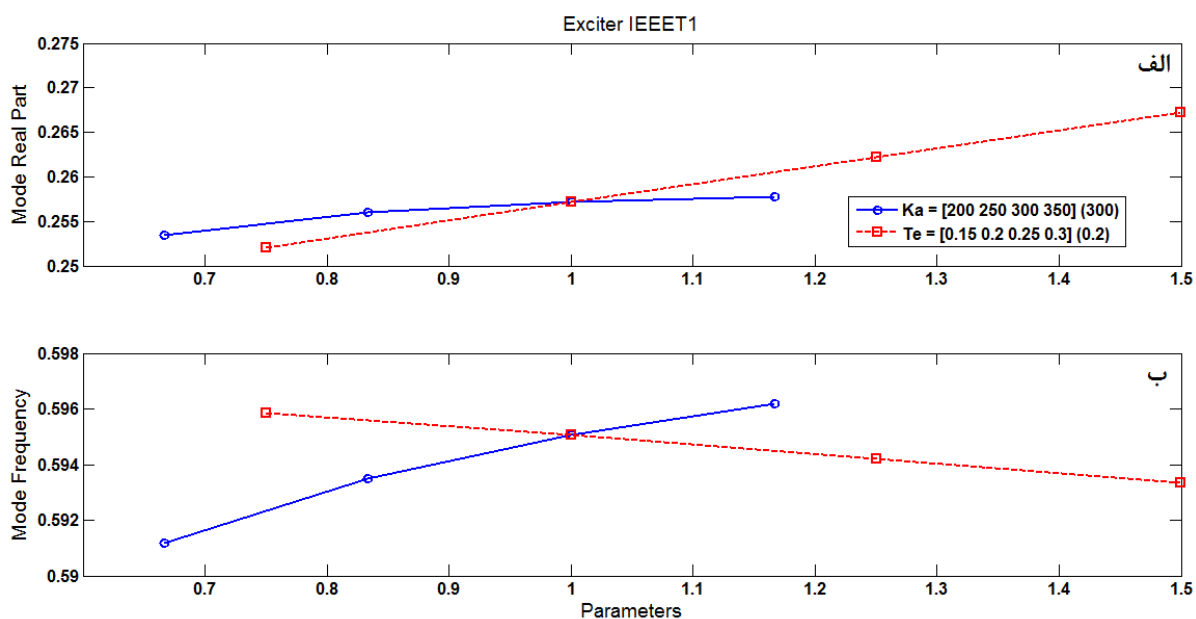
جدول ۴-۵: آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی با سیستم تحریک *IEEE1* . $M=8.1s$

ضرایب مشارکت	شماره مد	متغیر حالت
1	11	Synchronous Machine; phi
0.9620125	11	Synchronous Machine; speed

قسمت حقیقی مد الکترومکانیکی سیستم در مقایسه با وضعیت شبکه بدون سیستم تحریک ناپایدار شده است و این به معنی وابسته بودن پایداری شبکه به مدل سیستم تحریک است. این در حالی اتفاق می افتد که مقدار موهومی آن تغییر چندانی نداشته است و می توان از تغییر $0/008$ هرتزی در فرکانس آن صرف نظر کرد. این نتیجه مستقل بودن فرکانس مد الکترومکانیکی از مدل سیستم تحریک را نشان می دهد.

حال برای این مدل تحریک اثر تغییر پارامترهای آن بر روی قسمت حقیقی و موهومی مد الکترومکانیکی را بررسی می کنیم. به دلیل آنکه در قسمت بالا نتیجه گرفته ایم که فرکانس مد مستقل از مدل تحریک *IEEE1* می باشد، بنابراین انتظار داریم تغییر پارامترهای این مدل نیز در آن تأثیر زیادی نداشته باشد.

همان طور که قبلاً نیز گفته ایم برای انجام بررسی های این بخش از پارامترهای بهره تنظیم کننده (Ka) و ثابت زمانی تحریک کننده (Te) به دلیل مقدار آن ها و همچنین قرار گرفتن در مسیر پیش خور سیگنال ورودی استفاده کرده ایم. شکل ۳-۴ تغییرات قسمت حقیقی مد و فرکانس آن را در اثر تغییر پارامترهای ذکر شده نشان می دهد. قسمت الف نشان دهنده تغییر قسمت حقیقی مد و ب نشان دهنده تغییر حاصل شده در فرکانس مد می باشد. خاطر نشان می کنیم که مقادیر اعمالی برای تغییر پارامترها به همراه مقدار مبنای آن ها در کنار شکل آورده شده است. برای رسم گراف زیر از مقادیر نرمالیزه شده ی پارامترها نسبت به مقدار مبنای خودش استفاده شده است. در تمامی بررسی ها، مدهای سیستم در ثابت اینرسی $8/1$ ثانیه محاسبه شده اند.



شکل ۴-۳: اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک IEEE11 بر روی مد الکترومکانیکی. الف: قسمت حقیقی مد. ب: فرکانس مد همان‌طور که مشاهده می‌کنید تغییرات قسمت حقیقی مد در اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک IEEE11 بسیار ناچیز می‌باشد و قابل نظر است. همین نتیجه برای فرکانس مد نیز قابل استنتاج است. این نتیجه‌ای است که قبل از این به آن اشاره شده بود. مقادیر عددی تغییرات در جدول ۴-۶ ارائه شده است.

جدول ۴-۶: تغییرات مد الکترومکانیکی بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک IEEE11

تغییرات پارامترهای سیستم تحریک		قسمت حقیقی مد	فرکانس مد
بهره تنظیم کننده ولتاژ (K_a)	200	0.2534591	0.5911916
	250	0.2559595	0.5934887
	300	0.2571777	0.595059
	350	0.257814	0.5961981
ثابت زمانی سیستم تحریک (T_e)	0.15	0.2520272	0.5958645
	0.2	0.2571777	0.595059
	0.25	0.2622581	0.5942209
	0.3	0.2672579	0.5933503

۲-۱-۲-۴ مدل سیستم تحریک AC1A

مقادیر نوعی پارامترهای مدل تحریک AC1A در جدول زیر نشان داده شده است. نتایج آنالیز مقادیر ویژه شبکه‌ی تک ماشین با این نوع سیستم تحریک برای مد الکترومکانیکی با دو مقدار ثابت اینرسی در جدول ۸-۴ آورده شده است.

جدول ۷-۴: مقادیر نوعی مدل سیستم تحریک AC1A

Kd=0.213	بهره عکس‌العمل آرمیچر	Tb=0.02	زمان تأخیر فیلتر
E1=3.13	پارامتر بلوک اشباع	Tc=0.09	ثابت زمانی فیلتر مشتقی
SE1=1.73	پارامتر بلوک اشباع	Tr=0.01	اندازه‌ی تأخیر
E2=4.18	پارامتر بلوک اشباع	Ka=250	بهره تنظیم‌کننده ولتاژ
SE2=4	پارامتر بلوک اشباع	Ta=0.003	ثابت زمانی تنظیم‌کننده ولتاژ
Vamin=-36.3	حد پایین ولتاژ آمپلی‌فایر	Kf=0.001	بهره پایدارساز تحریک
Vrmin=-999	حد پایین ولتاژ کنترلر	Tf=1	ثابت زمانی پایدارساز تحریک
Vamax=41.7	حد بالای ولتاژ آمپلی‌فایر	Te=2.1	ثابت زمانی سیستم تحریک
Vrmax=999	حد بالای ولتاژ کنترلر	Kc=0.14	بهره تنظیم‌کننده یکسو ساز
		Ke=0.53	بهره تحریک

در این حالت نیز همانند مدل تحریک استاندارد، مد الکترومکانیکی شبکه در مقایسه با وضعیت بدون سیستم تحریک ناپایدار شده است و تغییر آن قابل صرف نظر نیست ولی قسمت موهومی آن و فرکانس مد چندان دست خوش تغییر نشده‌اند، بطوریکه فرکانس مد تغییری در حدود ۰/۰۱ هرتز را تجربه کرده است که این مقدار قابل چشم‌پوشی است. همچنین همان‌طور که انتظار داشتیم فرکانس مد در اثر کاهش ثابت اینرسی ماشین، افزایش و به طور معکوس پریود آن کاهش یافته است.

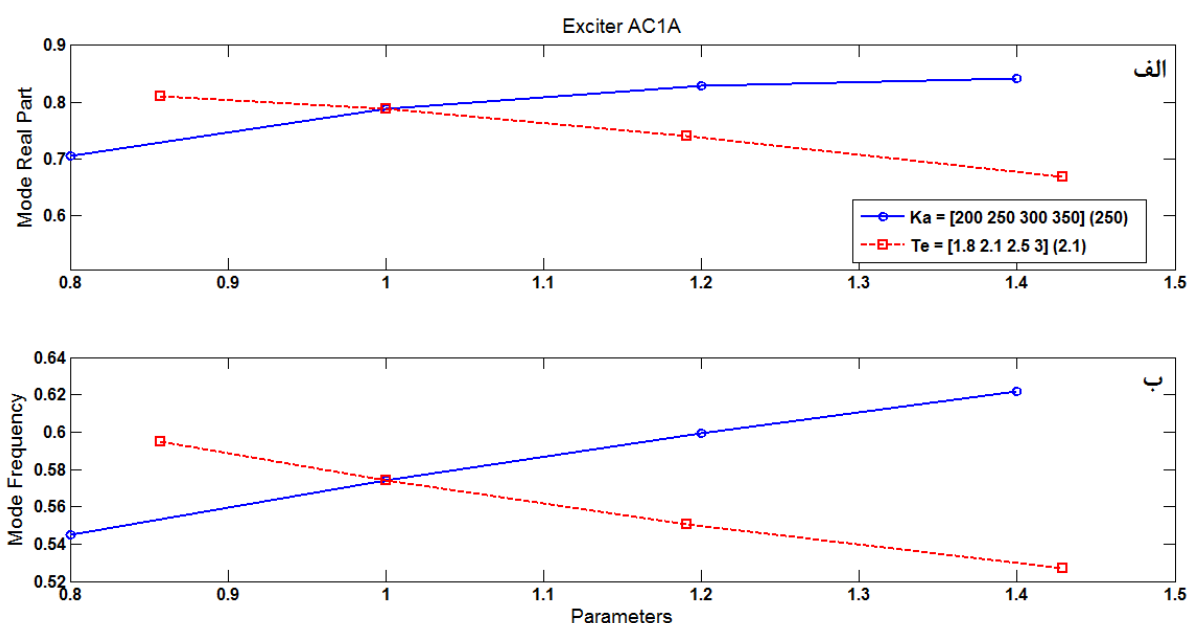
جدول ۸-۴: مد الکترومکانیکی شبکه تک ماشین با سیستم تحریک AC1A

ضریب میرایی	پریود زمانی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	M=8.1
-0.2133184	1.741877	0.5740933	3.607135	0.7875965	Mode 00013
-0.2133184	1.741877	0.5740933	-3.607135	0.7875965	Mode 00014
ضریب میرایی	پریود زمانی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	M=5.4
-0.1882655	1.564105	0.6393433	4.017112	0.7700535	Mode 00013
-0.1882655	1.564105	0.6393433	-4.017112	0.7700535	Mode 00014

جدول ۹-۴ : آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی با سیستم تحریک AC1A . $M=8.1s$

ضرایب مشارکت	شماره مد	متغیر حالت
1	13	Synchronous Machine; phi
0.9318194	13	Synchronous Machine; speed

حال همانند حالت قبل تأثیر تغییر پارامترهای بهره تنظیم‌کننده ولتاژ و ثابت زمانی سیستم تحریک را بر روی مد الکترومکانیکی بررسی خواهیم کرد. گراف زیر تغییرات مد نوسانی شبکه را در اثر تغییر دو پارامتر ذکر شده نمایش می‌دهد. با توجه به جدول ۹-۴ که مقادیر عددی تغییر را نمایش می‌دهد، در می‌یابیم حداکثر تغییر قسمت حقیقی مد در حدود ۰/۱۵ می‌باشد. این مقدار قابل توجه است و نمی‌توان از آن صرف نظر کرد. بنابراین قسمت حقیقی مد الکترومکانیکی و یا همان شاخص پایداری متأثر از تغییرات پارامترهای سیستم تحریک AC1A می‌باشد و نمی‌توان پایداری را مستقل از عدم قطعیت در پارامترهای تحریک دانست.



شکل ۹-۴ : اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک AC1A بر روی مد الکترومکانیکی. الف: قسمت حقیقی مد. ب: فرکانس مد در مورد قسمت موهومی مد و فرکانس آن بحث متفاوت است. فرکانس مد همانند حالت تحریک استاندارد تأثیر زیادی از تغییرات پارامترها نمی‌پذیرد و تغییرات آن در بازه‌ی نشان داده شده در شکل ۹-۴ قابل قبول می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت فرکانس مد الکترومکانیکی مستقل از تغییرات پارامترهای تحریک است.

جدول ۴-۱۰: تغییرات مد الکترومکانیکی بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک AC1A

تغییرات پارامترهای سیستم تحریک		قسمت حقیقی مد	فرکانس مد
بهره تنظیم کننده ولتاژ (K_a)	200	0.704572	0.5450347
	250	0.787597	0.5740933
	300	0.828779	0.5993142
	350	0.842272	0.6215974
ثابت زمانی سیستم تحریک (T_e)	1.8	0.809815	0.5950975
	2.1	0.787597	0.5740933
	2.5	0.740611	0.5507974
	3	0.668061	0.5269651

۴-۲-۱-۳ مدل سیستم تحریک DC1A

دیاگرام سیستم تحریک DC1A در بخش ۲-۴-۱-۱ نمایش داده شد و مطالب مربوط به عملکرد آن ذکر شد. مقادیر تنظیمی مبنا برای پارامترهای این مدل در جدول ۴-۱۱ آورده شده است. نتایج آنالیز مقادیر ویژه با اعمال این مدل تحریک و پارامترهایش برای دو ثابت اینرسی در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۴-۱۳ مشخص است، تنها مد الکترومکانیکی شبکه، مد مزدوج شماره ۱۱-۱۲ می‌باشد و نتایج تنها برای این مد ارائه خواهد شد.

جدول ۴-۱۱: مقادیر نوعی مدل سیستم تحریک DC1A

اندازی تأخیر	$Tr=0.02$	بهره تحریک	$Ke=0.5$
بهره کنترلر	$Ka=200$	پارامتر بلوک اشباع	$E1=3.9$
ثابت زمانی کنترلر	$Ta=0.005$	پارامتر بلوک اشباع	$Se1=0.0001$
ثابت زمانی فیلتر مشتق	$Tc=3.1$	پارامتر بلوک اشباع	$E2=5.2$
ثابت زمانی تأخیر فیلتر	$Tb=40$	پارامتر بلوک اشباع	$Se2=0.001$
ثابت زمانی سیستم تحریک	$Te=0.05$	حد پایین ولتاژ کنترلر	$Vrmin=-5$
بهره پایدارساز تحریک	$Kf=0.01$	حد بالای ولتاژ کنترلر	$Vrmax=9$
ثابت زمانی پایدارساز تحریک	$Tf=0.3$		

همان‌طور که از جدول مشخص است مد الکترومکانیکی بعد از اعمال سیستم تحریک $DC1A$ ناپایدار شده است. این نتیجه‌ای است که در حالت‌های قبل نیز داشته‌ایم. مقدار موهومی مد در مقایسه با حالت بدون سیستم تغییر چندانی نداشته است و می‌توان فرکانس مد الکترومکانیکی را مستقل از مدل تحریک دانست. همچنین کاهش ثابت اینرسی همانند قبل موجب افزایش فرکانس مد نوسانی شده است.

جدول ۴-۱۲: مد الکترومکانیکی شبکه تک ماشین با سیستم تحریک $DC1A$

ضریب میرایی	پریود زمانی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	M=8.1
-0.04935369	1.798681	0.5559629	3.493218	0.1726135	Mode 00011
-0.04935369	1.798681	0.5559629	-3.493218	0.1726135	Mode 00012
ضریب میرایی	پریود زمانی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	M=5.4
-0.00894682	1.487435	0.6722982	4.224174	0.1579442	Mode 00011
-0.00894682	1.487435	0.6722982	-4.224174	0.1579442	Mode 00012

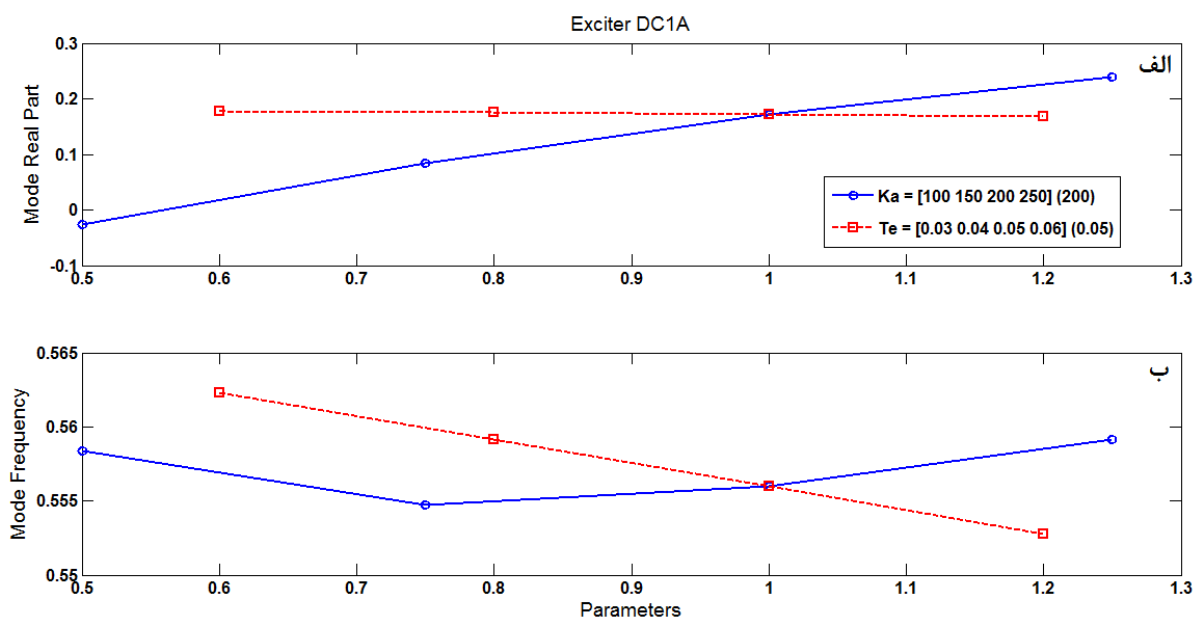
جدول ۴-۱۳: آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی با سیستم تحریک $DC1A$. $M=8.1s$

ضرایب مشارکت	شماره مد	متغیر حالت
1	13	Synchronous Machine; phi
0.960365	13	Synchronous Machine; speed

پس از مطالعه تأثیر مدل تحریک $DC1A$ بر روی مد الکترومکانیکی، نوبت به بررسی اثر تغییر پارامترهای این مدل بر روی قسمت‌های حقیقی و موهومی مد می‌رسد. همانند حالت‌های قبل، پارامترهای انتخابی برای اعمال تغییر بهره تنظیم‌کننده ولتاژ (K_a) و ثابت زمانی تحریک‌کننده (T_e) می‌باشند. بر طبق جدول ۴-۱۱ مقادیر نوعی برای این پارامترها به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۰/۰۵ می‌باشد.

شکل ۴-۵ منحنی تغییرات قسمت حقیقی مد و فرکانس آن را برای تغییرات مشخص در پارامترهای سیستم تحریک را نشان می‌دهد. قسمت حقیقی مد در اثر تغییر بهره تنظیم‌کننده ولتاژ تغییرات بسیار شدیدی را متحمل شده است. بطوریکه به ازای مقدار بهره ۱۰۰ مد الکترومکانیکی از حالت ناپایدار به حالت

پایدار رسیده است. اما قسمت موهومی مد که در قسمت ب شکل با شاخص فرکانس نشان داده شده است تغییرات بسیار ناچیزی را تجربه کرده است که صرف نظر کردن از این تغییرات قابل قبول است. مقادیر عددی تغییرات قسمت حقیقی و فرکانس مد الکترومکانیکی به همراه تغییرات اعمالی در پارامترهای سیستم تحریک در جدول ۴-۱۴ آورده شده است.



شکل ۴-۵: اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک $DC1A$ بر روی مد الکترومکانیکی. الف: قسمت حقیقی مد. ب: فرکانس مد

جدول ۴-۱۴: تغییرات مد الکترومکانیکی بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک $DC1A$

تغییرات پارامترهای سیستم تحریک		قسمت حقیقی مد	فرکانس مد
بهره تنظیم کننده ولتاژ (K_a)	100	-0.02676	0.5583486
	150	0.083664	0.5547637
	200	0.172614	0.5559629
	250	0.239147	0.5591215
ثابت زمانی سیستم تحریک (T_e)	0.03	0.176741	0.5623272
	0.04	0.175442	0.5591595
	0.05	0.172614	0.5559629
	0.06	0.168244	0.5527597

۴-۱-۲-۴ مدل سیستم تحریک ST1A

مقادیر نوعی پارامترهای مدل تحریک در جدول ۴-۱۵ نشان داده شده است. جدول‌های ۴-۱۶ و ۴-۱۷ به ترتیب نتایج آنالیز مقادیر ویژه برای مد الکترومکانیکی در دو مقدار متفاوت ثابت اینرسی و آنالیز ضرایب مشارکت برای تشخیص مد مکانیکی را نمایش می‌دهند.

