بسم اللّه الرّحمن الرّحيم

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق گرایش قدرت

طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور سنکرون و جبرانساز استاتیکی سنکرون در سیستم قدرت چند ماشینه با استفاده از دینامیک‌های صفر

استاد راهنما:

دکتر امین خدابخشیان

دکتر محمد عطائی

پژوهشگر:

محمد جواد مرشد

خرداد ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه اصفهان است.

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه برق

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی برق-قدرت گرایش سیستم‌های قدرت آقای

محمد جواد مرشد تحت عنوان

طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور سنکرون و جبرانساز استاتیکی سنکرون در سیستم قدرت چند ماشینه با استفاده از دینامیک‌های صفر

در تاریخ ۹۰/۳/۱۸ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه دکتر امین خدابخشیان با مرتبه ی علمی دانشیار امضا

۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه دکتر محمد عطائی با مرتبه ی علمی استادیار امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر بهزاد میرزائیان دهکردی با مرتبه ی علمی دانشیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر مهدی بانژاد با مرتبه ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تقدیر و تشکر

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر امین خدابخشیان و جناب آقای دکتر محمد عطائی به عنوان اساتید راهنما، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. قطعا انجام این تحقیق بدون راهنمایی‌ها و کمک های این دو عزیز میسر نبود. همچنین از اعضای هیات داوران، آقایان دکتر مهدی بانژاد و دکتر بهزاد میرزائیان به خاطر مطالعه دقیق این پایان نامه و ارائه پیشنهادات مهم و سازنده کمال تشکر و قدردانی را دارم.

ارج می نهم کمک های دوست خوبم آقای معین پرستگاری دانشجوی دکتری مهندسی برق دانشگاه اصفهان به خاطر کمک ها، تشویق ها و حمایت های بیدریغشان.

گرامی می‌دارم زحمات بی‌شائبه خانواده‌ام را، که در طول این سالیان، همواره با جان و دل مشوق و راهنمای بنده بوده‌اند. به خاطر هر آنچه بودم، هستم و خواهم شد، خود را تا ابد مدیون این عزیزان می‌دانم.

چکیده

پایداری سیستم‌های قدرت یکی از مهمترین مسائل در عملکرد سیستم قدرت می‌باشد. یکی از راه‌های اقتصادی و عملی بهبود پایداری سیستم قدرت، سیستم‌های تحریک می‌باشند. یکی دیگر از ادواتی که نقش اساسی در پایداری سیستم‌های قدرت دارد، ادوات سیستم انتقال نیروی انعطاف پذیر (FACTS) می‌باشند که امروزه در سیستم‌های قدرت به صورت روزافزونی استفاده می‌شوند. با رشد سریع سیستم‌های قدرت الکتریکی، عملکرد دینامیکی کنترل‌کننده‌ها، پایداری سیستم و روش‌های مطالعه آنها نیز در حال تغییر می‌باشد. طراحی و پیاده سازی تکنیک‌های کنترلی جهت بهبود پایداری سیستم‌های قدرت بزرگ یکی از مسائل مهم در دهه‌های اخیر بوده است. اغلب تکنیک‌های کنترلی موجود براساس مدل‌های خطی سیستم قدرت طراحی می‌شوند. اما با توجه به اینکه سیستم‌های قدرت ذاتاً غیر خطی می‌باشند، طراحی کنترل‌کننده بر اساس روش‌های غیرخطی که مدل دقیق سیستم را در نظر می‌گیرد نسبت به کنترل‌کننده‌های خطی ضروری است. علیرغم تأثیر ادوات FACTS در افزایش میرائی مدهای بین ناحیه‌ای، و اثر متقابل آنها بر دیگر کنترل-کننده‌هائی مانند پایدار ساز سیستم قدرت (PSS) و سیستم تحریک ممکن است بر پایداری سیستم تاثیر منفی ایفا کند. لذا طراحی هماهنگ کنترل‌کننده‌های تحریک ژنراتور و این ادوات لازم می‌باشد.

در این پایان‌نامه، طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور سنکرون و جبرانساز استاتیکی سنکرون (STATCOM) با استفاده از روش دینامیک‌های صفر در سیستم‌های تک ماشینه و چهار ماشینه مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین جهت مقایسه نتایج شبیه‌سازی طراحی با استفاده از روش دینامیک‌های صفر، طراحی پایدارساز سیستم قدرت و هماهنگی آن با جبرانساز استاتیکی سنکرون (STATCOM) با استفاده از روش PSO و روش جدید و هیبرید BF-NM انجام شده است. نتایج این مقایسه نشان دهنده کارایی روش دینامیک‌های صفر می‌باشد.

کلیدواژه ها: هماهنگ‌سازی، تحریک ژنراتور، جبرانساز استاتیکی سنکرون، پایدار ساز سیستم قدرت، دینامیک‌های صفر، الگوریتم BF-NM

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- موضوع و ساختار پایان‌نامه ۲

فصل دوم- کنترل‌کننده‌های تحریک ژنراتور و STATCOM

۲-۱- مقدمه ۴

۲-۲- پایداری زاویه ای روتور ۴

۲-۳- کنترل تحریک ژنراتور سیستم قدرت ۶

۲-۳-۱- پایدارساز سیستم قدرت ۶

۲-۳-۲- کنترل‌کننده‌های غیرخطی تحریک ژنراتور سنکرون ۷

۲-۴- رویکردهای اصلی کنترل جبرانساز استاتیکی سنکرون(STATCOM) ۱۰

۲-۴-۱- کنترل‌کننده‌های داخلی جبرانساز استاتیکی سنکرون ۱۱

۲-۴-۲- کنترل‌کننده‌های خارجی جبرانساز استاتیکی سنکرون ۱۲

۲-۵- مروری بر تحقیقات صورت گرفته روی کنترل جبرانساز استاتیکی سنکرون ۱۲

۲-۵-۱- کنترل داخلی جبرانساز استاتیکی سنکرون ۱۳

۲-۵-۱-۱- تکنیک‌های کنترل خطی ۱۳

۲-۵-۱-۲- تکنیک‌های کنترل غیرخطی ۱۴

۲-۵-۱-۳- تکنیک‌های کنترل هوش مصنوعی ۱۵

۲-۵