جدول ۴-۱۵: مقادیر نوعی مدل سیستم تحریک ST1A

Tf=1.2	ثابت زمانی پایدارساز تحریک	Tr=0.015	اندازه‌ی تأخیر
Klr=1	ضریب جریان ورودی	Tb=1	ثابت زمانی تأخیر فیلتر اول
llr=1	مرجع جریان ورودی	Tc=0.1	ثابت زمانی فیلتر مشتق اول
Vos=1	ورودی‌های PSS متفاوت	Tb1=1	ثابت زمانی تأخیر فیلتر دوم
Vel=1	ورودی‌های Uel متفاوت	Tc1=1	ثابت زمانی فیلتر مشتق دوم
Vamin=-5	حد پایین ولتاژ خروجی کنترلر	Ka=145	بهره کنترلر
Vrmin=-4	حد پایین ولتاژ خروجی تحریک	Ta=0.05	ثابت زمانی کنترلر
Vamax=5	حد بالای ولتاژ خروجی کنترلر	Kc=0.01	فیلتر حد جریان
Vrmax=4	حد بالای ولتاژ خروجی تحریک	Kf=0.01	بهره پایدارساز تحریک

همانند حالت‌های قبل در این حالت نیز در مقایسه با وضعیت بدون سیستم تحریک، قسمت حقیقی مد تغییر زیادی داشته است و از حالت پایدار به وضعیت ناپایدار کنونی رسیده است. فرکانس مد نیز تغییر بسیار ناچیزی را برای اعمال سیستم تحریک ST1A متحمل شده است که قابل صرف نظر است و می‌توان آن را مستقل از تغییر مدل دانست. همچنین تأثیر کاهش ثابت اینرسی همانند قبل افزایش فرکانس و کاهش پریود زمانی مد الکترومکانیکی را در پی داشته است.

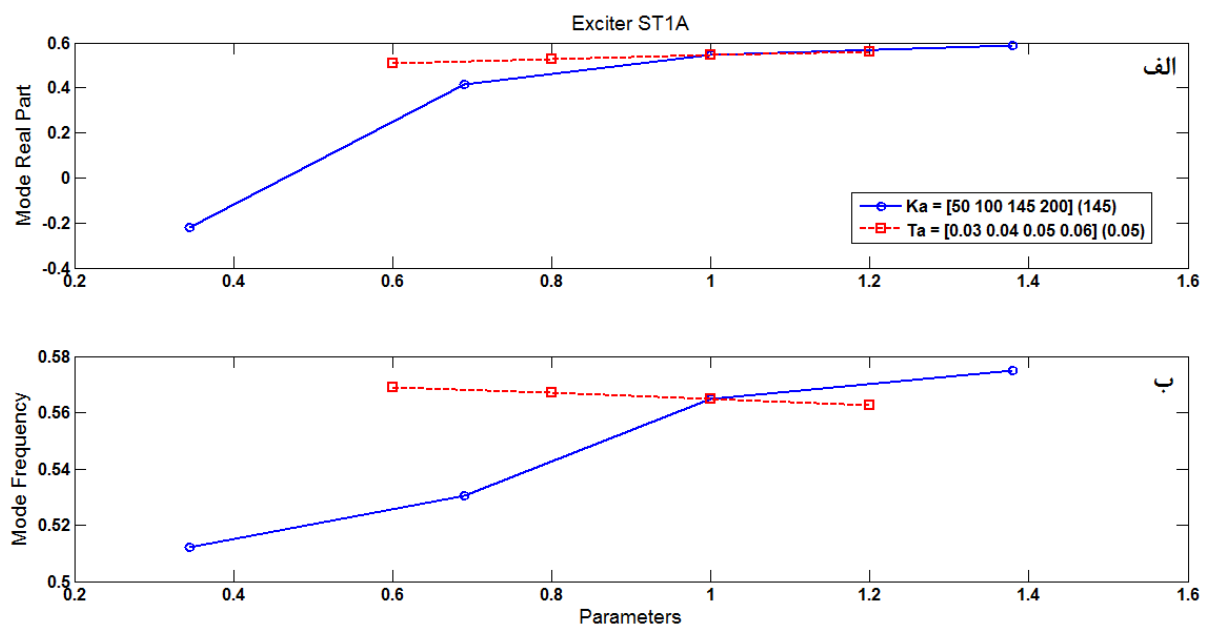
جدول ۴-۱۶: مد الکترومکانیکی شبکه تک ماشین با سیستم تحریک ST1A

ضریب میرایی	پریود زمانی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	M=8.1
-0.1516033	1.770313	0.5648718	3.549194	0.5443616	Mode 00012
-0.1516033	1.770313	0.5648718	-3.549194	0.5443616	Mode 00013
ضریب میرایی	پریود زمانی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	M=5.4
-0.1227108	1.552191	0.6442506	4.047946	0.5005092	Mode 00012
-0.1227108	1.552191	0.6442506	-4.047946	0.5005092	Mode 00013

جدول ۴-۱۷: آنالیز ضرایب مشارکت مد الکترومکانیکی با سیستم تحریک ST1A . $M=8.1s$

متغیر حالت	شماره مد	ضرایب مشارکت
Synchronous Machine; phi	13	1
Synchronous Machine; speed	13	0.960365

تغییر قسمت حقیقی و فرکانس مد به سبب تغییر پارامترهای سیستم تحریک ST1A در شکل ۴-۶ نمایش داده شده است. توجه داشته باشید که همان‌طور که در ابتدای بحث هم گفته شد به دلیل عدم وجود بلوک تحریک‌کننده در این مدل، اثر تغییر بهره (Ka) و ثابت زمانی (Ta) تنظیم‌کننده ولتاژ بر روی مد الکترومکانیکی بررسی شده است. مقادیر تغییرات پارامترها به همراه تغییرات مد الکترومکانیکی در جدول ۴-۱۸ آورده شده است.



شکل ۴-۶: اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک ST1A بر روی مد الکترومکانیکی. الف: قسمت حقیقی مد. ب: فرکانس مد

جدول ۴-۱۸: تغییرات مد الکترومکانیکی بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک ST1A

تغییرات پارامترهای سیستم تحریک		قسمت حقیقی مد	فرکانس مد
بهره تنظیم کننده ولتاژ (Ka)	50	-0.22124	0.5120595
	100	0.414318	0.5304326
	145	0.544362	0.5648718
	200	0.589368	0.5750965
ثابت زمانی تنظیم کننده ولتاژ (Te)	0.03	0.510013	0.5691003
	0.04	0.527318	0.5670587
	0.05	0.544362	0.5648718
	0.06	0.561053	0.5625442

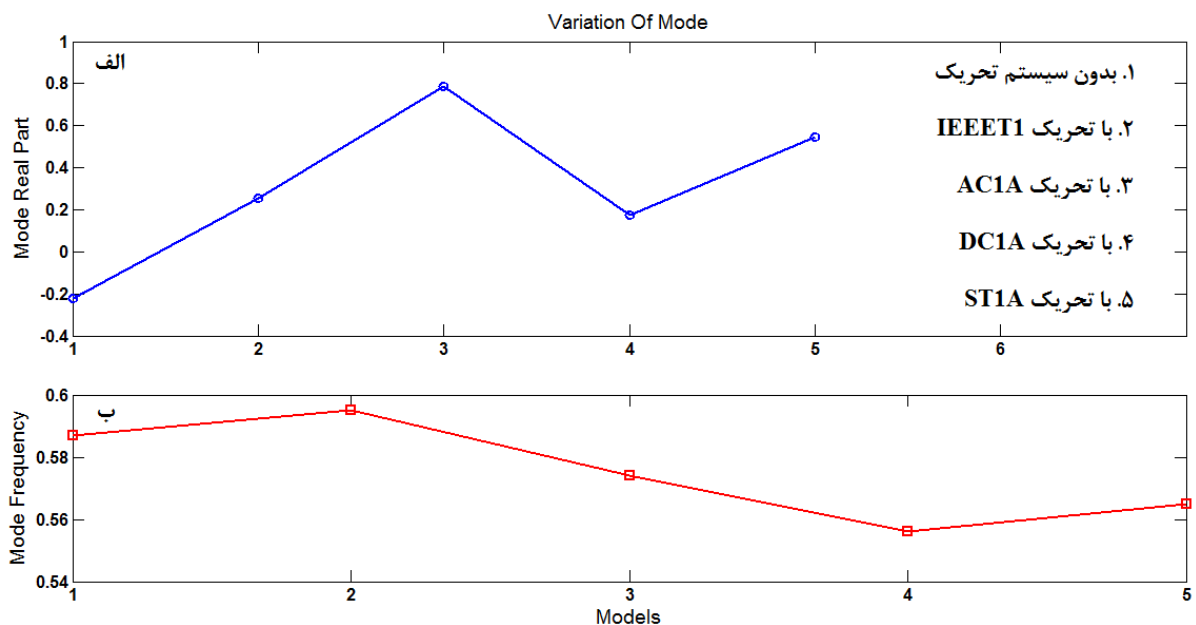
شکل ۴-۶ به وضوح تأثیرپذیری قسمت حقیقی مد را از تغییر پارامتر بهره تنظیم کننده (Ka) نشان می‌دهد. این بدان معنی است که پایداری سیگنال کوچک شبکه علاوه بر وابستگی به مدل سیستم تحریک به پارامترهای آن نیز وابسته می‌باشد. اما بازه‌ی تغییر فرکانس مد حداکثر حدود ۰/۰۶ هرتز می‌باشد که مقداری کوچک است و صرف نظر کردن از آن خللی در مطالعات ما به وجود نمی‌آورد.

۴-۲-۱-۵ نتایج مطالعات در شبکه تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت

تغییر مدهای الکترومکانیکی به سبب تغییر در مدل‌های سیستم تحریک در شبکه‌ی تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت به صورت جدول ۴-۱۹ آورده شده است. همچنین رنج تغییرات بصورت گراف در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۹: نتایج تأثیر تغییرات مدل تحریک بر مد الکترومکانیکی شبکه‌ی تک ماشینیه

M=8.1					
Sys Without Avr	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00008	-0.224246	3.687813	0.5869336	1.70377	0.0606953
Mode 00009	-0.224246	-3.687813	0.5869336	1.70377	0.0606953
Sys With Avr IEEE T1	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00011	0.2571777	3.738866	0.595059	1.703788	-0.0686228
Mode 00012	0.2571777	-3.738866	0.595059	1.703788	-0.0686228
Sys With Avr AC1A	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00013	0.7875965	3.607135	0.5740933	1.680506	-0.2133184
Mode 00014	0.7875965	-3.607135	0.5740933	1.680506	-0.2133184
Sys With Avr DC1A	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00011	0.1726135	3.493218	0.5559629	1.741877	-0.0493536
Mode 00012	0.1726135	-3.493218	0.5559629	1.741877	-0.0493536
Sys With Avr ST1A	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00012	0.5443616	3.549194	0.5648718	1.798681	-0.1516033
Mode 00013	0.5443616	-3.549194	0.5648718	1.798681	-0.1516033



شکل ۴-۷ نرخ تغییرات مد شبکه تک ماشینیه برای مدل‌های مختلف تحریک. الف- قسمت حقیقی مد. ب- فرکانس مد.

بر اساس اطلاعات دریافتی از گراف و جدول آورده شده در بالا و بر مبنای مطالب ارائه شده در قسمت‌های قبل می‌توان نتایج این بخش را به صورت زیر مرتب کرد:

۱- تغییر مدل‌های تحریک برای سیستم تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت اثر ناچیزی بر روی فرکانس نوسان مد الکترومکانیکی داشته است بطوریکه در بدترین حالت مقدار فرکانس از ۰/۵۸۷ هرتز (برای حالت بدون سیستم تحریک) به ۰/۵۵۶ هرتز (با سیستم تحریک DC1A) کاهش یافته است که تقریباً ۵ درصد تغییر می‌باشد. در مدل‌های دیگر تحریک تغییرات کمتر است. بنابراین فرکانس مد الکترومکانیکی مستقل از تغییر مدل سیستم تحریک است.

۲- برای هر مدل تحریک معین، تغییر پارامترهای آن تأثیر بسیار کمی بر روی فرکانس مد الکترومکانیکی داشته است. این نتیجه‌ای بوده که ما از بند ۱ انتظار داشتیم. چرا که تغییر مدل تحریک که به نوعی تغییر پارامتر محسوب می‌شود بر فرکانس مد تأثیر ناچیزی داشته است.

۳- بنابراین فرکانس مد الکترومکانیکی مستقل از عدم قطعیت در اطلاعات مدل و پارامتر سیستم تحریک است.

۴- عدم قطعیت در مدل سیستم تحریک تأثیر زیادی بر قسمت حقیقی مد الکترومکانیکی که شاخص پایداری محسوب می‌شود، داشته است. بدین ترتیب باید گفت پایداری سیگنال کوچک وابسته به نوع سیستم تحریک می‌باشد و در صورت وجود عدم قطعیت در مدل تحریک نمی‌توان از نتایج آنالیزهای پایداری مطمئن بود.

۵- تأثیر تغییر پارامترهای اکسایتر بر روی قسمت مد الکترومکانیکی قابل ملاحظه می‌باشد. بنابراین پایداری شبکه مستقل از پارامترهای سیستم تحریک نیست.

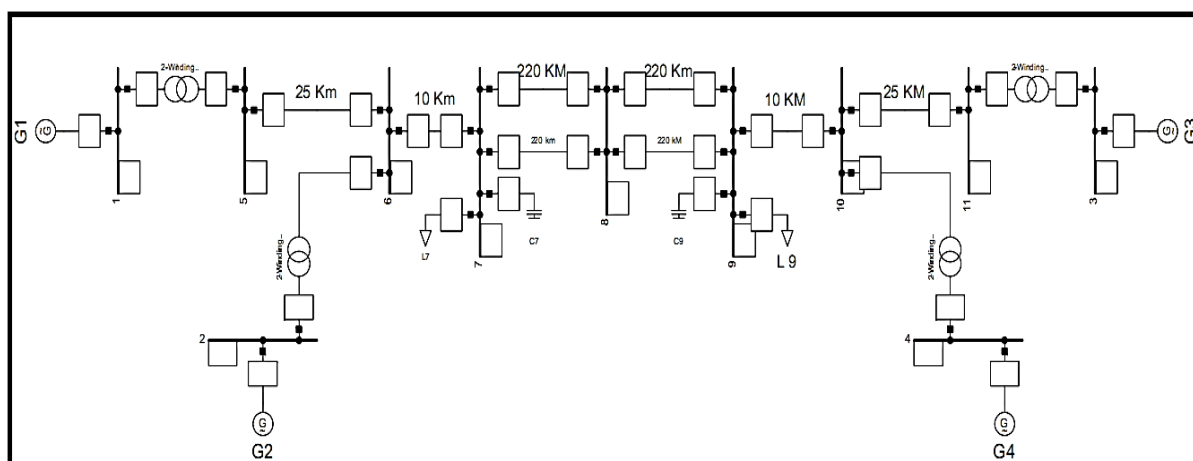
۶- پایداری سیگنال کوچک شبکه وابسته به مدل و پارامترهای سیستم تحریک می‌باشد و عدم قطعیت در هر کدام از این دو سبب عدم اطمینان در نتایج پایداری خواهد شد.

۲-۲-۴ شبکه‌ی نمونه ۲ ناحیه‌ای ۴ ماشینه

با توجه به اینکه در بخش ۱-۲-۴ با پروسه تحلیل و انجام بررسی‌ها آشنا شده‌ایم، در این بخش سعی خواهیم کرد با نگاه کلی‌تر و با ارائه جدول‌ها و گراف‌های جامع‌تر، سریع‌تر و با همان دقت نتایج مربوطه را ارائه کنیم.

نمایی از ساختار تک خطی شبکه‌ی نمونه دو ناحیه‌ای ۴ ماشینه در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. سیستم شامل دو ناحیه‌ی مشابه که با خط ارتباطی ضعیف، به هم متصل شده‌اند می‌باشد. طول خطوط واسط به نحوی انتخاب شده است که بیشترین توان (اکتیو و راکتیو) از این خطوط عبور کند. در این حالت شبکه به سمت ناپایداری حرکت کرده و بدترین شرایط برای بررسی پایداری به وجود می‌آید.

بررسی‌ها در دو زیر بخش مربوط به اثر گذاری مدل‌ها و پارامترهای مختلف سیستم تحریک بر روی مد الکترومکانیکی، انجام خواهد شد. با توجه به ساختار شبکه که دارای مد بین ناحیه‌ای کم میرا یا نامیرایی خواهد بود و با در نظر گرفتن اهمیت مدهای الکترومکانیکی در مطالعات پایداری سیگنال کوچک، نتایج تنها برای مد بین ناحیه‌ای شبکه ارائه خواهد شد.



شکل ۴-۸: مدل شبکه‌ی نمونه دو ناحیه‌ای ۴ ماشینه

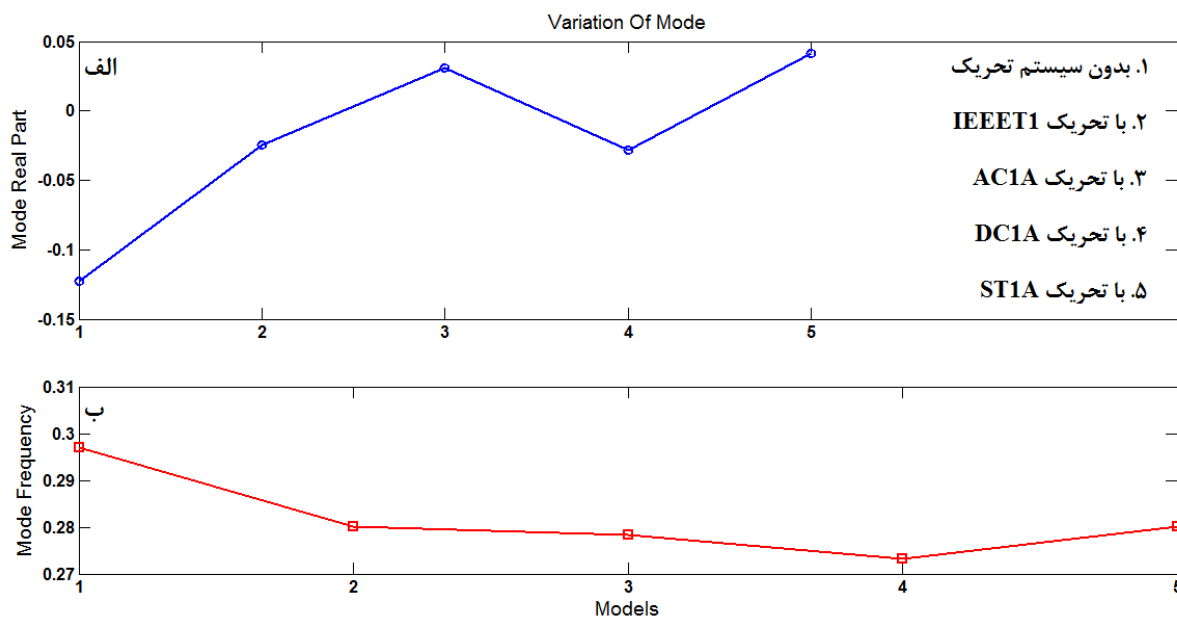
۴-۲-۱ تأثیر مدل‌های مختلف سیستم تحریک بر روی مد بین ناحیه‌ای شبکه‌ی ۴

ماشینه

تغییرات به وجود آمده در مد الکترومکانیکی شبکه به دلیل تغییر مدل‌های تحریک به صورت جدول‌بندی و نمایش گرافیکی در ادامه آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌کنید تأثیر عدم قطعیت در مدل تحریک در شبکه ۴ ماشین کمتر از حالت تک ماشین می‌باشد. در این شبکه مدها برای ۲ مدل تحریک ناپایدار می‌باشند ولی در شبکه‌ی تک ماشین در هر ۴ مدل، مد بین ناحیه‌ای ناپایدار بوده است. همچنین مقدار حقیقی آن نیز نسبت به حالت قبل بسیار کوچک‌تر می‌باشد. بطوریکه در هنگام استفاده از مدل تحریک AC1A مقدار حقیقی مد الکترومکانیکی از $0/8$ در شبکه‌ی تک ماشین به مقدار $0/03$ در شبکه‌ی ۴ ماشین کاهش یافته است. با این حال نمی‌توان از تأثیر عدم قطعیت در مدل تحریک صرف نظر کرد و باید برای اطمینان از نتایج آنالیز پایداری، در مدل‌سازی‌ها از مدل دقیق سیستم تحریک استفاده شود.

جدول ۴-۲۰: نتایج تأثیر تغییرات مدل‌های تحریک بر مد الکترومکانیکی سیستم ۴ ماشین

Sys Without AVR	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00026	-0.1224857	1.865883	0.2969644	3.367407	0.0655039
Mode 00027	-0.1224857	-1.865883	0.2969644	3.367407	0.0655039
Sys With AVR IEEE T1	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00032	-0.0249006	1.760582	0.2802053	3.568812	0.014142
Mode 00033	-0.0249006	-1.760582	0.2802053	3.568812	0.014142
Sys With AVR AC1A	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00034	0.0312336	1.748277	0.278247	3.593929	-0.0178625
Mode 00035	0.0312336	-1.748277	0.278247	3.593929	-0.0178625
Sys With AVR DC1A	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00034	-0.0285391	1.717199	0.2733007	3.658974	0.0166173
Mode 00035	-0.0285391	-1.717199	0.2733007	3.658974	0.0166173
Sys with AVR ST1A	قسمت حقیقی	قسمت موهومی	فرکانس	پریود زمانی	ضریب میرایی
Mode 00030	0.0411859	1.759752	0.2800733	3.570494	-0.023398
Mode 00031	0.0411859	-1.759752	0.2800733	3.570494	-0.023398



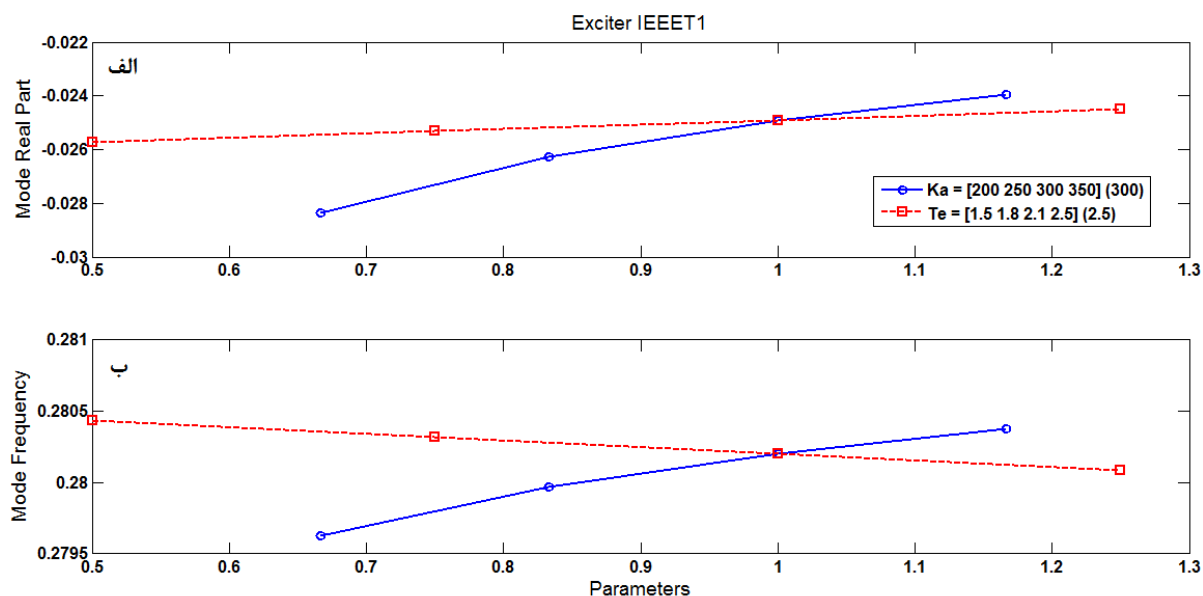
شکل ۴-۹: نرخ تغییرات مد شبکه ۴ ماشین برای مدل‌های مختلف تحریک. الف- قسمت حقیقی مد. ب- فرکانس مد.

۴-۲-۲-۲ تأثیر پارامترهای مختلف سیستم تحریک بر روی مد بین ناحیه‌ای شبکه‌ی ۴

ماشینه

نتایج مربوط به تغییر قسمت حقیقی و فرکانس مد بین ناحیه‌ای به دلیل تغییر در پارامترهای سیستم‌های تحریک IEEE1، AC1A، DC1A و ST1A به ترتیب در جدول‌های ۴-۲۱ تا ۴-۲۴ آورده شده است. همچنین برای درک بهتر گراف‌های مربوط به تغییرات مد در شکل‌های ۴-۱۰ تا ۴-۱۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که از گراف‌ها مشخص است فرکانس مد تأثیر ناچیزی از تغییر پارامترها دریافت کرده است که صرف نظر کردن از این تغییر قابل قبول می‌باشد و همانند شبکه‌ی تک ماشین عدم قطعیت در پارامترهای تحریک بر روی فرکانس مد بی‌تأثیر می‌باشد. در مورد قسمت حقیقی مد وضعیت متفاوت می‌باشد. در بعضی سیستم‌های تحریک، تغییر پارامتر سبب می‌شود مد الکترومکانیکی از حالت پایدار به سمت مرز ناپایداری حرکت می‌کنند و یا ناپایدارتر می‌شود که نشان از تأثیرپذیری آن از تغییر پارامترها و یا همان عدم قطعیت در آن‌ها دارد. این در حالی است که نرخ تغییرات قسمت حقیقی مد در شبکه‌ی ۴ ماشین کمتر از شبکه‌ی تک ماشین می‌باشد. علت این امر را می‌توان افزایش متغیرهای شبکه و کاهش اثرگذاری متغیرهای مکانیکی بر روی مد الکترومکانیکی شبکه دانست.

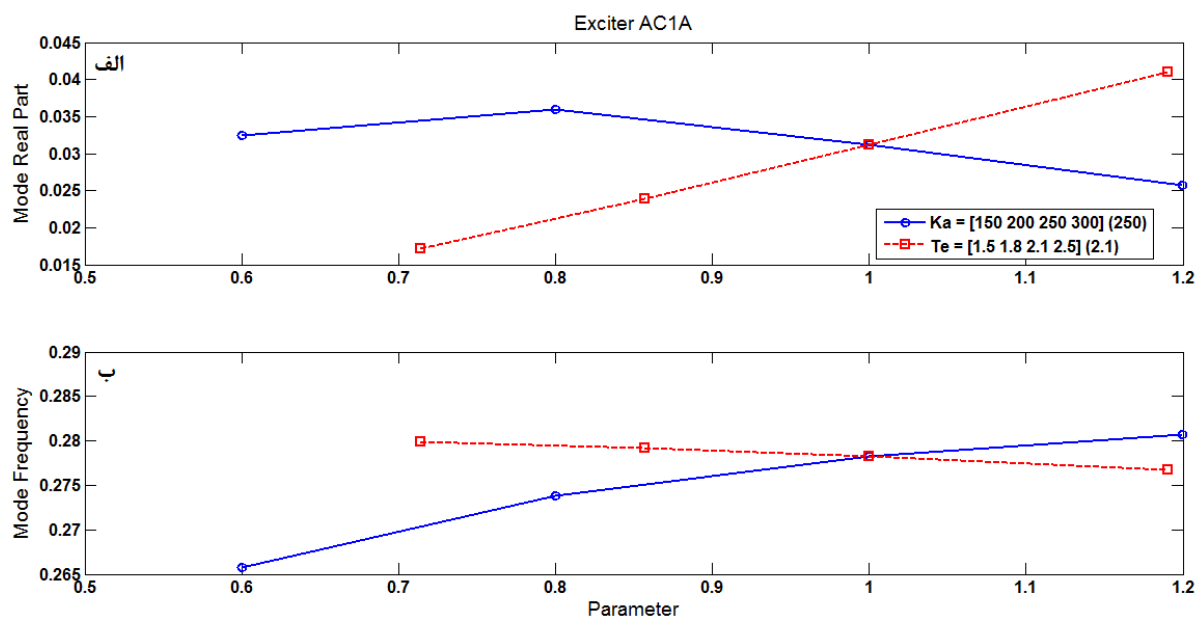
بدین ترتیب همانند شبکه تک ماشینه باید گفت قسمت حقیقی مد و پایداری متأثر از عدم قطعیت در پارامترهای اکسایتر می‌باشند و برای اطمینان از نتایج آنالیز پایداری بهتر است از پارامترهای دقیق آن استفاده شود.



شکل ۴-۱۰: اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک IEEE1 بر روی مد بین ناحیه‌ای. الف: قسمت حقیقی مد. ب: فرکانس مد.

جدول ۴-۲۱: تغییرات مد بین ناحیه‌ای بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک IEEE1

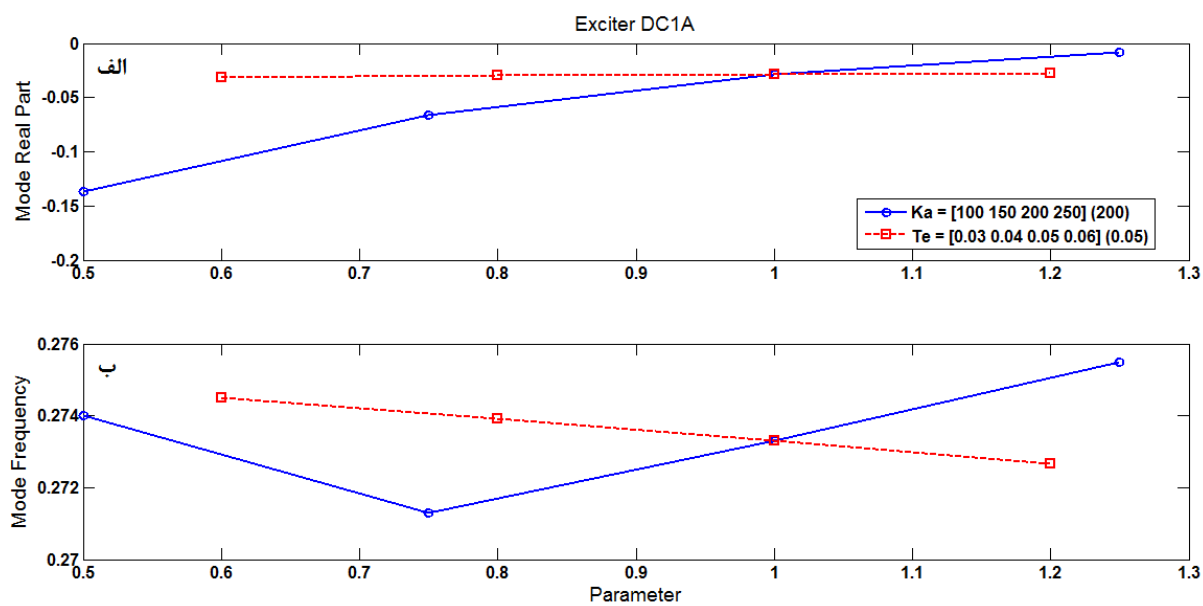
تغییرات پارامترهای سیستم تحریک		قسمت حقیقی مد	فرکانس مد
بهره تنظیم کننده ولتاژ (K_a)	200	-0.02836	0.2796271
	250	-0.02626	0.27997
	300	-0.0249	0.2802053
	350	-0.02395	0.2803764
ثابت زمانی سیستم تحریک (T_e)	0.1	-0.02572	0.2804352
	0.15	-0.02531	0.2803208
	0.2	-0.0249	0.2802053
	0.25	-0.02449	0.2800885



شکل ۴-۱۱: اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک AC1A بر روی مد بین ناحیه‌ای. الف: قسمت حقیقی مد. ب: فرکانس مد.

جدول ۴-۲۲: تغییرات بین ناحیه‌ای بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک AC1A

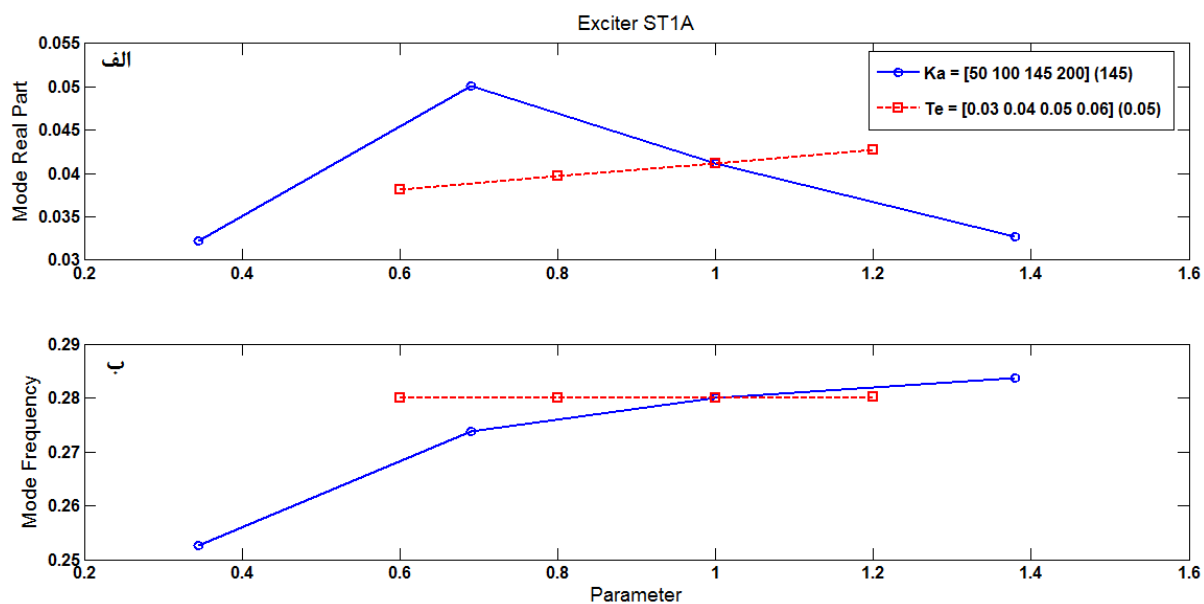
تغییرات پارامترهای سیستم تحریک		قسمت حقیقی مد	فرکانس مد
بهره تنظیم کننده ولتاژ (K_a)	150	0.03247381	0.265705
	200	0.03595031	0.2738371
	250	0.0312336	0.278247
	300	0.02572827	0.2807569
ثابت زمانی سیستم تحریک (T_e)	1.5	0.01713898	0.2798752
	1.8	0.02397153	0.2791619
	2.1	0.0312336	0.278247
	2.5	0.04101442	0.2767189



شکل ۴-۱۲: اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک DC1A بر روی مد بین ناحیه‌ای. الف: قسمت حقیقی مد. ب: فرکانس مد.

جدول ۴-۲۳: تغییرات مد بین ناحیه‌ای بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک DC1A

تغییرات پارامترهای سیستم تحریک		قسمت حقیقی مد	فرکانس مد
بهره تنظیم کننده ولتاژ (K_a)	100	-0.1366806	0.273993
	150	-0.06640712	0.271305
	200	-0.02853908	0.273301
	250	-0.00837008	0.275501
ثابت زمانی سیستم تحریک (T_e)	0.03	-0.03129121	0.2745
	0.04	-0.02992039	0.27391
	0.05	-0.02853908	0.273301
	0.06	-0.02714827	0.27267



شکل ۴-۱۳: اثر تغییر پارامترهای سیستم تحریک ST1A بر روی مد بین ناحیه‌ای. الف: قسمت حقیقی مد. ب: فرکانس مد.

جدول ۴-۲۴: تغییرات مد بین ناحیه‌ای بر مبنای تغییر در پارامترهای سیستم تحریک ST1A

تغییرات پارامترهای سیستم تحریک		قسمت حقیقی مد	فرکانس مد
بهره تنظیم کننده ولتاژ (K_a)	50	0.03223482	0.252565
	100	0.05009263	0.273747
	145	0.04118587	0.280073
	200	0.0326804	0.283637
ثابت زمانی تنظیم کننده ولتاژ (T_a)	0.03	0.03817382	0.279976
	0.04	0.03967436	0.280025
	0.05	0.04118587	0.280073
	0.06	0.04270846	0.280122

۳-۲-۲-۴ نتایج مطالعات در شبکه دو ناحیه‌ای ۴ ماشینه

نتایج این بخش بر مبنای جدول‌ها، گراف‌ها و مطالب ارائه شده در قسمت‌های قبل به صورت زیر مرتب می‌شود:

۱- عدم قطعیت در مدل سیستم‌های تحریک که به صورت استفاده از سیستم‌های مختلف تحریک در بررسی‌ها نشان داده شده است، تأثیر ناچیزی بر فرکانس مد الکترومکانیکی داشته است و قابل صرف نظر می‌باشد.

۲- فرکانس مد الکترومکانیکی در اثر اعمال پارامترهای مختلف برای هر سیستم تحریک مشخص، تغییرات بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی داشته است.

۳- با توجه به بندهای بالا فرکانس مد الکترومکانیکی مستقل از عدم قطعیت در اطلاعات مدل و پارامترهای سیستم تحریک است.

۴- قسمت حقیقی مد الکترومکانیکی که شاخص پایداری محسوب می‌شود، در اثر اعمال مدل‌های مختلف تحریک، بازه‌ی تغییرات ۰/۱۶ را تجربه می‌کند. این میزان تغییر مقدار قابل توجهی است و نمی‌توان از آن صرف نظر کرد.

۵- تغییرات قسمت حقیقی مد بین ناحیه‌ای در مقایسه با مقدار مبنای آن قابل صرف نظر نیست و برای اطمینان از نتایج آنالیز پایداری بهتر است مقادیر صحیح پارامترها اعمال شود.

۶- پایداری سیگنال کوچک شبکه بر مبنای قسمت حقیقی مد بین ناحیه‌ای وابسته به مدل و پارامترهای سیستم تحریک می‌باشد و عدم قطعیت در هر کدام از این دو سبب عدم اطمینان در نتایج پایداری خواهد شد.

۷- تغییرات مد الکترومکانیکی در شبکه‌ی ۴ ماشینه نسبت به حالت تک ماشینه به شدت کاهش یافته است. انتظار داریم در شبکه‌های بزرگ‌تر مانند شبکه کشور این تغییرات بسیار کوچک‌تر و قابل صرف نظر کردن باشند.

فصل ۵

بررسی اثر عدم قطعیت در اطلاعات سیستم‌های

تحریک بر شیف‌ت فاز جبران سازی

۵-۱ مقدمه

همان‌طور که گفته شد مقدار زاویه‌ی جبران سازی با تأثیرپذیری مستقیم از عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک می‌تواند بر روی تنظیم PSS اثر بگذارد. در این بخش قصد داریم با بررسی مقدار زاویه‌ی جبران سازی پس فاز در مدل‌ها و پارامترهای مختلف تحریک در مورد اثرپذیری فاز جبران سازی از عدم قطعیت مذکور اظهار نظر کنیم.

همچنین با توجه به استفاده از مدل‌های تحریک متناوب و استاتیک در سیستم اکسایتر امروزی و جایگزینی مدل‌های مستقیم با این مدل‌ها، آنالیزها و بررسی‌ها بر روی انواع سیستم‌های تحریک استاندارد این دو مدل ارائه شده است. نتایج و تحلیل‌ها در زیر بخش‌های مربوط به سیستم‌های تحریک متناوب و استاتیک ارائه شده است. در هر زیر بخش ابتدا تأثیر پارامترهای مختلف تحریک بر روی شیف‌ت فاز مدل سنجیده می‌شود، سپس در مورد امکان سنجی تنظیم و طراحی رویاست PSS در مدل‌های مختلف سیستم تحریک متناوب بحث خواهد شد و در مورد اثر این مدل‌ها بر روی زاویه جبران سازی اظهار نظر خواهیم کرد.

در مطالعات افزایش میرایی مدهای الکترومکانیکی از پایدارساز سیستم قدرت مدل PSS1A با ورودی انحراف سرعت استفاده شده است. اصول عملکرد بهینه آن بر طبق نکات و معادلات ارائه شده در بخش ۳-۴ می باشد. شبکه‌ی تست مورد استفاده همان سیستم نمونه دو ناحیه‌ای ۴ ماشینه شکل ۴-۸ است.

۵-۲ سیستم‌های تحریک متناوب

۵-۲-۱ بررسی تأثیر پارامترها بر روی شیف‌ت فاز مدل‌های سیستم تحریک متناوب

به منظور دست یافتن به نتایجی جامع، از مدل‌های متنوع تحریک متناوب در بررسی‌ها سود برده‌ایم. مدل‌های در این بخش بررسی خواهند شد عبارتند از مدل AC1A، AC2A، AC3A، AC4A، AC5A، AC6A و AC8B. در این مدل‌ها ابتدا با ساده‌سازی و بدست آوردن تابع تبدیل تحریک، با استفاده از حل رابطه (۳-۵) در فرکانس مورد نظر، مقدار شیف‌ت فاز تابع تبدیل GEP به منظور جبران سازی را بدست خواهیم آورد. سپس تأثیر تغییر پارامترهای استفاده شده در هر یک از مدل‌ها بر روی شیف‌ت فاز را بررسی خواهیم کرد.

۵-۲-۱-۱ سیستم تحریک مدل AC1A

در شکل ۲-۹ نمای تک خطی مدل تحریک متناوب نوع ۱ نمایش داده شده است. برای محاسبه‌ی زاویه‌ی جبران سازی نیازمند محاسبه‌ی تابع تبدیل سیستم تحریک می‌باشیم. بنابراین باید ابتدا مدل را ساده کنیم. در مطالعات پایداری سیگنال کوچک از بلوک‌های مزایده‌ای و حدود اعمالی برای سایر بلوک‌ها صرف نظر می‌کنیم و بقیه ورودی‌ها به غیر از ورودی پایدارساز را صفر در نظر می‌گیریم [۱]. با حذف بلوک‌های مزایده‌ای و حدود اعمالی، مد تحریک بسیار ساده‌تر خواهد شد ولی همان‌طور که از شکل ۲-۹ مشخص است در انتهای مدل شاهد ضرب کننده‌ای می‌باشیم که بدست آوردن تابع تبدیل از روابط معمول را برای ما دشوار خواهد کرد. همان‌طور که قبلاً نیز گفته‌ایم، این ضرب کننده نشان‌دهنده اثر افت ولتاژ خروجی تحریک به سبب وقوع کموتاسیون در یکسو ساز می‌باشد. بر طبق مباحث مطرح شده در بخش ۲-۴-۲ این

ضرب کننده با اعمال عددی کوچکتر از ۱ تأثیر کموتاسیون بر روی خروجی تحریک را نمایش می‌دهد. با توجه به اینکه در بحث تنظیم PSS زاویه پس فازی ایجاد شده در مسیر سیستم تحریک مهم می‌باشد و این ضرب کننده تنها عددی صحیح در خروجی اعمال می‌کند می‌توان از آن صرف نظر کرد. جدا از این تحلیل، زمانی که تابع تبدیل را برای ورودی PSS محاسبه می‌کنیم باید سایر ورودی‌ها را صفر قرار دهیم که در این صورت با صفر کردن ورودی جریان تحریک (I_{FD}) خروجی بلوک F_{ex} برابر با ۱ خواهد بود که در خروجی مدل بی‌تأثیر خواهد بود. از سوی دیگر نیز اگر اثر کموتاسیون را ناچیز در نظر بگیریم، با توجه به مطالب بیان شده در مرجع [۳۹]، ضرب کننده مجدداً عدد ۱ را در خروجی تحریک ضرب خواهد کرد که تأثیری در فاز تابع تبدیل نخواهد داشت.

در دیاگرام مدل تحریک AC1A شاهد حضور بلوک اشباع که یک مؤلفه‌ی غیر خطی محسوب می‌شود، هستیم. برای در نظر گرفتن اثر بلوک اشباع در تابع تبدیل مدل، ابتدا می‌بایست آن را خطی کنیم. به طور معمول تابع اشباع به صورت یک تابع نمایی بیان می‌شود و برای خطی سازی آن فرآیند زیر را دنبال خواهیم کرد:

$$S_E(E_{FD}) = A_{sat} \times \exp(B_{sat} \times E_{FD})$$

$$\Delta S_E = \frac{dS_E}{dE_{FD}} \times \Delta E_{FD} \quad (1-5)$$

$$S_E(E_{FD}) = B_{sat} \times A_{sat} \times \exp(B_{sat} \times E_{FD0})$$

که در آن E_{FD} خروجی تحریک می‌باشد که به صورت ورودی بلوک اشباع در نظر گرفته شده است، A_{sat} و B_{sat} ثابت‌هایی وابسته به مشخصه‌ی اشباع در حالت بی‌باری و E_{FD0} مقدار اولیه ولتاژ خروجی تحریک می‌باشد [۱]. در روابط بالا E_{FD} همان V_E در دیاگرام ۲-۹ است.

هدف ما یافتن رنج تغییرات شیف فازی تابع تبدیل GEP برای فرکانس‌های مختلف است. با داشتن تابع تبدیل در حوزه‌ی لاپلاس و جایگذاری $s = j\omega$, $\omega = 2\pi f$ ، برای فرکانس‌های مختلف این مقدار بدست می‌آید. سپس با محاسبه‌ی تغییر ایجاد شده در شیف فاز به سبب تغییر در پارامترهای مدل، حساسیت آن

را به عدم قطعیت در پارامترهای مدل تحریک محاسبه خواهیم کرد. مقدار حساسیت شیفیت فاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{\phi_2 - \phi_1}{abs(\phi_1)} * 100 \quad (2-5)$$

در رابطه‌ی بالا ϕ_1 مقدار اولیه زاویه برای عدم تغییر در پارامتر و ϕ_2 مقدار جدید زاویه به سبب تغییر در پارامتر می‌باشد. در واقع این رابطه مقدار پریونیت اختلاف فاز می‌باشد که به درصد بیان شده است. در رابطه‌ی حساسیت برای مشخص شدن راستای تغییرات، عبارت بالای کسر بر روی اندازه‌ی مقدار اولیه‌ی فاز تقسیم می‌شود.

با توجه به مدل AC1A می‌توان تأثیر پارامترهای آورده شده در جدول ۵-۱ را بر روی شیفیت فاز مورد بررسی و تحلیل قرار داد.

جدول ۵-۱ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل AC1A

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر ۱۰٪+	تغییر ۱۰٪-
بهره تنظیم‌کننده ولتاژ	Ka	250	275	225
ثابت زمانی تنظیم‌کننده ولتاژ	Ta	0.003	0.0033	0.0027
ثابت زمانی فیلتر مشتقی	Tc	0.09	0.099	0.081
زمان تأخیر فیلتر	Tb	0.02	0.022	0.018
ثابت زمانی پایدارساز تحریک	Tf	1	1.1	0.9
ثابت زمانی سیستم تحریک	Te	2.1	2.31	1.89

برای تمام پارامترها تغییری $\pm 10\%$ درصد در نظر گرفته شده و مقادیر حساسیت فاز با توجه به مد بین ناحیه‌ای شبکه‌ی ۴ ماشین در فرکانس ۰/۲۷ هرتز محاسبه شده است. جدول‌های ۵-۲ و ۵-۳ به ترتیب مقدار تغییر فاز و حساسیت شیفیت فاز تابع تبدل GEP به همراه مدل AC1A را برای ۱۰ درصد تغییر در پارامترهای مدل تحریک در فرکانس ۰/۲۷ هرتز نشان می‌دهند. با توجه به جدول ۵-۳ مقدار حساسیت شیفیت فاز برای پارامترهای بهره تنظیم‌کننده ولتاژ و ثابت زمانی‌های تحریک و فیلتر دیفرانسیلی نسبت به

سایر پارامترها بیشتر بوده است. با این حال با توجه به جدول ۵-۲ بیشترین مقدار حساسیت، تغییری کمتر از ۱ درجه را در شیفت فاز ایجاد کرده است که صرف نظر کردن از آن قابل قبول است.

جدول ۵-۲: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل AC1A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27	10% Variation	-10% Variation
Ka	-4.98285884	-4.509386	-5.58276829
Ta	-4.98285884	-4.97767133	-4.98804586
Tc	-4.98285884	-5.12109107	-4.8404207
Tb	-4.98285884	-4.94882417	-5.01687076
Tf	-4.98285884	-4.95028263	-5.01608844
Te	-4.98285884	-5.20917456	-4.76493866

جدول ۵-۳: مقدار حساسیت شیفت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل AC1A

F=0.27	10% Variation	-10% Variation
Ka	9.502031 %	-12.03946 %
Ta	0.104107 %	-0.104097 %
Tc	-2.77415 %	2.858562 %
Tb	0.683034 %	-0.682578 %
Tf	0.653765 %	-0.666878 %
Te	-4.54188 %	4.373396 %

بر پایه جدول‌های ارائه شده در بالا و مطالب بیان شده در می‌یابیم شیفت فاز جبران سازی مستقل از عدم قطعیت در پارامترهای سیستم تحریک مدل AC1A است.

۵-۲-۱-۲ سیستم تحریک مدل AC2A

دیاگرام تک خطی مدل AC2A در فصل ۲ و شکل ۲-۱۰ آورده شده است. این مدل بسیار شبیه به مدل AC1A می‌باشد و تنها در بلوک‌های کنترلی و حدود اعمالی اندکی متفاوت از مدل نوع ۱ است. این در حالی است که در مطالعات سیگنال کوچک این حدود در نظر گرفته نمی‌شود. از جهت مقادیر نوعی

پارامترها نیز این دو مدل بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند. بنابراین انتظار داریم نتیجه‌ای که از مدل AC2A دریافت می‌کنیم شباهت خوبی با نتایج بالا داشته باشد. پس از ساده سازی مدل AC2A بر اساس نکات بیان شده در بخش قبل و اعمال تغییرات بیان شده برای پارامترها بر طبق جدول ۴-۵، نتایج مربوط به مقدار شیف‌ت فاز و حساسیت آن به تغییر ۱۰ درصدی پارامترها در فرکانس ۰/۲۷ هرتز، به ترتیب در جدول‌های ۵-۵ و ۶-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵: مقادیر پارامترهای موثر در مدل AC2A و تغییرات اعمال شده

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر ۱۰٪+	تغییر ۱۰٪-
بهره آمپلی‌فایر	Ka	250	275	225
ثابت زمانی آمپلی‌فایر	Ta	0.01	0.011	0.009
ثابت زمانی پیش فاز	Tc	0.09	0.099	0.081
زمان تأخیر پس فاز	Tb	0.02	0.022	0.018
ثابت زمانی پایدارساز تحریک	Tf	1	1.1	0.9
ثابت زمانی سیستم تحریک	Te	2.1	2.31	1.89
بهره کنترلر	Kb	1	1.1	0.9
بهره مسیر پایدارساز	Kh	0.02	0.022	0.018

نتایج جدول ۴-۲۹ بسیار نزدیک به نتایج AC1A می‌باشد که مورد انتظار نیز بوده است. بهره‌های تنظیم‌کننده ولتاژ (Ka) و کنترلی (Kb) بیشترین مقادیر حساسیت را در شیف‌ت فاز ایجاد می‌کنند که نتیجه‌ی آن حداکثر تغییر کمتر از ۱ درجه می‌باشد و قابل صرف نظر است. بدین ترتیب همانند قبل شیف‌ت فاز مستقل از تغییر در پارامترهای سیستم تحریک مدل AC2A می‌باشد.

جدول ۵-۵: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل AC2A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	-4.92336659	-4.45578974	-5.51594508
Ta	-4.92336659	-4.90606974	-4.94065789
Tc	-4.92336659	-5.06275061	-4.7797961
Tb	-4.92336659	-4.88909886	-4.95761168
Tf	-4.92336659	-4.89080673	-4.95656986
Te	-4.92336659	-5.13561992	-4.719015
Kb	-4.92336659	-4.46131403	-5.50896862
Kh	-4.92336659	-4.92953302	-4.9171999

جدول ۵-۶ مقدار حساسیت شیفیت فاز نسبت به تغییر پارامترهای AC2A

F=0.27	10%	-10%
Ka	9.49709588 %	-12.0360424 %
Ta	0.35132151 %	-0.35120895 %
Tc	-2.83107123 %	2.91610393 %
Tb	0.69602239 %	-0.69556245 %
Tf	0.66133333 %	-0.67440178 %
Te	-4.31114215 %	4.15064738 %
Kb	9.38489048 %	-11.8943413 %
Kh	-0.12524829 %	0.12525345 %

۵-۲-۱-۳ سیستم تحریک مدل AC3A

دیگرام بلوکی مدل AC3A در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. همانند بخش‌های قبل می‌توان با ساده‌سازی مدل تحریک و محاسبه‌ی تابع تبدیل آن با استفاده از رابطه‌های (۳-۵) و (۵-۲) مقدار شیفیت فاز و حساسیت آن نسبت به تغییر $\pm 10\%$ درصدی در پارامترها را بدست آورد. توجه داشته باشید که در این مدل بهره پایدارساز تحریک خاصیت غیر خطی دارد و با توجه به مقدار خروجی تحریک دو مقدار را برای بهره در نظر می‌گیرد. ولی از آنجایی که این دو مقدار در مقادیر نوعی پارامترهای تحریک یکی انتخاب شده‌اند بنابراین در هر حالت خروجی تحریک، بهره پایدارساز سیستم تحریک عدد ثابتی خواهد داشت و می‌توان این بلوک را به صورت یک بهره‌ی ثابت در نظر گرفت. بر اساس مدل AC3A پارامترهای موثری که باید اثر آن‌ها بر روی شیفیت فاز بررسی شود به همراه تغییرات اعمالی آن‌ها در جدول زیر آورده شده‌اند.

جدول ۵-۷: مقادیر پارامترهای موثر در مدل AC3A و تغییرات اعمال شده

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر ۱۰٪+	تغییر ۱۰٪-
بهره آمپلی‌فایر	Ka	100	110	90
ثابت زمانی آمپلی‌فایر	Ta	0.01	0.011	0.009
ثابت زمانی فیلتر مشتق	Tc	0.09	0.099	0.081
زمان فیلتر تأخیر	Tb	0.02	0.022	0.018
ثابت زمانی مسیر پایدارساز	Tf	1	1.1	0.9
ثابت زمانی تحریک	Te	2.1	2.31	1.89
بهره تحریک	Ke	0.53	0.583	0.477

مقادیر شیفت فاز و حساسیت آن برای تغییر پارامترها در جدول‌های ۵-۸ و ۵-۹ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۸ مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل AC3A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	-10.7088714	-9.28111816	-12.6839965
Ta	-10.7088714	-10.6499728	-10.7677101
Tc	-10.7088714	-11.1848238	-10.2147085
Tb	-10.7088714	-10.5914702	-10.826013
Tf	-10.7088714	-10.6531147	-10.7684926
Te	-10.7088714	-11.8768813	-9.68111515
Ke	-10.7088714	-11.2507754	-10.163888

جدول ۵-۹ مقدار حساسیت شیفت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل AC3A

F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	13.3324343 %	-18.4438216 %
Ta	0.54999849 %	-0.54943847 %
Tc	-4.44446868 %	4.61451934 %
Tb	1.09629861 %	-1.09387463 %
Tf	0.52065875 %	-0.5567458 %
Te	-10.9069369 %	9.59724151 %
Ke	-5.06032755 %	5.08908387 %

در فرکانس ۰/۲۷ هرتز مانند حالات قبل شیفت فاز نسبت به تغییر بهره تنظیم‌کننده ولتاژ (Ka) بیشترین حساسیت (۱۸٪-) را دارد و ثابت زمانی تحریک‌کننده (Te) نیز تأثیری در حدود ۱۰ درصد بروی شیفت فاز می‌گذارد. با این حال حداکثر تغییر شیفت فاز در حدود ۲ درجه می‌باشد که مقداری کوچک است و صرف نظر کردن از آن نمی‌تواند نتایج ما را تحت تأثیر قرار دهد.

۴-۱-۲-۵ سیستم تحریک مدل AC4A

دیگرام مدل تحریک AC4A که ساده‌ترین مدل تحریک متناوب به حساب می‌آید در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است. با توجه به سادگی آن، ساده سازی و محاسبه‌ی تابع تبدیل آن کار دشواری نخواهد بود. بر این اساس پارامترهای موثر در محاسبه‌ی شیف‌ت فاز به همراه تغییرات ۱۰ درصدی آن‌ها در جدول ۱۰-۵ آورده شده است. با اعمال مقادیر انتخابی برای پارامترها، شیف‌ت فاز و حساسیت آن به تغییر پارامترها به ترتیب در جدول‌های ۱۱-۵ و ۱۲-۵ نمایش داده شده است.

بر طبق نتایج حاصله تغییر پارامترهای سیستم تحریک AC4A تأثیر بسیار ناچیزی بر روی شیف‌ت فاز داشته است و در بدترین حالت تغییر کمتر از ۱ درجه را در آن به وجود آورده است.

جدول ۱۰-۵ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل AC4A و تغییرات اعمال شده

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر ۱۰٪+	تغییر ۱۰٪-
بهره آمپلی‌فایر	Ka	100	110	90
ثابت زمانی آمپلی‌فایر	Ta	0.01	0.011	0.009
ثابت زمانی فیلتر مشتق	Tc	0.2	0.22	0.18
زمان فیلتر تأخیر	Tb	0.05	0.055	0.045

جدول ۱۱-۵ مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل AC4A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	-5.93114318	-5.40709322	-6.56718300
Ta	-5.93114318	-5.93467698	-5.92761058
Tc	-5.93114318	-5.80826026	-6.04773212
Tb	-5.93114318	-5.95200237	-5.91031824

جدول ۱۲-۵ مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل AC4A

F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	8.83556415 %	-10.7237307 %
Ta	-0.05958041 %	0.05956022 %
Tc	2.07182527 %	-1.96570779 %
Tb	-0.35168918 %	0.35111175 %

۵-۱-۲-۵ سیستم تحریک مدل AC5A

بررسی‌های انجام شده برای مدل‌های قبلی سیستم تحریک را این بار برای مدل تحریک AC5A که در شکل ۱۳-۲ نشان داده شده است، انجام می‌دهیم. پس از ساده‌سازی مدل و حذف بلوک‌های مزایده‌ای و حدود اعمالی، می‌توان پارامترها و تغییرات $\pm 10\%$ درصدی آن‌ها را به صورت جدول زیر نشان داد. با اعمال مقادیر نوعی و تغییرات پارامترها، مقدار شیفت فاز جبران سازی و حساسیت آن نسبت به تغییر پارامترها در جدول‌های ۱۴-۵ و ۱۵-۵ آورده شده است. با توجه به اینکه مقادیر نوعی پارامترهای ثابت زمانی پیش فاز و پس فاز ($Tf2, Tf3$) صفر می‌باشد مقادیر حساسیت آن‌ها نیز صفر خواهد بود.

جدول ۱۳-۵ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل AC5A و تغییرات اعمال شده

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر $+10\%$	تغییر -10%
بهره آمپلی‌فایر	Ka	200	220	180
ثابت زمانی کنترلر	Ta	0.03	0.033	0.027
ثابت زمانی مسیر ۱ پایدارساز	Tf1	3	3.3	2.7
ثابت زمانی مسیر ۲ پایدارساز	Tf2	0	0	0
ثابت زمانی مسیر ۳ پایدارساز	Tf3	0	0	0
ثابت زمانی تحریک	Te	0.8	0.88	0.72
بهره تحریک	Ke	1	1.1	0.9

بر اساس جدول ۱۵-۵ برخلاف سایر مدل‌ها که بهره تنظیم‌کننده ولتاژ حساسیت بالاتری دارا بود، در اینجا ثابت زمانی حلقه‌ی پایدارساز ($Tf1$) نسبت به سایر پارامترها مقدار حساسیت بیشتری دارد. بر پایه‌ی جدول ۱۴-۵ این حساسیت برای تغییر 10% درصدی پارامتر، تغییری در حدود ۳ درجه در شیفت فاز به وجود خواهد آورد که مقدار کوچکی می‌باشد و قابل صرف نظر کردن است.

جدول ۵-۱۴ : مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل AC5A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	-26.5674857	-25.738413	-27.5919304
Ta	-26.5674857	-26.5540432	-26.5809059
Tf1	-26.5674857	-24.3743481	-29.3300708
Tf2	-26.5674857	-26.5674857	-26.5674857
Tf3	-26.5674857	-26.5674857	-26.5674857
Te	-26.5674857	-27.4475219	-25.7654309
Ke	-26.5674857	-28.4993212	-24.5936145

جدول ۵-۱۵ : مقدار حساسیت شیف فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل AC5A

F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	3.12062906 %	-3.85600926 %
Ta	0.05059743 %	-0.05051374 %
Tf1	8.25496833 %	-10.3983689 %
Tf2	0	0
Tf3	0	0
Te	-3.31245573 %	3.01893378 %
Ke	-7.27142771 %	7.42964993 %

با توجه به جدول‌های بالا و مطالب بیان شده می‌توان شیف فاز را مستقل از تغییر پارامترهای مدل تحریک AC5A دانست و از تأثیر عدم قطعیت در پارامترهای آن بر روی شیف فاز صرف نظر کرد.

۵-۲-۱-۶ سیستم تحریک مدل AC6A

مدل تحریک AC6A در شکل ۲-۱۴ فصل ۲ نشان داده شده است. مراحل ساده‌سازی مدل همانند حالت‌های قبلی می‌باشد و محاسبه‌ی تابع تبدیل آن کار دشواری نخواهد بود. پارامترهای موثر در تابع تبدیل و در نتیجه تأثیرگذار در شیف فاز به صورت جدول ۵-۱۶ ارائه شده‌اند. همان‌طور که پیداست مقدار نوعی پارامتر بهره کنترلر (Kh) برابر با صفر می‌باشد. از شکل ۲-۱۴ در می‌یابیم با صفر بودن این پارامتر، دو ثابت زمانی پیش فاز - پس فاز (Tj و Th) در حلقه‌ی فیدبک هیچ تأثیری بر روی تابع تبدیل نخواهند داشت

و حساسیت این ۳ پارامتر صفر خواهد بود. نتایج عددی مقادیر شیف‌ت فاز و حساسیت آن برای فرکانس نوسان ۰/۲۷ هرتز در جدول‌های ۵-۱۷ و ۵-۱۸ آورده شده است.

جدول ۵-۱۶: مقادیر پارامترهای موثر در مدل AC6A و تغییرات اعمال شده

تغییر ۱۰٪ -	تغییر ۱۰٪ +	مقادیر نوعی	پارامترها
378	462	420	بهره کنترلر Ka
0.09	0.11	0.1	ثابت زمانی کنترلر Ta
59.0625	72.1875	65.625	ثابت زمانی پس فاز اول Tb
4.5	5.5	5	ثابت زمانی پیش فاز اول Tc
0.45	0.55	0.5	ثابت زمانی پیش فاز Tk
0.9	1.1	1	ثابت زمانی تحریک Te
0.9	1.1	1	بهره تحریک Ke
0.9	1.1	1	ثابت زمانی پیش فاز بلوک میرا کننده Tj
0	0	0	بهره بلوک میرا کننده Kh
0.9	1.1	1	ثابت زمانی پس فاز بلوک میرا کننده Th

همان‌طور که در جدول ۵-۱۷ نشان داده شده است برای فرکانس ۰/۲۷ هرتز مدل AC6A بیشترین مقدار شیف‌ت فاز را با مقدار ۳۲/۹۵ درجه، دارا می‌باشد. بر اساس جدول ۵-۱۸ پارامترهای بهره تنظیم‌کننده ولتاژ (Ka)، ثابت زمانی پیش فاز (Tc)، پس فاز (Tb) و تحریک (Te) تأثیر بیشتری نسبت به سایر پارامترها بر روی شیف‌ت فاز داشته‌اند. حداکثر حساسیت، اختلاف فازی در حدود ۴ درجه ایجاد کرده است که در مقایسه با مقدار مبنا (۳۲/۹۵) مقدار کوچکی است.

جدول ۵-۱۷: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل AC6A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	-32.946003	-29.5064519	-37.1662587
Ta	-32.946003	-33.032523	-32.8613672
Tb	-32.946003	-36.7454099	-29.1678792
Tc	-32.946003	-29.5787117	-37.1167092
Tk	-32.946003	-31.4412196	-34.4905932
Te	-32.946003	-35.7951943	-30.265768
Ke	-32.946003	-33.9488704	-31.8845636
Tj	-32.946003	-32.946003	-32.946003
Kh	-32.946003	-32.946003	-32.946003
Th	-32.946003	-32.946003	-32.946003

جدول ۵-۱۸ مقدار حساسیت شیفیت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل AC6A

F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	10.4399647 %	-12.809613 %
Ta	-0.2626114 %	0.25689261 %
Tb	-11.532224 %	11.4676244 %
Tc	10.220637 %	-12.659217 %
Tk	4.5674234 %	-4.6882476 %
Te	-8.6480634 %	8.13523592 %
Ke	-3.0439729 %	3.22175477 %
Tj	0	0
Kh	0	0
Th	0	0

با توجه به نتایج جدول‌های بالا به نظر می‌رسد مستقل بودن شیفیت فاز از تغییر پارامترها قابل قبول است.

۷-۱-۲-۵ سیستم تحریک مدل AC8B

شکل ۲-۱۵ در فصل ۲ نمای تک خطی مدل تحریک AC8B را نشان می‌دهد. با بهره‌گیری از قوانین گفته شده در بخش‌های قبل و محاسبه تابع اشباع برای پارامترهای جدید، می‌توان بدون هیچ ابهامی تابع تبدیل سیستم تحریک AC8B را محاسبه کرد. مقادیر نوعی پارامترهای موثر بر شیفیت فاز به همراه تغییرات انتخابی ما در جدول ۵-۱۹ آورده شده است.

جدول ۵-۱۹ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل AC8A و تغییرات اعمال شده

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر ۱۰٪+	تغییر ۱۰٪-
بهره کنترلر	Ka	200	220	180
ثابت زمانی کنترلر	Ta	0.02	0.022	0.018
بهره انتگرالی	Ki	0.25	0.275	0.225
بهره مشتقی	Kd	0.1	0.11	0.09
ثابت زمانی عملکرد مشتق	Td	0.2	0.22	0.18
ثابت زمانی تحریک	Te	0.35	0.385	0.315
بهره تحریک	Ke	0.5	0.55	0.45
بهره تناسبی	Kp	0.2	0.22	0.18

برای این پارامترها مقادیر شیف فاز و حساسیت آن نسبت به تغییر پارامترها در فرکانس ۰/۲۷ هرتز به ترتیب در جدول‌های ۵-۲۰ و ۵-۲۱ آورده شده است. بیشترین حساسیت در شیف فاز برای بهره تنظیم‌کننده ولتاژ (Ka)، بهره کنترلر (Kp) و بهره تحریک (Ke) رخ می‌دهد و در بدترین حالت تغییری در حدود ۱ درجه ایجاد می‌کند که مقداری ناچیز می‌باشد و می‌توان از آن صرف نظر کرد.

جدول ۵-۲۰: مقادیر شیف فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل AC8B در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	-7.58879962	-6.80848132	-8.569629
Ta	-7.58879962	-7.56280073	-7.6147709
Ki	-7.58879962	-7.10230103	-8.00591781
Kd	-7.58879962	-7.82629962	-7.24853014
Td	-7.58879962	-7.35309984	-7.8368498
Te	-7.58879962	-7.69953731	-7.4814422
Ke	-7.58879962	-8.3338123	-6.84140087
Kp	-7.58879962	-6.9444698	-8.36307466

جدول ۵-۲۱: مقدار حساسیت شیف فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل AC8B

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	10.2824997 %	-12.9246973 %	
Ta	0.34259554 %	-0.34223174 %	
Ki	6.41074496 %	-5.49649763 %	
Kd	-3.12961229 %	4.48383795 %	
Td	3.10589014 %	-3.26863524 %	
Te	-1.45922538 %	1.41468251 %	
Ke	-9.81726648 %	9.84870838 %	
Kp	8.49053666 %	-10.2028659 %	

۵-۲-۲ نتایج بررسی تأثیر عدم قطعیت در پارامترهای تحریک متناوب بر روی

شیفت فازی

می‌توان با توجه مباحث مطرح شده در این بخش نتایج را به صورت زیر مرتب کرد.

۱. پارامترهایی که بیشترین حساسیت را بر روی شیفت فاز داشته‌اند شامل بهره تنظیم‌کننده ولتاژ و

ثابت زمانی‌های فیلتر مشتق می‌باشند که در صورت در دسترس بودن آن‌ها، بهتر است از مقادیر

صحیح آن‌ها استفاده شود.

۲. پارامترهایی نظیر بهره پایدارساز سیستم تحریک و ثابت زمانی‌های پس فاز و یا ثابت زمانی‌هایی با

مقادیر بسیار کوچک تأثیر ناچیزی بر روی شیفت فاز داشته‌اند و می‌توان از اثر عدم قطعیت در آن‌ها

صرف نظر کرد.

۳. با توجه به اینکه بررسی‌ها در شرایط عدم قطعیت اکسایتر انجام شده است و اطلاعات دقیق در

دسترس نمی‌باشد می‌توان بطور کلی گفت که تأثیر تغییر پارامترها بر روی شیفت فاز کم می‌باشد و

صرف نظر کردن از آن‌ها اثر نامطلوبی بر روی نتایج شیفت فاز نخواهد گذاشت.

۵-۲-۳ امکان سنجی تنظیم PSS در شرایط عدم قطعیت مدل سیستم تحریک

متناوب

در این بخش بررسی اثرگذاری مدل‌های مختلف تحریک متناوب بر روی شیفت فاز را بررسی خواهیم کرد.

در واقع اثر عدم قطعیت مدل سیستم تحریک متناوب را بر روی تنظیم PSS بررسی خواهد کرد با توجه به

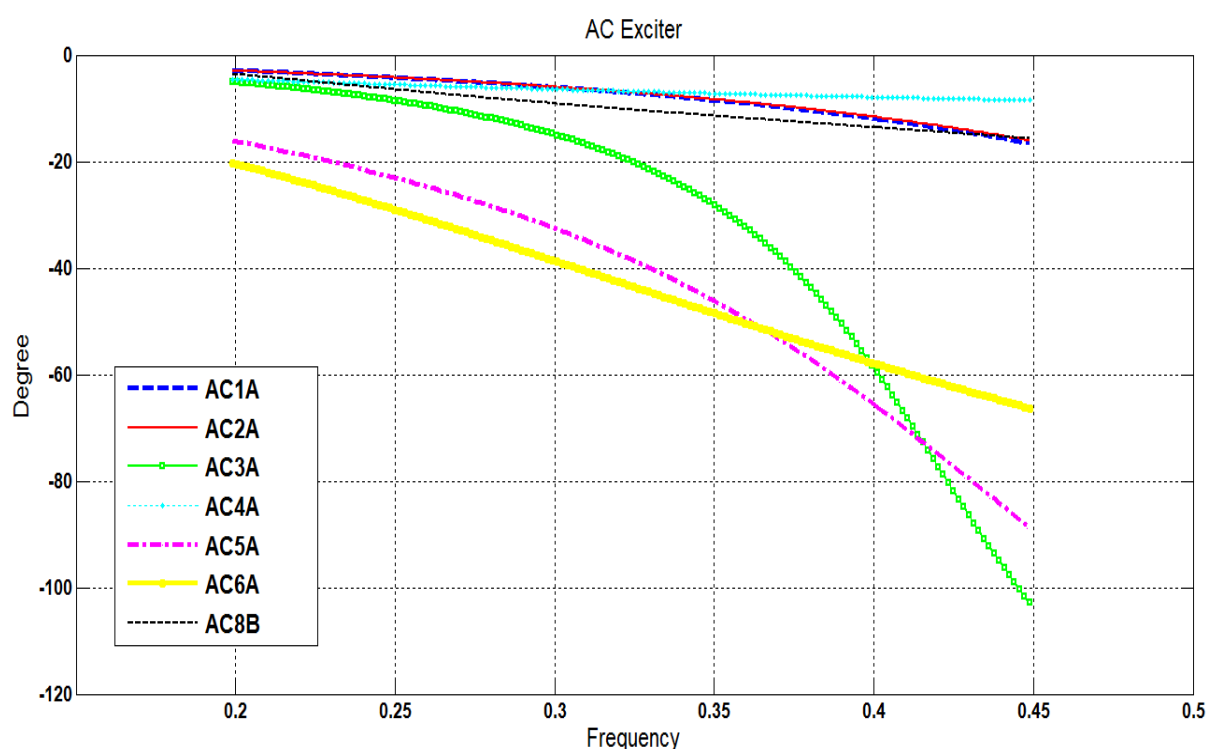
اینکه تنظیم پایدارساز بر مبنای زاویه‌ی جبران سازی انجام می‌شود، نیازمند دانستن این مقدار برای تمام

مدل‌های تحریک می‌باشیم. شکل ۵-۱ مکان هندسی شیفت فاز تمام مدل‌های تحریک را در یک منحنی به

نمایش در آورده است. به دلیل آنکه در این بخش نیازی به دقت در رنج تغییرات شیفت فاز هر مدل نیست و

می‌خواهیم تنها بازه‌ی تغییرات شیفت فاز تمام مدل‌ها در یک منحنی نمایش داده شود از شکل زیر استفاده

شده است. در بخش‌های بعدی برای تشخیص بازه‌ی تغییرات هر مدل از شکل‌های با وضوح بیشتر استفاده خواهیم کرد. با توجه به این شکل، اختلاف بسیار زیادی ما بین منحنی‌ها وجود دارد و به نظر می‌رسد با این شرایط دانستن مدل تحریک با اهمیت می‌باشد. در واقع بعد از تشخیص متناوب بودن سیستم تحریک باید نوع آن نیز تشخیص داده شود. این بدان معنی می‌باشد که عدم قطعیت در مدل سیستم تحریک متناوب از طریق تأثیر بر شیفت فاز به طور مستقیم بر روی تنظیم PSS تأثیر خواهد گذاشت.



شکل ۵-۱: منحنی مکان هندسی شیفت فاز سیستم‌های تحریک متناوب

مطلب دیگری که می‌توان از این شکل دریافت مربوط به تعداد مراحل جبران سازی می‌باشد. با توجه به اینکه بهتر است هر بلوک پیش فاز- پس فاز حداکثر ۶۰ درجه جبران سازی انجام دهد، بنابراین می‌توان گفت برای مدل‌های AC1A، AC2A، AC4A و AC8B جبران سازی تک مرحله‌ای کافی می‌باشد ولی برای سایر مدل‌ها در فرکانس‌های بالاتر از ۴ هرتز، نیازمند جبران سازی دو مرحله‌ای خواهیم بود.

۴-۲-۵ بررسی طراحی روباست PSS

در این بخش جامعیت طراحی صورت گرفته برای یک مدل مشخص را مورد بررسی قرار خواهیم داد. به این معنی که آیا این تنظیم در مدل‌های دیگر نیز پاسخگو خواهد بود یا خیر؟ ابتدا تشابه تنظیم‌ها را بررسی می‌کنیم تا بتوانیم بر پایه این تشابهات مدل‌های دارای تنظیم مشابه را گروه‌بندی کنیم. از آن جایی که تنظیم پایدارساز بر مبنای زاویه‌ی جبران سازی انجام خواهد شد، بنابراین از شیفت فازی مدل‌های تحریک به عنوان شاخصی برای سنجش تشابه مابین مدل‌ها استفاده خواهیم کرد. سپس برای تصدیق گروه‌بندی‌های ارائه، در شبکه‌ی تست ۴ ماشین به تنظیم PSS می‌پردازیم و اثر آن را بررسی می‌کنیم.

۱-۴-۲-۵ مقایسه تشابه طراحی PSS در مدل‌های تحریک متناوب

با داشتن تابع تبدیل‌های مدل‌های تحریک متناوب در فصل قبل، می‌توانیم برای نقاط کار متفاوت که به وجود آورنده‌ی مدهای نوسانی با فرکانس‌های مختلف است مقدار جبران سازی مورد نیاز را بدست آوریم و در مورد تشابهات این مدل‌ها اظهار نظر کنیم. در واقع می‌خواهیم به این سؤال پاسخ دهیم که اگر PSS را برای مدل تحریکی تنظیم کردیم، آیا همین پارامترهای تنظیمی می‌تواند برای مدل یا مدل‌های دیگر نیز پاسخگو باشد یا خیر؟

بنابراین بر پایه توضیحات بالا ابتدا میزان شیفت فازی را در ۴ مقدار فرکانسی برای تمام مدل‌های تحریک متناوب مقایسه می‌کنیم و سعی خواهیم کرد بر اساس نتایج بدست آمده از مقایسه، گروه‌بندی مناسبی برای مدل‌های تحریک ارائه کنیم. در واقع اگر فرض کنیم که از دید مطالعات ما دو مدل در یک گروه قرار گرفته‌اند به این معنی خواهد بود که تنظیم پایدارساز برای یکی از مدل‌ها در مدل دیگر نیز با تقریب خوبی پاسخگوست و نیازی به تنظیم مجدد نیست. یعنی ما به PSS روباستی دست یافته‌ایم که می‌تواند علاوه بر مدل خود برای مدل یا مدل‌های دیگر نیز پاسخگو باشد.

در جدول ۲۲-۵ مقادیر شیفت فاز تابع تبدیل GEP (معادله ۳-۵) در مدل‌های مختلف تحریک متناوب برای ۴ فرکانس متفاوت در بازه‌ی عملکردی مد بین ناحیه‌ای (۰/۲ هرتز تا ۰/۴۵ هرتز) آورده شده است.

جدول ۵-۲۲: شیف‌ت فازی مدل‌های مختلف تحریک متناوب در ۴ مقدار فرکانسی

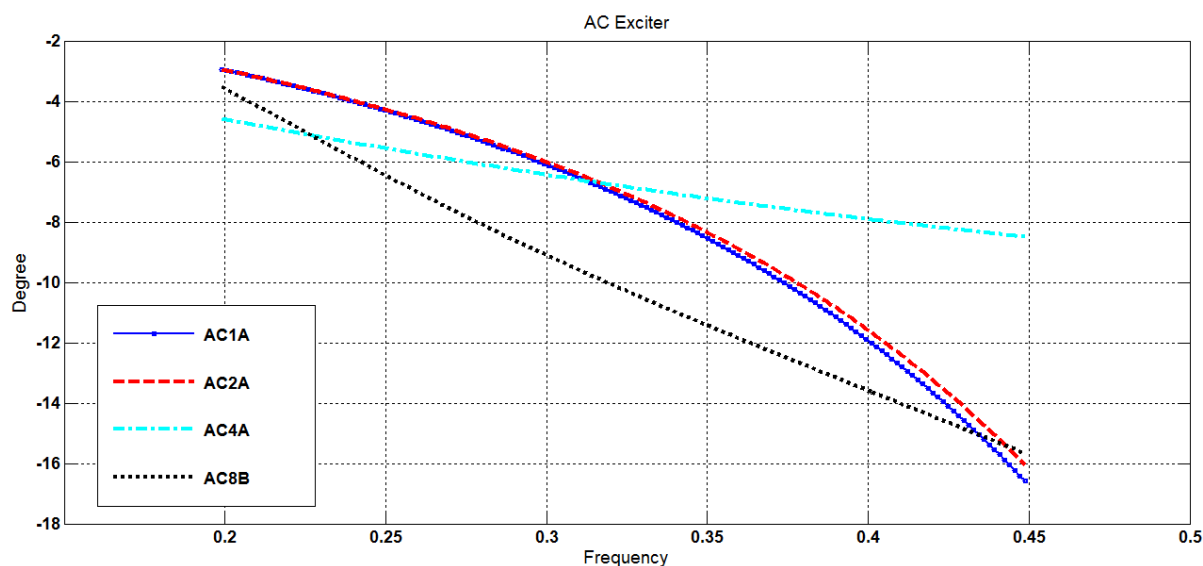
Frequency	0.22 hz	0.27 hz	0.35 hz	0.42 hz
AC1A	-3.4598	-4.9841	-8.5405	-13.6433
AC2A	-3.4452	-4.9246	-8.3433	-13.2259
AC3A	-6.2693	-10.7132	-28.171	-77.1646
AC4A	-4.9863	-5.9318	-7.218	-8.1576
AC5A	-18.6924	-26.5742	-46.1781	-74.851
AC6A	-23.7191	-32.9529	-48.5088	-61.4789
AC8B	-4.7284	-7.5908	-11.4217	-14.4306

با توجه به جدول بالا می‌بینیم که برای مدل‌های AC1A و AC2A مقدار زاویه‌ی جبران سازی در ۴ فرکانس انتخابی ما بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند و همچنین می‌توان گفت که مدل‌های AC4A و نیز AC8B مقدار شیف‌ت فاز نزدیکی به این دو مدل دارند.

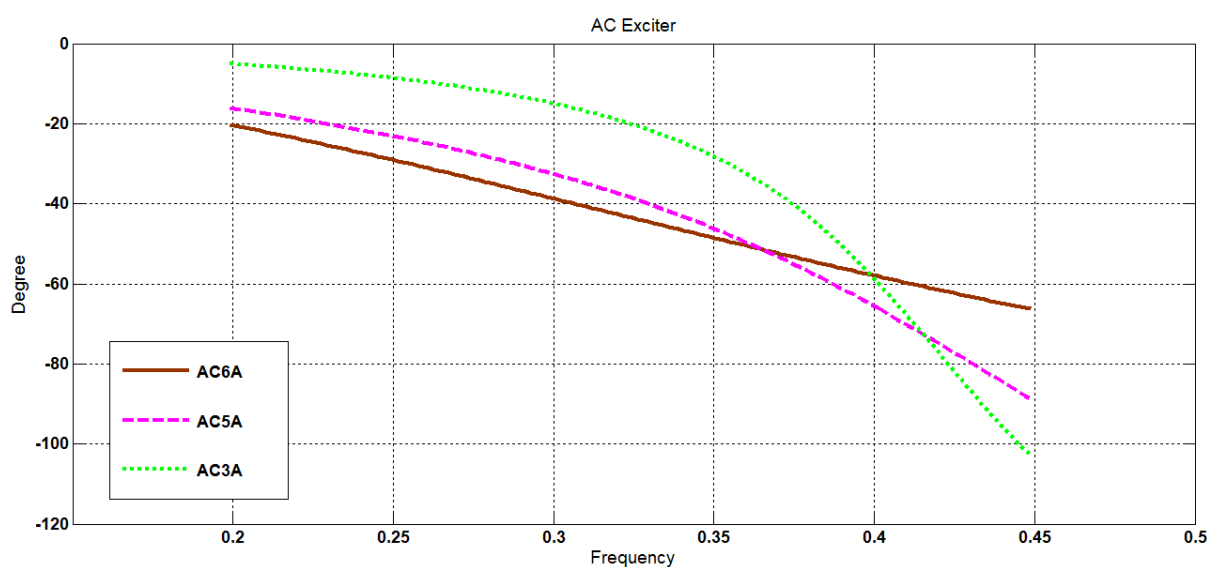
از طرف دیگر برای مدل‌های AC5A و AC6A در فرکانس‌های پایین‌تر مقدار شیف‌ت فازی نزدیکی را مشاهده می‌کنیم، در حالی است که در فرکانس بالاتر به عنوان نمونه ۰/۴۲ هرتز اختلاف فاز آن‌ها به ۱۳ درجه می‌رسد. بر اساس این نتایج نمی‌توان برای مدل AC3A اظهار نظر درستی داشت چرا که در فرکانس‌های پایین جبران سازی کمی دارد ولی برای فرکانس‌های بالاتر این مقدار به شدت افزایش می‌یابد.

بر طبق استدلال‌های بالا می‌توانیم بر اساس زاویه‌ی جبران سازی، مدل‌های AC1A، AC2A، AC4A و AC8B را در یک گروه و مدل‌های AC5A و AC6A را نیز در گروه دیگر قرار دهیم به نظر نمی‌رسد که بتوان برای مدل AC3A گروهی مشخص کرد و PSS اعمالی در این مدل تحریک باید به طور جدا تحلیل و تنظیم شود. شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳ تغییرات شیف‌ت فاز مدل‌های مختلف تحریک متناوب را نشان می‌دهد. می‌توان نتایج بدست آمده از جدول ۵-۲ را از این شکل‌ها نیز دریافت کرد. برای هر یک از مدل‌های بیان شده در بالا تنظیم PSS را بر پایه روابط موجود در فصل ۳ انجام خواهیم داد. بعد از انجام طراحی، با مقایسه‌ی اندازه‌ی تابع تبدیل پایدار ساز سیستم قدرت به نظر می‌رسد می‌توان برای گروه‌بندی بالا نظر

قاطع‌تری داد. تابع تبدیل پایدارساز باید بدون بهره‌ی آن در نظر گرفته شود، زیرا همان‌طور که پیش از این گفته شد بهره‌ی مناسب در شرایط کار بدست خواهد آمد.



شکل ۵-۲: منحنی مکان هندسی شیف‌ت فاز سیستم‌های تحریک AC1A, AC2A, AC4A, AC8B.



شکل ۵-۳: منحنی مکان هندسی شیف‌ت فاز سیستم‌های تحریک AC3A, AC5A, AC6A.

جدول ۵-۲۳ تغییرات اندازه‌ی تابع تبدیل PSS بدون در نظر گرفتن بهره‌ی آن را برای فرکانس‌های دلخواه ما نشان می‌دهد. بر پایه این اطلاعات باید گفت مدل‌های AC1A و AC2A به شدت مشابه یکدیگر می‌باشند و مدل‌های AC4A و AC8B نیز تقریباً اندازه‌های نزدیکی به این دو مدل دارند و می‌توان آن‌ها را

در یک گروه قرار داد. همچنین همانند قبل مدل های AC5A و AC6A در فرکانس های پایین نزدیکی خوبی نسبت به یکدیگر دارند و می توان گفت در این فرکانس ها تنظیم PSS مشابه ای خواهند داشت ولی در فرکانس های بالاتر همانند قبل که زاویه ی جبران سازی متفاوتی داشتند، این بار اندازه های متفاوتی خواهند داشت که می توان نتیجه گرفت برای شبکه ای با مد نوسانی دارای فرکانس های تقریباً کوچک تر از ۰/۴ هرتز تنظیم PSS این دو مدل تنظیم مشابهی خواهد داشت. به نظر می رسد همانند قبل مدل AC3A باید به طور جداگانه ای تحلیل شود.

جدول ۵-۲۳: نرخ تغییرات اندازه ی تابع پایدارساز در ۴ مقدار فرکانسی

Frequency	0.22 hz	0.27 hz	0.35 hz	0.42 hz
AC1A	1.062284847	1.09100513	1.16138792	1.27176093
AC2A	1.062013653	1.089867831	1.15735234	1.26227201
AC3A	1.115874318	1.206929027	1.66991952	8.8903835
AC4A	1.091046975	1.109283975	1.13463641	1.15356866
AC5A	1.394017915	1.618321538	2.48620723	7.52016501
AC6A	1.531633921	1.839971238	2.64008181	3.93451026
AC8B	1.086128409	1.142104956	1.22223362	1.28990363

بنابراین بر پایه بررسی های صورت گرفته می توان برای مدل های مختلف تحریک متناوب گروه بندی به صورت جدول ۵-۲۴ ارائه کرد.

جدول ۵-۲۴: گروه بندی مدل های تحریک متناوب از لحاظ تشابه در تنظیم

مدل های سیستم تحریک متناوب		
فرکانس پایین تر از ۰/۴ هرتز		فرکانس بالاتر از ۰/۴ هرتز
AC1A, AC2A, AC4A, AC8B		
AC5A	AC4A	AC5A, AC4A
AC3A		

برای بررسی نتایج و صحت گروه‌بندی انجام شده در این جدول، در این قسمت قصد داریم نتایج طراحی PSS را برای سیستم‌های تحریک متناوب در سیستم ۴ ماشین ارائه کنیم تا به صحت یا عدم صحت آن پی ببریم.

۲-۴-۲-۵ سیستم تحریک متناوب مدل AC1A

با اعمال مدل تحریک AC1A نتایج آنالیز مدال به صورت جدول ۵-۲۵ نشان داده شده است. نتایج تنها برای مد بین ناحیه‌ای سیستم که در مطالعه پایداری از اهمیت خاصی برخوردار است ارائه می‌شود.

جدول ۵-۲۵ : آنالیز مدال شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک AC1A

ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
-0.01786256	0.278247	1.748277	0.0312337	Mode 00034
-0.01786256	0.278247	-1.748277	0.0312337	Mode 00035

باید برای مد ناپایدار شبکه با فرکانس ۰/۲۷۸ هرتز تنظیم PSS را انجام دهیم. بر طبق نتایج فصل ۴ مبنی بر اینکه مدل‌های تحریک در فرکانس مد الکترومکانیکی تأثیر چندانی نخواهند گذاشت انتظار می‌رود برای سایر مدل‌ها نیز مدی با چنین فرکانسی را به عنوان مد بین ناحیه‌ای داشته باشیم. در نتیجه به طور قراردادی برای تمام مدل‌ها، تنظیم PSS را در فرکانس ۰/۲۷ هرتز انجام خواهیم داد.

حال با داشتن فرکانس، با استفاده از روابط فصل ۳، نتایج تنظیم پایدارساز برای تمام مدل‌های سیستم تحریک متناوب در جدول ۵-۲۶ آورده شده است. این جدول نیز می‌تواند گروه‌بندی که در بخش قبل به آن دست یافته‌ایم را تصدیق کند. توجه داشته باشید که بهره پایدارساز برای دستیابی به پایداری بهینه می‌بایست در شرایط کار تعیین شود و مقدار بدست آمده در جدول ۵-۲۶، یک مقدار اولیه می‌باشد.

بر اساس آنالیز مشارکت برای تمام مدل‌ها، مکان مناسب نصب پایدارساز ژنراتور شماره ۳ می‌باشد. این نکته نشان‌دهنده عدم تأثیرپذیری موقعیتیابی PSS از تغییر در مدل و یا پارامترهای سیستم تحریک می‌باشد. از قبل نیز انتظار چنین نتیجه‌ای را داشتیم چرا که موقعیتیابی بر مبنای آنالیز ضرایب مشارکت و تحت تأثیر

متغیرهای مکانیکی سیستم بدست خواهد آمد. حال آنکه تغییر متغیرهای الکتریکی سیستم تحریک تأثیری بر روی نتایج موقعیتیابی پایدارساز نخواهد گذاشت.

جدول ۵-۲۶: مقادیر تنظیمی پارامترهای پایدارساز برای تمام مدل‌های سیستم تحریک متناوب

بهره پایدارساز	ثابت زمانی پس فاز	ثابت زمانی پیش فاز	فرکانس: ۰/۲۷ هرتز
9.371542668	0.540490369	0.64287239	AC1A
9.372802508	0.541047763	0.6422101	AC2A
6.144532625	0.489007639	0.710554	AC3A
11.2659664	0.531489544	0.6537595	AC4A
5.159263915	0.36501976	0.95191103	AC5A
5.42484975	0.321130942	1.08200827	AC6A
9.251461645	0.516411899	0.67284727	AC8B

جدول ۵-۲۷ نتایج آنالیز مدال شبکه ۴ ماشین با سیستم تحریک AC1A بعد از اعمال PSS1A را نشان می‌دهد. تنظیم پایدارساز بر مبنای اطلاعات سیستم تحریک AC2A انجام شده است. همان‌طور که می‌بینیم مد مزدوج بین ناحیه‌ای با این تنظیم پایدار شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید تنظیم انجام شده به خوبی پاسخ داده است و هم گروهی این دو مدل تحریک را تصدیق کرده است.

جدول ۵-۲۷: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک AC1A با PSS

ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
0.09854984	0.2251169	1.414451	-0.1400758	Mode 00035
0.09854984	0.2251169	-1.414451	-0.1400758	Mode 00036

۵-۲-۳ سیستم تحریک متناوب مدل AC2A

نتایج آنالیز مدال برای سیستم تحریک AC2A قبل و بعد از اعمال پایدارساز سیستم قدرت در جدول ۵-۲۸ آورده شده است. با توجه به مطالب بیان شده درباره‌ی گروه‌بندی‌ها، از PSS تنظیم شده برای مدل AC1A در این حالت استفاده خواهیم کرد.

جدول ۵-۲۸: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینه برای سیستم تحریک AC2A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
بدون PSS	-0.01836877	0.2781346	1.747571	0.03210615	Mode 00034
	-0.01836877	0.2781346	-1.747571	0.03210615	Mode 00035
با تنظیمی PSS	0.09992676	0.224581	1.411084	-0.1417144	Mode 00035
AC1A	0.09992676	0.224581	-1.411084	-0.1417144	Mode 00036

نتایج جدول ۵-۲۸ میرایی خوب مد بین ناحیه‌ای را به همراه نشان می‌دهد که نشان دهنده عملکرد خوب پایدارساز تنظیمی در مدل AC1A برای شبکه‌ی با مدل AC2A می‌باشد.

۵-۴-۴ سیستم تحریک متناوب مدل AC4A

از آنجا که این مدل نیز با مدل‌های قبلی هم گروه می‌باشد، انتظار داریم برای تصدیق گروه پایداری از تنظیمی مدل AC1A بتواند میرایی مد بین ناحیه‌ای شبکه را افزایش دهد. جدول زیر تغییرات مد بین ناحیه‌ای شبکه قبل و بعد از اعمال PSS را نمایش می‌دهد.

جدول ۵-۲۹: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینه برای سیستم تحریک AC4A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
بدون PSS	0.00876217	0.2910961	1.829011	-0.01602671	Mode 00026
	0.00876217	0.2910961	-1.829011	-0.01602671	Mode 00027
با تنظیمی PSS	0.06619443	0.2792136	1.754351	-0.1163835	Mode 00027
AC1A	0.06619443	0.2792136	-1.754351	-0.1163835	Mode 00028

بر طبق جدول ۵-۲۹ مشاهده می‌کنیم که مد بین ناحیه‌ای به خوبی افزایش میرایی پیدا کرده است. بنابراین وابستگی تنظیم PSS مدل AC4A به مدل‌های AC2A و AC1A تایید شد.

۵-۴-۲-۵ سیستم تحریک متناوب مدل AC8B

بر طبق جدول ۲۴-۵ این مدل تحریک نیز همانند مدل AC4A هم گروه با مدل AC1A می باشد، بنابراین باید PSS تنظیمی آن برای این مدل تحریک نیز پاسخگو باشد. نتایج آنالیز مقادیر ویژه نشان از پایدار شدن مد ناپایدار شبکه با اعمال PSS تنظیمی AC1A دارد. بنابراین باید گفت گروه بندی ارائه شده در مورد مدل های تحریک AC1A، AC2A، AC4A و AC8A درست می باشد.

جدول ۳۰-۵: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه ی ۴ ماشینه برای سیستم تحریک AC8A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
بدون PSS	-0.01242727	0.2883524	1.811771	0.02251711	Mode 00034
	-0.01242727	0.2883524	-1.811771	0.02251711	Mode 00035
با PSS تنظیمی AC1A	0.00651742	0.268637	1.687896	-0.01100096	Mode 00035
	0.00651742	0.268637	-1.687896	-0.01100096	Mode 00036

توجه داشته باشید که نتیجه حاصله با تغییر بهره پایدارساز از ۹/۳۸ ابتدایی به ۴ بدست آمده است. که با توجه به نکات بیان شده در مورد تنظیم بهره در شرایط کار این تغییر قابل قبول می باشد.

۵-۴-۲-۶ سیستم تحریک متناوب مدل AC5A

بر طبق جدول ۲۴-۵ برای فرکانس های کمتر از ۰/۴ هرتز، دو مدل AC5A و AC6A در یک گروه قرار دارند و دارای تنظیم PSS تقریباً مشابهی خواهند بود. بنابراین قصد داریم در این حالت از پایدارساز تنظیم شده در مدل AC6A برای افزایش میرایی مد بین ناحیه ای استفاده کنیم. نتایج آنالیز مقادیر ویژه شبکه ۴ ماشینه متصل به سیستم تحریک AC5A قبل و بعد از اعمال PSS در جدول ۳۱-۵ آورده شده است.

جدول ۳۱-۵: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه ی ۴ ماشینه برای سیستم تحریک AC5A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
بدون PSS	0.0191396	0.2398033	1.506729	-0.02884347	Mode 00032
	0.0191396	0.2398033	-1.506729	-0.02884347	Mode 00033
با PSS تنظیمی AC6A	0.1111906	0.1678377	1.054555	-0.1179883	Mode 00033
	0.1111906	0.1678377	-1.054555	-0.1179883	Mode 00034

نتایج جدول ۵-۳۱ نشان می‌دهد میرایی مد بین ناحیه‌ای شبکه خیلی خوب افزایش یافته است. بنابراین تنظیم PSS در مدل AC6A به طور مناسبی در مدل تحریک AC5A پاسخ داده است. حال همین بررسی را برای مدل AC6A انجام می‌دهیم.

۵-۲-۴-۷ سیستم تحریک متناوب مدل AC6A

نتایج آنالیز مقادیر ویژه شبکه‌ی ۴ ماشین با سیستم تحریک AC6A قبل و بعد از اعمال PSS تنظیم شده در مدل AC5A در جدول ۵-۳۲ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش میرایی مد بین ناحیه‌ای شبکه می‌باشد. این بدان معنی است که تنظیم انجام شده برای PSS خیلی خوب پایداری شبکه را افزایش داده است.

جدول ۵-۳۲: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک AC6A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
Mode 00030	0.01983947	0.2715473	1.706182	-0.03385641	بدون PSS
Mode 00031	0.01983947	0.2715473	-1.706182	-0.03385641	
Mode 00032	0.09354693	0.2162911	1.358997	-0.1276899	با تنظیمی AC5A
Mode 00033	0.09354693	0.2162911	-1.358997	-0.1276899	

بنابراین این دو مدل نیز وابستگی خوبی در تنظیم PSS نسبت به یکدیگر داشته‌اند و می‌توان گروه‌بندی ارائه شده برای آن‌ها را نیز تایید شده در نظر گرفت.

۵-۲-۴-۸ سیستم تحریک متناوب مدل AC3A

همان‌طور که گفته‌ایم سیستم تحریک AC3A دارای تنظیمات متفاوتی نسبت به سایر مدل‌های تحریک می‌باشد و می‌بایست بر مبنای اطلاعات خود مدل به تنظیم پایدارساز پرداخت. همانند حالت‌های قبل نتایج آنالیز مقادیر ویژه قبل و بعد از نصب PSS در جدول زیر آورده شده است. بر طبق آن شبکه دارای مد ناپایداری بوده است که با اعمال PSS تنظیمی به خوبی میرا شده است.

جدول ۵-۳۳: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینه برای سیستم تحریک AC3A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
بدون PSS	-0.07083007	0.2733953	1.717793	0.1219778	Mode 00034
	-0.07083007	0.2733953	-1.717793	0.1219778	Mode 00035
با تنظیمی AC3A	0.03678983	0.3131151	1.96736	-0.07242789	Mode 00035
	0.03678983	0.3131151	-1.96736	-0.07242789	Mode 00036

۵-۲-۵ نتایج بررسی تأثیر عدم قطعیت در مدل‌های تحریک متناوب بر روی شیف

فازی

- زاویه‌ی جبران سازی وابسته به نوع مدل تحریک متناوب است و نمی‌توان آن را مستقل از عدم قطعیت در مدل تحریک دانست.
- از بند بالایی نتیجه می‌شود عدم قطعیت در مدل تحریک متناوب به طور مستقیم بر روی تنظیم پایدار ساز سیستم قدرت تأثیر می‌گذارد.
- نتایج حاصله از مطالعات تنظیم PSS، تصدیق کننده گروه‌بندی ارائه شده در جدول ۵-۲۴ می‌باشد. بنابراین می‌توان طراحی روبااست را بدین ترتیب تعریف کرد که:
 ۱. پایدار ساز طراحی شده برای هر یک از مدل‌های AC1A، AC2A، AC4A و AC8B می‌تواند بر روی سایر مدل‌های این گروه نیز اثر مطلوبی داشته باشد.
 ۲. پایدار سازهای طراحی شده برای مدل‌های AC5A و AC6A در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۴/۰ هرتز) نیز همین تأثیر را بر روی یکدیگر خواهند داشت.
 ۳. طراحی برای پایدار ساز AC3A مستقل از سایر مدل‌ها می‌باشد.
- در تنظیم بهینه پایدار ساز پس از طراحی می‌توان مجدداً بهره آن را تغییر داد تا شرایط بهتری بدست آید.
- موقعیت‌یابی پایدار ساز سیستم قدرت مستقل از مدل سیستم تحریک متناوب است و با تغییر مدل تحریک نتایج آن تغییر نخواهد کرد.

۳-۵ سیستم‌های تحریک استاتیک

۳-۵-۱ بررسی تأثیر پارامترها بر روی شیف‌ت فاز مدل‌های سیستم تحریک استاتیک

در این بخش تحلیل‌های استفاده شده در بخش قبل را بروی سیستم‌های تحریک استاتیک مورد بررسی قرار خواهیم داد. از مدل‌های استاندارد استاتیک ST1A، ST2A، ST3A و ST4B برای انجام مطالعات این قسمت بهره برده‌ایم.

۳-۵-۱-۱ سیستم تحریک مدل ST1A

دیگرام تک خطی مدل ST1A در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است. همانند استدلال‌های بکار گرفته شده در مورد سیستم‌های تحریک متناوب، با حذف بلوک‌های مزایده‌ای و حدود و صفر قرار دادن ورودی‌های غیر از پایدارساز به مدل ساده شده سیستم تحریک برای محاسبه‌ی تابع تبدیل آن دست می‌یابیم. پارامترهای موثر در شیف‌ت فاز به همراه مقادیر تغییر یافته آن‌ها در جدول ۵-۳۴ آورده شده‌اند.

همانند قبل برای مقادیر نوعی پارامترها و تغییر یافته آن‌ها مقدار شیف‌ت فاز و حساسیت آن به تغییر پارامترها را محاسبه خواهیم کرد. این نتایج برای فرکانس ۰/۲۷ هرتز در جدول‌های ۵-۳۵ و ۵-۳۶ آورده شده است.

جدول ۵-۳۴: مقادیر پارامترهای موثر در مدل ST1A و تغییرات اعمال شده

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر ۱۰٪+	تغییر ۱۰٪-
بهره تنظیم‌کننده ولتاژ	Ka	145	159.5	130.5
ثابت زمانی تنظیم‌کننده ولتاژ	Ta	0.05	0.055	0.045
ثابت زمانی فیلتر مشتق اول	Tc	0.1	0.11	0.09
ثابت زمانی فیلتر تأخیر اول	Tb	1	1.1	0.9
ثابت زمانی فیلتر مشتق دوم	Tc1	1	1.1	1.1
ثابت زمانی فیلتر تأخیر دوم	Tb1	1	1.1	0.9
ثابت زمانی مسیر پایدارساز	Tf	1.2	1.32	1.08

بیشترین حساسیت شیف‌ت فاز به سبب تغییر در پارامتر بهره تنظیم‌کننده ولتاژ به وجود می‌آید. ولی بر طبق جدول ۳۵-۵ این حساسیت تغییری کمتر از ۱ درجه را در شیف‌ت فاز به وجود می‌آورد. این مقدار بسیار کوچک است و قابل نظر نمی‌باشد.

جدول ۳۵-۵: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل ST1A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 Hz	10%	-10%
Ka	-11.3181278	-10.6362833	-12.1727556
Ta	-11.3181278	-11.2632182	-11.3729051
Tc	-11.3181278	-11.4119251	-11.2184935
Tb	-11.3181278	-11.5733422	-11.0704807
Tc1	-11.3181278	-11.0555578	-11.5489949
Tb1	-11.3181278	-11.5733422	-11.0704807
Tf	-11.3181278	-10.9444918	-11.7328376

جدول ۳۶-۵: مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل ST1A

	F=0.27 Hz	10%	-10%
Ka	6.024357939	-7.55096481	
Ta	0.485147508	-0.48397805	
Tc	-0.82873532	0.880307458	
Tb	-2.25491724	2.188057353	
Tc1	2.319906441	2.319906441	
Tb1	-2.25491724	2.188057353	
Tf	3.301217504	-3.66411988	

۲-۱-۳-۵ سیستم تحریک مدل ST2A

دیآگرام تک خطی سیستم تحریک مدل ST2A در شکل ۱۸ فصل ۲ نمایش داده شده است. این سیستم تحریک دارای منبع تغذیه کمپوند می‌باشد و از جریان و ولتاژ ترمینال ژنراتور برای تغذیه تحریک استفاده می‌کند. قسمتی که به صورت ضرب کننده در مدل آورده شده است بیان کننده این منبع کمپوند است. برای تشکیل تابع تبدیل بین ورودی پایدارساز و خروجی تحریک از بلوک‌های مزایده‌ای و حدود قرار گرفته

روی بلوک‌ها صرف نظر می‌کنیم. با توجه به روابط بیان شده در دیاگرام ۲-۱۸، ضرب کننده عددی صحیح را در مدل ضرب می‌کند و هیچ تغییر فازی ایجاد نخواهد کرد. از آنجایی که هدف بدست آوردن شیف‌ت فاز بین ورودی و خروجی می‌باشد می‌توان ضرب کننده را نیز حذف نمود. بنابراین برای بدست آوردن تابع تبدیل مدل ابهامی نخواهیم داشت و می‌توان به راحتی مقادیر شیف‌ت فاز را محاسبه کرد. همچنین برای اطمینان بیشتر، مدل را شبیه سازی کرده و شیف‌ت فاز آن را محاسبه کرده‌ایم. این مقدار با نتایج بدست آمده بعد از حذف ضرب کننده یکسان بوده است.

جدول ۵-۳۷ مقادیر نوعی و تغییرات ۱۰ درصدی پارامترهای سیستم تحریک ST2A را نمایش می‌دهد.

جدول ۵-۳۷: مقادیر پارامترهای موثر در مدل ST2A و تغییرات اعمال شده

تغییر ۱۰٪ -	تغییر ۱۰٪ +	مقادیر نوعی	پارامترها
135	165	150	Ka بهره کنترلر
0.018	0.022	0.02	Ta ثابت زمانی کنترلر
0.99	1.01	1	Te ثابت زمانی تحریک
0.81	0.99	0.9	Ke بهره تحریک
0.27	0.33	0.3	Tf ثابت زمانی پایدارساز

مقادیر شیف‌ت فاز و حساسیت آن به تغییر پارامترها در فرکانس ۰/۲۷ هرتز محاسبه شده است و به ترتیب در جدول‌های ۵-۳۸ و ۵-۳۹ آورده شده است. در این حالت نیز حداکثر تغییر شیف‌ت فاز در اثر تغییر بهره تنظیم کننده ولتاژ پدید آمده است و مقدار آن کمتر از ۱ درجه است. این مقدار بسیار کوچک است و صرف نظر کردن از آن خللی در مطالعات پدید نمی‌آورد.

جدول ۵-۳۸: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل ST2A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	-11.48465695	-10.84781555	-12.28881081
Ta	-11.48465695	-11.45409584	-11.51519118
Te	-11.48465695	-11.66104248	-11.31441431
Ke	-11.48465695	-12.02134322	-10.94624965
Tf	-11.48465695	-11.71216183	-11.19536272

جدول ۳۹-۵ : مقدار حساسیت شیفیت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل ST2A

F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	5.545149529	-7.001984179
Ta	0.266103809	-0.265869774
Te	-1.535836291	1.482348477
Ke	-4.673071781	4.688057324
Tf	-1.980946215	2.518962758

۳-۱-۳-۵ سیستم تحریک مدل ST3A

شکل ۱۹-۲ نشان‌دهنده مدل تحریک ST3A می‌باشد. این مدل نیز همانند ST2A دارای منبع توان کمپوند می‌باشد که اثر آن به صورت ضرب کننده در مدل ظاهر شده است. همانند قبل می‌توان با حذف این ضرب کنند و بکار گیری استدلال‌های بخش‌های قبلی به مدل ساده شده و تابع تبدیل آن دست یافت. جدول ۴۰-۵ پارامترهای تأثیر گذار در تابع تبدیل مدل به همراه تغییرات آن‌ها را نمایش می‌دهد.

جدول ۴۰-۵ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل ST3A و تغییرات اعمال شده

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر +۱۰٪	تغییر -۱۰٪
بهره کنترلر	Ka	200	220	180
ثابت زمانی کنترلر	Ta	0.05	0.055	0.045
ثابت زمانی پس فاز	Tc	3	3.3	2.7
ثابت زمانی پیش فاز	Tb	10	11	9
بهره فیدبک	Kg	1	1.1	0.9
بهره مسیر پیش خور	Km	1	1.1	0.9
ثابت زمانی پیش خور	Tm	0.01	0.011	0.009

جدول‌های ۴۱-۵ و ۴۲-۵ مقادیر شیفیت فاز و حساسیت را برای مقادیر نوعی و تغییرات پارامترها نمایش می‌دهند. همانند مدل‌های قبلی بهره تنظیم‌کننده ولتاژ بیشترین اثر را بر روی شیفیت فاز داشته است. حداکثر تغییر شیفیت فاز در حدود ۲ درجه بوده است که در مقایسه با مقدار مبنا (۲۱/۹۷ درجه) مقدار

کوچکی است و می‌توان انتظار داشت صرف نظر از این مقدار کوچک تأثیری بر نتایج تنظیم PSS نداشته باشد. بنابراین می‌توان گفت شیف‌ت فاز مستقل از تغییر پارامترهای سیستم تحریک ST3A است.

جدول ۵-۴۱: مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل ST3A در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	-21.97018234	-19.98556675	-24.36601607
Ta	-21.97018234	-22.01507717	-21.92556997
Tc	-21.97018234	-20.00420135	-24.35827471
Tb	-21.97018234	-24.14563328	-19.77819264
Kg	-21.97018234	-23.05105736	-20.88241783
Km	-21.97018234	-20.97904099	-23.1745531
Tm	-21.97018234	-21.97327844	-21.96708823

جدول ۵-۴۲: مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل ST3A

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ka	9.033223116	-10.90493329	
Ta	-0.20434438	0.203058701	
Tc	8.948405453	-10.86969754	
Tb	-9.901833791	9.977112004	
Kg	-4.91973622	4.951094588	
Km	4.51130232	-5.481842334	
Tm	-0.014092275	0.014083209	

۴-۱-۳-۵ سیستم تحریک مدل ST4B

دیگرام تک خطی سیستم تحریک مدل ST4B در شکل ۲-۲۰ آورده شده است. با حذف بلوک‌های مزایده‌ای، حدود روی بلوک و ضرب کننده مربوط به اثر منبع توان کمپوند می‌توان پارامترهای موثر در تابع تبدیل مدل را به صورت زیر نشان داد. تغییرات $\pm 10\%$ درصدی آن‌ها نیز در کنار مقادیر نوعی در جدول ۵-۴۳ آورده شده است.

جدول ۴۳-۵ : مقادیر پارامترهای موثر در مدل ST4B و تغییرات اعمال شده

پارامترها		مقادیر نوعی	تغییر ۱۰٪+	تغییر ۱۰٪-
ثابت زمانی کنترلر	Ta	0.05	0.055	0.045
بهره تناسبی PI	Kpr	10	11	9
ثابت زمانی PI	Kir	1	1.1	0.9
بهره فیدبک	Kg	0.1	0.11	0.09
بهره مسیر پیش خور	Kpm	1	1.1	0.9
ثابت زمانی پیش خور	Kim	1	1.1	0.9

مقادیر شیف‌ت فاز و حساسیت فاز در فرکانس ۰/۲۷ هرتز مربوط به پارامترهای جدول ۴۳-۵ به ترتیب در جدول‌های ۴۴-۵ و ۴۵-۵ آورده شده است. نتایج جدول ۴۵-۵ نشان می‌دهد که بهره تناسبی بلوک PI بیشترین حساسیت را در شیف‌ت فاز برای فرکانس ۰/۲۷ هرتز به وجود آورده است. این حداکثر حساسیت تغییر ۶ درجه‌ای را ایجاد می‌کند که در مقایسه با مقدار شیف‌ت فاز در مقدار نوعی پارامترها (۶۷ درجه) مقدار کوچکی است و به نظر می‌رسد حذف آن تاثیر چشم‌گیری بر تنظیم PSS نخواهد گذاشت.

جدول ۴۴-۵ : مقدار تغییر فاز به سبب تغییر پارامترهای مدل ST4B در فرکانس ۰/۲۷ هرتز

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ta	-67.81192537	-68.1480242	-67.48094468
Kpr	-67.81192537	-62.39436187	-73.7724642
Kir	-67.81192537	-67.99623563	-67.62572746
Kg	-67.81192537	-68.15424366	-67.46245148
Kpm	-67.81192537	-63.07443691	-73.31920435
Kim	-67.81192537	-67.6166569	-67.74214545

جدول ۴۵-۵ : مقدار حساسیت شیف‌ت فاز نسبت به تغییر پارامترهای مدل ST4B

	F=0.27 hz	10%	-10%
Ta	-0.495633814	0.488086255	
Kpr	7.989101431	-8.789809164	
Kir	-0.271796233	0.274579878	
Kg	-0.504805452	0.515357571	
Kpm	6.986217292	-8.121401881	
Kim	0.287955932	0.102902136	

۵-۳-۲ نتایج بررسی تأثیر عدم قطعیت در پارامترهای تحریک استاتیک بر روی

شیفت فاز

این بخش نیز نتایجی مشابه بخش ۵-۲-۲ دارد و می‌توان آن‌ها را به صورت زیر بیان کرد:

۱. بهره تنظیم‌کننده ولتاژ و ثابت زمانی‌های فیلتر مشتق که در مسیر پیش‌خور سیگنال ورودی قرار دارند دارای بیشترین تأثیرگذاری و ثابت زمانی‌های تأخیر پس‌فاز دارای کمترین اثرگذاری بر روی شیفت فاز می‌باشند.

۲. در مقایسه با سیستم تحریک متناوب حساسیت شیفت فاز به تغییر پارامترها کاهش یافته است که می‌تواند مزیت خوبی به حساب آید.

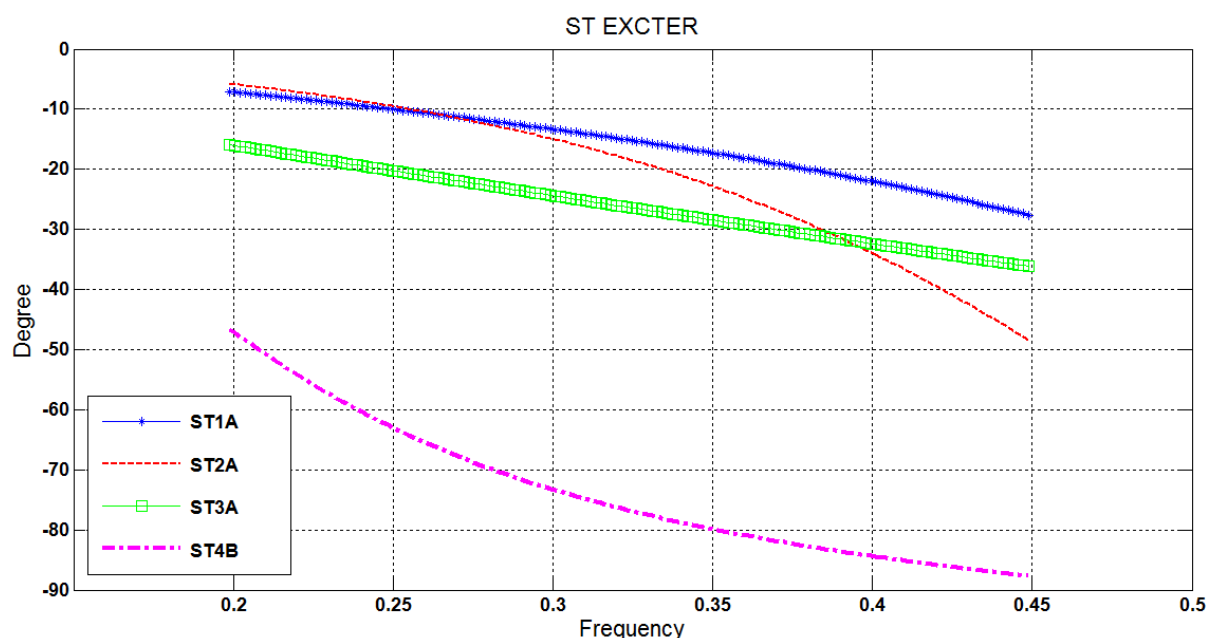
۳. بطور کلی با توجه جدول‌ها و مطالب بیان شده در بالا می‌توان گفت تغییر در پارامترها یا همان عدم قطعیت در آن اثر کوچک و قابل صرف‌نظری بر روی شیفت فاز داشته است و انتظار می‌رود در نظر نگرفتن حساسیت آن‌ها، تأثیر نامطلوبی بر روی نتایج تنظیم PSS نگذارد.

۵-۳-۳ امکان‌سنجی تنظیم PSS در شرایط عدم قطعیت در مدل تحریک استاتیک

در این بخش می‌خواهیم تأثیر عدم قطعیت در مدل سیستم تحریک استاتیک را بر روی شیفت فاز جبران‌سازی مورد بررسی قرار دهیم. اگر تغییر مدل‌های مختلف تحریک همانند تغییر پارامترهای آن تأثیر زیادی بر روی شیفت فاز نداشته باشد می‌توانیم بگوییم شیفت فاز جبران‌سازی مستقل از عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک است.

شکل ۵-۴ منحنی‌های مکان هندسی شیفت فاز را برای سیستم‌های تحریک استاتیک در بازه‌ی فرکانسی ۰/۴۵ تا ۰/۲ هرتز نشان می‌دهد. با توجه به شکل بطور کلی می‌توان گفت به دلیل فاصله‌ی نسبتاً زیاد مابین منحنی‌ها، تغییر مدل تحریک استاتیک سبب تغییر نسبتاً زیادی در مقدار زاویه‌ی جبران‌سازی می‌شود. این اختلاف زاویه برای مدل ST4B نسبت به سایر مدل‌ها بسیار بیشتر است. بنابراین برای طراحی PSSها

نیازمند دانستن نوع مدل تحریک استاتیک می‌باشیم و در این باره باید اطلاعات دقیق‌تری نسبت به پارامتر داشته باشیم. بنابراین می‌توان نتیجه گفت که تنظیم PSS وابسته به مدل تحریک و نوع آن است و عدم قطعیت در این حوزه تنظیم PSS را تحت تأثیر قرار خواهد داد.



شکل ۴-۵: منحنی مکان هندسی شیفت فاز سیستم‌های تحریک استاتیک

۴-۳-۵ بررسی طراحی روبااست PSS برای سیستم تحریک استاتیک

همانند بخش ۳-۲-۵ قصد داریم با مقایسه زاویه‌ی جبران سازی در مدل‌های مختلف تحریک استاتیک ارتباطی میان آن‌ها بدست آوریم و با توجه به آن تنظیم مقاومتی برای PSS های نصب شده در این مدل‌ها ارائه کنیم.

۱-۴-۳-۵ مقایسه تشابه طراحی PSS در مدل‌های تحریک استاتیک

همانند بررسی‌های انجام شده بر روی مدل‌های متناوب، در ۴ نقطه‌ی فرکانسی مقادیر جبران سازی فاز مدل‌های مختلف تحریک استاتیک بررسی می‌شود و بر مبنای اطلاعات بدست آمده از آن در مورد تشابه تنظیم اظهار نظر خواهد شد. جدول ۴-۵ مقادیر شیفت فاز در ۴ فرکانس انتخابی در بازه‌ی ۰/۲ هرتز تا ۰/۴۵ هرتز را برای ۴ مدل تحریک استاتیک نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۴-۵ و جدول ۴-۵ به نظر

می‌رسد گروه‌بندی مدل‌ها بر پایه رنج فرکانسی مد باید انجام بگیرد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید برای فرکانس‌های تقریباً کمتر از ۰/۳۵ هرتز مدل‌های ST1A و ST2A دارای شیفت فازی نزدیکی در تابع تبدیل‌های خود می‌باشند. ولی در فرکانس‌های بالاتر اختلاف زاویه‌ی جبران سازی این دو مدل افزایش می‌یابد و به نظر نمی‌رسد بتوان در این فرکانس‌ها آن‌ها را دارای تنظیم مشابهی دانست. از طرف دیگر در این فرکانس‌ها زاویه‌ی جبران سازی مدل ST3A در حال نزدیک شدن به شیفت فازی مدل ST2A می‌باشد. این نزدیکی پس از چند هرتز تغییر در فرکانس مد از بین می‌رود. در تمام این شرایط فرکانسی مدل ST4B دارای مقادیر شیفت فاز متفاوتی از سایر مدل‌ها می‌باشد.

جدول ۵-۴۶: شیفت فازی مدل‌های تحریک استاتیک در ۴ مقدار فرکانسی

Frequency	0.22 hz	0.27 hz	0.35 hz	0.42 hz
ST1A	-8.23803	-11.2812	-17.2862	-24.1836
ST2A	-7.12524	-11.426	-22.8208	-39.473
ST3A	-17.7136	-21.9234	-28.4442	-33.9392
ST4B	-54.1929	-67.6924	-79.8643	-85.8498

بر طبق استدلال‌های بالا می‌توان گفت تنظیم PSS در فرکانس‌های پایین برای مدل‌های ST1A و ST2A مشابه خواهد بود. ولی برای فرکانس‌های بالاتر از ۰/۳۵ هرتز می‌بایست PSS اعمالی در تمامی مدل‌ها به طور جداگانه تحلیل و تنظیم شود.

بنابراین بر پایه بررسی‌های صورت گرفته می‌توان گروه‌بندی مدل‌های تحریک استاتیک را بر مبنای تشابه طراحی PSS و فرکانس مد به صورت جدول ۵-۴۷ ارائه کرد.

جدول ۵-۴۷: گروه‌بندی مدل‌های تحریک استاتیک از لحاظ تشابه در تنظیم

مدل‌های سیستم تحریک استاتیک		
فرکانس‌های پایین (کمتر از ۰/۳۵ هرتز)		فرکانس‌های بالا (بیش‌تر از ۰/۳۵ هرتز)
ST1A	ST2A	ST1A, ST2A
ST3A		ST3A
ST4B		

جدول ۵-۴۸ تغییرات اندازه‌ی تابع تبدیل PSS بدون در نظر گرفتن آن را برای فرکانس‌های انتخابی ما نشان می‌دهد. در فرکانس‌های پایین همانند قبل مدل‌های ST1A و ST2A شباهت خوبی به یکدیگر دارند و به نظر می‌رسد طراحی PSS مشابهی خواهند داشت. در این فرکانس‌ها تغییرات اندازه تابع تبدیل مدل‌های استاتیک ST3A و ST4B نسبت به بقیه متفاوت است و با توجه به جدول ۵-۴۶، طراحی PSS در این مدل‌ها باید جداگانه تحلیل و انجام شود. در فرکانس‌های بالاتر (بزرگ‌تر از ۳۵/۰ هرتز) جدول ۵-۴۶ همگرایی بین مدل‌ها مشاهده نمی‌شود و به نظر می‌رسد تمامی مدل‌ها در گروه‌های جداگانه‌ای قرار خواهند گرفت. بر پایه بررسی‌های تئوری، می‌توان گفت گروه‌بندی جدول ۵-۴۷ صحیح است. حال باید نتایج حاصله از تنظیم PSS در مدل‌های مختلف تحریک استاتیک را بر روی شبکه‌ی نمونه ۴ ماشین، مورد بررسی قرار داد.

جدول ۵-۴۸: نرخ تغییرات اندازه‌ی تابع تبدیل پایدارساز در ۴ مقدار فرکانسی

Frequency	0.22 hz	0.27 hz	0.35 hz	0.42 hz
ST1A	1.1552	1.2192	1.3585	1.5453
ST2A	1.1328	1.2223	1.5057	2.119
ST3A	1.3692	1.4804	1.679	1.9783
ST4B	2.673	3.5143	4.5847	5.2704

۵-۳-۴-۲ سیستم تحریک استاتیک مدل ST1A

همان‌طور که قبلاً نیز گفته‌ایم به دلیل عدم تأثیر مدل‌های تحریک بر روی فرکانس مد مکانیکی، تنظیم PSS در فرکانس ۲۷/۰ هرتز برای مدل‌های تحریک استاتیک انجام شد و مقادیر پارامترهای آن در جدول ۵-۴۹ آورده شده است.

جدول ۵-۴۹: مقادیر تنظیم پایدارساز برای تمام مدل‌های سیستم تحریک استاتیک

فرکانس : ۲۷/۰ هرتز	ثابت زمانی پیش فاز	ثابت زمانی پس فاز	بهره پایدارساز
ST1A	0.718660914	0.483491351	8.261480428
ST2A	0.720515882	0.482246603	7.028892352
ST3A	0.872654822	0.398171565	7.871308326
ST4B	1.105037596	0.314438475	3.230668046

با توجه به اینکه فرکانس مد کمتر از 0.35 هرتز می‌باشد، بر طبق جدول ۵-۴۷ انتظار داریم پایدارساز در مدل‌های ST1A و ST2A دارای تنظیم مشابهی باشد. بنابراین برای تایید این امر از پایدارساز تنظیمی بر پایه اطلاعات مدل تحریک ST2A برای شبکه‌ی دارای مدل ST1A و بر عکس استفاده خواهیم کرد.

نتایج آنالیز مقادیر ویژه قبل و بعد از اعمال PSS در ۵-۵۰ آورده شده است. بر طبق آن مد بین ناحیه‌ای ناپایدار شبکه پس از اعمال PSS به خوبی پایدار شده است. این نتیجه تشابه تنظیم پایدار سازهای اعمالی در سیستم‌های تحریک ST1A و ST2A را نشان می‌دهد. همین بررسی را برای PSS تنظیم شده در مدل ST1A انجام خواهیم داد.

جدول ۵-۵۰: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک ST1A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
Mode 00030	-0.02339801	0.2800733	1.759752	0.04118598	بدون PSS
Mode 00031	-0.02339801	0.2800733	-1.759752	0.04118598	
Mode 00033	0.02424273	0.2664661	1.674256	-0.04060047	با PSS تنظیمی ST2A
Mode 00034	0.02424273	0.2664661	-1.674256	-0.04060047	

جدول ۵-۵۱: آنالیز ضرایب مشارکت مد بین ناحیه‌ای با سیستم تحریک ST1A

متغیرهای حالت	شماره مد	ضرایب مشارکت
G3; speed	30	1
G3; phi	30	0.9460059
G4; speed	30	0.9060826
G4; phi	30	0.9021898

آنالیز ضرایب مشارکت مد بین ناحیه‌ای شبکه در جدول ۵-۵۱ آورد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید متغیرهای مکانیکی ماشین شماره ۳ بیش‌ترین تاثیر را در ساختار مد بین ناحیه‌ای داشته‌اند. آنالیز ضرایب مشارکت در تمام مدل تحریک استاتیک نشان از آن دارد ماشین شماره ۳ مناسب‌ترین مکان برای نصب پایدارساز سیستم قدرت است. از آنجایی که متغیرهای الکتریکی سیستم تحریک تاثیری زیادی در

آنالیز ضرایب مشارکت مد بین ناحیه‌ای نداشته‌اند و مدهای الکترومکانیکی شبکه متأثر از متغیرهای مکانیکی آن مانند تغییرات زاویه ($\Delta\delta$) و سرعت ماشین ($\Delta\omega$) می‌باشند. بنابراین چنین انتظاری داشتیم که تغییر مدل تحریک تأثیری بر موقعیت‌یابی PSS نداشته باشد.

۳-۴-۳-۵ سیستم تحریک استاتیک مدل ST2A

جدول ۵-۵۲ نتایج آنالیز مقادیر ویژه شبکه‌ی ۴ ماشین با مدل تحریک استاتیک ST2A قبل و بعد از PSS تنظیم شده در مدل ST1A را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار داشتیم مد ناپایدار شبکه با اعمال پایدارساز پایدار شده است. بنابراین با توجه به نتایج این دو بخش باید گفت گروه‌بندی ارائه شده در جدول ۴۷-۵ تایید شده است.

جدول ۵-۵۲: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشین برای سیستم تحریک ST2A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
Mode 00032	-0.02101113	0.2881873	1.810734	0.03805396	بدون PSS
Mode 00033	-0.02101113	0.2881873	-1.810734	0.03805396	
Mode 00037	0.00578398	0.2673433	1.679768	-0.0097159	با تنظیمی ST1A
Mode 00038	0.00578398	0.2673433	-1.679768	-0.0097159	

۴-۴-۳-۵ سیستم تحریک استاتیک مدل ST3A

نتایج آنالیز مقادیر ویژه برای مد بین ناحیه‌ای شبکه‌ی ۴ ماشین با سیستم تحریک ST3A قبل و بعد از اعمال PSS در جدول ۵-۵۳ نشان داده شده است. پایدارساز بر اساس اطلاعات تحریک ST3A تنظیم شده است و با توجه به نتایج به خوبی توانسته است مد کم میرای شبکه را به سمت چپ محور مختصات انتقال دهد.

جدول ۵-۵۳: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک ST3A قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
بدون PSS	0.01988713	0.2809524	1.765276	-0.03511322	Mode 00032
	0.01988713	0.2809524	-1.765276	-0.03511322	Mode 00033
با تنظیمی PSS	0.09436112	0.4905415	3.082163	-0.2921399	Mode 00033
ST3A	0.09436112	0.4905415	-3.082163	-0.2921399	Mode 00034

۵-۳-۴-۵ سیستم تحریک استاتیک مدل ST4B

نتیجه‌ی آنالیز مقادیر ویژه قبل از اعمال PSS نشان‌دهنده وجود مد ناپایداری در شبکه با سیستم تحریک ST4B است. همان‌طور که از جدول ۵-۴۶ مشخص است، جبران سازی در دو مرحله انجام خواهد شد. بنابراین مقادیر تنظیمی ثابت‌های زمانی PSS در جدول ۵-۴۹ برای مدل ST4B می‌بایست دو بار تکرار شوند تا مقدار پس فازی مورد نیاز جبران شود.

جدول ۵-۵۴ نتایج آنالیز مقادیر ویژه بعد از اعمال PSS را نشان می‌دهد. در این حالت مد ناپایدار شبکه به خوبی میرا شده است.

جدول ۵-۵۴: آنالیز مقادیر ویژه در شبکه‌ی ۴ ماشینیه برای سیستم تحریک ST4B قبل و بعد از اعمال PSS

	ضریب میرایی	فرکانس	قسمت موهومی	قسمت حقیقی	
بدون PSS	-0.84525	0.0271588	0.1706437	0.2699185	Mode 00024
	-0.84525	0.0271588	-0.1706437	0.2699185	Mode 00025
با تنظیمی PSS	0.05464993	0.2332502	1.465554	-0.0802123	Mode 00024
ST4B	0.05464993	0.2332502	-1.465554	-0.0802123	Mode 00025

۵-۳-۵ نتایج بررسی تأثیر عدم قطعیت در مدل‌های تحریک استاتیک بر روی

شیفت فازی

- منحنی مکان هندسی شیفت فاز وابسته به نوع مدل سیستم تحریک استاتیک می‌باشد.
- بر طبق بند ۱ عدم قطعیت در اطلاعات مدل تحریک استاتیک منجر به عدم اطمینان ما از محاسبه‌ی درست شیفت فاز و در نتیجه تنظیم مناسب PSS می‌شود.
- با توجه به نتایج مربوط به تنظیم پایدار سازهای سیستم قدرت باید گفت گروه‌بندی ارائه شده در جدول ۴۷-۵ برای سیستم‌های تحریک استاتیک تایید شده است. بدین ترتیب خواهیم داشت:
 ۱. تنظیم PSS برای مدل‌های تحریک ST1A و ST2A در فرکانس کمتر از ۰/۳۵ هرتز مشابه خواهد بود.
 ۲. در مدل‌های ST3A و ST4B پایدارساز باید بر اساس اطلاعات هر مدل تحریک و به طور جداگانه تنظیم شود.
 ۳. مدل ST4B در هیچ بازه‌ی فرکانسی دارای هم گروهی از لحاظ تشابه تنظیم نخواهد بود.
- موقعیتیابی پایدارساز سیستم قدرت مستقل از مدل سیستم تحریک استاتیکی می‌باشد و با تغییر مدل تغییر نخواهد کرد.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پایان نامه اثرگذاری عدم قطعیت در اطلاعات سیستم تحریک بر روی تنظیم و موقعیت یابی پایدارساز سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفت. عدم قطعیت مزبور در این بررسی به صورت اعمال پارامترها و مدل های مختلف برای سیستم های تحریک در نظر گرفته شد. اثر گذاری از دو منظر مورد بررسی قرار گرفت.

در منظر اول تاثیر مدل ها و پارامترهای مختلف تحریک بر روی مد الکترومکانیکی شبکه بررسی شد. در این حالت بازه ی تغییرات قسمت های حقیقی و موهومی مد به عنوان شاخص های انتخابی در مباحث پایداری و تنظیم PSS مورد تحلیل قرار گرفت. در این وضعیت مشخص شد قسمت موهومی مد و یا همان فرکانس آن از تغییرات اعمال در سیستم تحریک تاثیر کمی دریافت می کند که به نظر می رسد در نظر نگرفتن این تغییر خلی در مسئله ی تنظیم PSS به وجود نخواهد آورد. ولی بررسی نشان داده قسمت حقیقی مد که شاخص پایداری شبکه نیز می باشد، تغییرات نسبتاً زیادی در اثر عدم قطعیت مذکور داشته است. این بدان معناست، در شرایطی که مدل و یا پارامترهای واقعی سیستم تحریک مشخص نباشند، نمی توان به طور قطع به نتایج دریافتی از آنالیزهای پایداری اطمینان کرد.

نکته ی مهم دیگری که در این حالت به آن دست یافتیم، مربوط به ساختار شبکه ی تست می باشد. در تحلیل بالا از دو شبکه ی تک ماشینه و چهار ماشینه برای انجام مطالعات استفاده کردیم. نتایج نشان داد،

تغییرات قسمت‌های حقیقی و موهومی مد در شبکه‌ی چهار ماشینه نسبت به تک ماشینه به شدت کاهش یافت. می‌توان علت این امر را گسترده‌تر شدن شبکه و افزایش متغیرهای حالت شبکه دانست. بر اساس این نتایج انتظار داریم در شبکه‌های بزرگ‌تر مانند شبکه‌ی کشور تاثیر عدم قطعیت در مدل و پارامترهای سیستم تحریک بر روی مد الکترومکانیکی بسیار کم باشد. و شاید بتوان گفت در چنین شبکه‌های گسترده‌ای صرف نظر کردن از تغییرات قابل قبول است.

در منظر دوم اثر گذاری مدل‌ها و پارامترهای مختلف تحریک بر روی شیف‌ت فاز جبران سازی مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت تغییرات پارامترها اثر قابل توجهی بر روی شیف‌ت فاز نداشته است ولی با توجه به نتایج دریافتی بازه‌ی تغییرات زاویه‌ی جبران سازی برای مدل‌های مختلف تحریک نسبتاً زیاد می‌باشد. بنابراین تنظیم PSS مستقل از عدم قطعیت در پارامترهای سیستم تحریک است ولی به تغییر مدل‌های تحریک وابسته می‌باشد.

در این حالت با توجه به شیف‌ت فاز جبران سازی مدل‌های مختلف تحریک، تنظیم روابستی را برای پایدارساز تعریف کردیم. در واقع این تنظیم روابست را این چنین تعریف کرده‌ایم که آیا PSS تنظیم شده بر اساس اطلاعات سیستم تحریک معینی می‌تواند در مدل‌های دیگر تحریک پاسخ گو باشد یا خیر؟

بر این اساس بر مبنای تشابه شیف‌ت فاز جبران سازی گروه‌بندی برای مدل‌های مختلف سیستم تحریک ارائه شد که نتایج مطالعات صورت گرفته، این گروه‌بندی‌ها تایید کرد.

همچنین بر اساس مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته باید گفت موقعیت یابی PSS مستقل از تغییر در مدل و پارامترهای سیستم تحریک می‌باشد. با توجه به اینکه مناسب‌ترین مکان برای نصب پایدارساز، ژنراتوری می‌باشد که بیشترین مشارکت را در ایجاد مد الکترومکانیکی شبکه داشته است، بنابراین متغیرهای الکتریکی سیستم تحریک نمی‌توانند تاثیر خاصی بر روی این مشارکت داشته باشند.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته سه پیشنهاد زیر برای استفاده در کارهای آینده ارائه شده است.

۱. برای نشان دادن عدم قطعیت در پارامترهای تحریک، بازه‌ی تغییرات باید با دقت انتخاب شود. با توجه به نزدیکی و تشابه مقادیر پارامترها و ساختار بعضی از مدل‌های سیستم تحریک، ممکن است تغییرات انتخابی ما برای پارامترهای یک مدل مشخص منجر به دریافت نتایج مربوط به مدل دیگر شود.

۲. ساختار شبکه در نتایج بدست آمده بسیار با اهمیت می‌باشد و پیشنهاد می‌شود از شبکه‌های تست استاندارد که دارای اطلاعات کامل و درستی می‌باشند برای انجام بررسی‌ها استفاده شود.

۳. مقادیر اولیه استفاده شده برای سیستم‌های تحریک بر روی نتایج دریافتی بسیار موثر خواهد بود. باید دقت شود تمامی مقادیر در رنج منطقی خود قرار داشته باشند. بر طبق بررسی‌های انجام شده پیشنهاد می‌شود برای سیستم‌های تحریک از مقادیر اولیه ارائه شده در نرم افزار DigSILENT به جای مقادیر آورده شده در استاندارد IEEE 421 استفاده شود.

پیوست ۱

پارامترها و مشخصات شبکه‌های تست

الف. شبکه‌ی تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت

مقادیر بر حسب ولتاژ و توان نامی ژنراتور پریونیت شده است.

ثوابت مربوط به ژنراتورها:

$$\begin{array}{llll}
 SG, & S = 300 \text{ MVA.} & P.F = 0.9. & V = 6 \text{ Kv} \\
 f = 50 \text{ Hz.} & M = 2H = 8.1 & D = 0. & Xl = 0.1 \text{ P.u.} \\
 Xd = 0.973 \text{ P.u.} & Xq = 0.55 \text{ P.u.} & Xd' = 0.19 \text{ P.u.} & Xd'' = 0.1 \text{ P.u.} \\
 Xq'' = 0.2 \text{ P.u.} & Td\phi = 7.76 \text{ s.} & Td\phi' = 0.0475 \text{ s} & Tq\phi = 0.075 \text{ s}
 \end{array}$$

ثوابت مربوط به خط:

$$L = 600 \text{ Km.} \quad R = 0.1 \text{ P.u.} \quad X = 1.125 \text{ P.u.}$$

نقطه کار سیستم:

$$P = 0.9 \text{ P.u.} \quad Q = 0.433 \text{ P.u.} \quad V = 1.04 \text{ P.u.}$$

ب. شبکه‌ی نمونه دو ناحیه‌ای ۴ ماشین

مقادیر ژنراتور بر حسب ولتاژ و توان نامی خودش پریونیت شده است.

ثوابت مربوط به ژنراتورها:

$$\begin{array}{llllll}
 SG, & S = 900 \text{ MVA.} & P.F = 0.8 & V = 20 \text{ Kv} & D = 0. \\
 Xd = 1.8 \text{ P.u.} & Xq = 1.7 \text{ P.u.} & Xd' = 0.3 \text{ P.u.} & Xd'' = 0.25 \text{ P.u.} & Xl = 0.2 \text{ P.u.} \\
 Xq'' = 0.25 \text{ P.u.} & Td\phi = 8 \text{ s.} & Tq\phi = 0.4 \text{ s.} & Td\phi' = 0.03 \text{ s} & Tq\phi = 0.05 \text{ s} \\
 f = 50 \text{ Hz.} & H = 6.5 \text{ s (for G1 and G2).} & H = 6.175 \text{ s. (for G3 and G4)} & Ra = 0.0025
 \end{array}$$

ثوابت مربوط به خط:

مقادیر خط در مبنای ولتاژ ۲۳۰ کیلو ولت و توان نامی ۱۰۰ مگا ولت آمپر پریونیت شده‌اند.

$$R = 0.0001 \text{ P.u/Km.} \quad X = 0.001 \text{ P.u/Km.} \quad b_c = 0.00175 \text{ p.u/Km.}$$

نقطه کار سیستم:

$G1:$	$P = 740 \text{ MW.}$	$Q = 72 \text{ MVar}$	$Et = 1.03 \angle 20.2^\circ$
$G2:$	$P = 700 \text{ MW.}$	$Q = 411 \text{ MVar}$	$Et = 1.01 \angle 10.6^\circ$
$G3:$	$P = 719 \text{ MW.}$	$Q = 71 \text{ MVar}$	$Et = 1.03 \angle -51.89^\circ$
$G4:$	$P = 700 \text{ MW.}$	$Q = 336 \text{ MVar}$	$Et = 1.01 \angle -61.74^\circ$
$Bus\ 7:$	$Pl = 967 \text{ MW.}$	$Ql = 100 \text{ MVar}$	$Qc = 188 \text{ MVar}$
$Bus\ 9:$	$Pl = 1767 \text{ MW.}$	$Ql = 185 \text{ MVar}$	$Qc = 334 \text{ MVar}$

- [۱] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., United States of America, 1994.
- [۲] IEEE Guide for Identification, Testing ,and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems, IEEE Standard 421.2-2005.
- [۳] M. Klein, G. Rogers, and P. Kundur, "A fundamental study of inter-area oscillation in power systems", IEEE Trans. On Power System, Vol. PS-6, 1991, pp. 914-921.
- [۴] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers and M.S. Zywno, "Application of power system stabilizer for enhancement of overall system stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-4,1989, pp. 614-629.
- [۵] علی کریم‌پور "بکارگیری روش‌های سیستماتیک طراحی ساختار کنترل در بهبود پایداری شبکه‌های قدرت" رساله دکتری، دانشکده برق، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۲.
- [۶] E.V. Larsen and D.A. Swan, "Applying Power System Stabilizers, Part I,II, and III", IEEE Trans., Vol. PAS-100, pp. 3017-3046, June 1981.
- [۷] F.P. Demello, L.N. Hannett, J.M. Undrill, "Practical Approaches to Supplementary Stabilizing from Acceleration Power", IEEE Trans. Vol PAS- 97, pp. 1515-1522, September/October 1978.
- [۸] D.C. Lee, R.E. Beaulieu, and J.R.R. Service, "A Power System Stabilizer Using Speed and Electrical Power Inputs – Design and Filed Experience", IEEE Trans., Vol. PAS-100, pp.4151-4167, September 1981.
- [۹] F.P. de Mello, P.J. Nolan, T.F. Laskowski, and J.M. Undrill., "Coordinated application of stabilizers in multimachine power systems", IEEE Trans. On Power Apparatus and System, Vol. 99, No.3, 1980, pp. 892-901
- [۱۰] O.H. Abdalla, S.A. Hassan, and N.T. Tweig., "Coordinated stabilization of a multimachine power system", IEEE Trans. On Power Apparatus and System, Vol. 103, No. 3, 1984, pp. 483-494.

- [۱۱] E. Z. Zhou, O.P. Malik, G.S. Hope., “Theory and method for selection of power system stabilizer location”, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 6, No. 1, 1991, pp. 170-176.
- [۱۲] Y. Zhuang, A. Feliachi, “Identification Of Optimal Location For Power System Stabilizers”, IEEE PROCEEDINGS 1988, pp. 236-238.
- [۱۳] A. Feliachi, “Optimal siting of power system stabilisers”, IEE PROCEEDINGS, Vol. 137, Pt. C. No. 2, 1990, pp. 101-106.
- [۱۴] R. Yen, P. W. Sauer, “Eigenvalue Tracking for PSS Placement”, IEEE conference North American Power Symposium (NAPS), 2009, pp. 1-6.
- [۱۵] T. Hiyama, “Coherency-based Identification of Optimum Site for Stabilizer Applications”, IEE PROCEEDINGS, Vol. 130, Pt. C, No. 2, 1983, pp. 71-74.
- [۱۶] D. T. NGUYEN, D. GEORGES., “Controllability Gramian for Optimal Placement of Power System Stabilizers in Power Systems”, Circuits and System, 2006. APCCAS 2006, IEEE Asia Pacific Conference, pp. 1373-1378.
- [۱۷] Y. Y. Hsu, C. L. Chen., "Identification of Optimum Location of Stabilizer Applications Using Participation Factors", IEEE PROCEEDINGS., Vol. 134, Pt. C. No. 3, 1987, pp. 238-244.
- [۱۸] Z. Ao, T.S. Sidhu, R.J. Fleming., “Stability investigation of a longitudinal power system and its stabilization by a coordinated application of power system stabilizers”, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, 1994, pp. 466-474.
- [۱۹] A. Karimpour, R. Asgharian, O.P. Malik., “Determination of PSS location based on singular value decomposition”, Electrical Power and Energy Systems 27 (2005), 2005, pp. 535–541.
- [۲۰] J. V. Milanovic, A. C. S. Duque, “Identification of Electromechanical Modes and Placement of PSSs Using Relative Gain Array”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 1, 2004, pp. 410-417.
- [۲۱] N. Martins, L. T. G. Lima, “Determination of suitable locations for damping electromechanical oscillations in large scale power systems” IEEE Trans. Power Systems, vol. 5, No. 4, 1990, pp. 1455-1469.
- [۲۲] H. Li, Q. Liu, and S. Peng., “Selection of Suitable Installing Locations of PSS in Large Scale Power Systems” in IEEE International Conference on Power System Technology. 2004. POWERCON 2004, pp. 1106-1110.

- [۲۳] K. Sebaa, M. Boudour, "Optimal Locations and tuning of Robust Power System Stabilizers using Genetic Algorithms", IEEE industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on, pp. 501-506.
- [۲۴] J. L. Hsiao, D. Chiang and J. S. Thorp, "Identification of Optimum Sites for Power System Stabilizer Applications", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No.4, 1990, pp. 1302-1308.
- [۲۵] M. Eslami, H. Shareef, A. Mohamed, M. Khajehzadeh, "Optimal Location of PSS Using Improved PSO with Chaotic Sequence", International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering (INECCE) 2011, pp. 253-258.
- [۲۶] F.P. deMello, C. Concoridia, "Concept of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control," IEEE Trans. on PAS, vol. 88, pp. 316-329, Apr. 1969.
- [۲۷] P. Kundur, D.C. Lee, H.M. Zein El-Din, "Power System Stabilizers for Thermal Units: Analytical Techniques and On-site Validation," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, no.1, pp. 81-95, Jan. 1981.
- [۲۸] C.M. Lim, and S. Elangovan, "A New Stabilizer Design Technique for Multimachine Power systems," IEEE Trans., Vol. PAS-104, pp.2393-2400, 1985.
- [۲۹] D. R. Ostojic "STABILIZATION OF MULTIMODAL ELECTROMECHANICAL OSCILLATIONS BY COORDINATED APPLICATION OF POWER SYSTEM STABILIZERS" IEEE Trans on Power Systems. Vol. 6, No. 4. November 1991.
- [۳۰] M. Hasanovic, A. Feliachi, A. Hasanovic, N. B. Bhatt, and A. G. DeGroff "Practical Robust PSS Design Through Identification of Low-Order Transfer Functions". IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 3, AUGUST 2004.
- [۳۱] K. Glover and J. C. Doyle, "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_∞ -norm bound and relations to risk sensitivity," Syst. Contr. Lett., vol. 11, pp. 167-172, 1988.
- [۳۲] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar, and B. A. Francis, "Statespace solutions to standard H_2 and H_∞ control problems," IEEE Trans Automat. Contr., vol. 34, pp. 831-847, 1989.
- [۳۳] P. S. Rao and I. Sen " Robust Pole Placement Stabilizer Design Using Linear Matrix Inequalities " IEEE Trans On Power System, VOL. 15, NO. I, FEBRUARY 2000.
- [۳۴] M. Abido, "Parameter optimization of a multi-machine power system stabilizer using genetic local search", Electrical Power and Energy Systems 23 ,2001, pp 785-792.

- [۳۵] J. Kennedy, R. C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann, 2001.
- [۳۶] J. Kennedy, "The particle swarm: Social adaptation of knowledge," in *Proc. IEEE Int. Conf. Evolutionary Comput.*, Indianapolis, IN, 1997, pp. 303-308.
- [۳۷] T. K. Das, and G. K. Venayagamoorthy, "Optimal Design of Power System Stabilizers Using a Small Population Based PSO " *power engineering society general meeting* , 2006, IEEE.
- [۳۸] K. A. Folly, "Multimachine Power System Stabilizer Design Based on a Simplified Version of Genetic Algorithms Combined with Learning", *ISAP 2005*.
- [۳۹] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Standard 421.5-2005.
- [۴۰] M. Mišković, M. Mirošević, Z. Maljković, "Analysis of Synchronous Generator Stability in Case of Separate and Self-Excitation System" *14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010*.
- [۴۱] W. G. Heffron and R. A. Philips, Effect of modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators. *AIEE Trans. Power Appar. Syst.* 692-697, Aug. 1952.

[۴۲] پژوهشکده برق پژوهشگاه نیرو، "تعیین پارامترهای دینامیکی یک واحد نیروگاه حرارتی توس"، ایران،

۱۳۸۴.

- [۴۳] P. M. Anderson and A. A. Fouad, "Power System Stability", Iowa state university press, Ames, Iowa, 1977.
- [۴۴] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, "Power System Dynamics: Stability and Control" Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, United Kingdom, 2008.
- [۴۵] M. S. Dyrkacz, C. C. Young, and F. J. Maginniss, "A digital transient stability program including the effects of regulator, exciter, and governor response," *AIEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 79, pp. 1245-1257, 1960 (February 1961 sec.).
- [۴۶] L. Bu, W. Xu, L. Wang, F. Howell, P. Kundur., "A PSS Tuning Toolbox and Its Application". *IEEE Conference*, 2003.
- [۴۷] Yao-Nan Yu, *Electric Power System Dynamics*. New York: Academic Press, 1983.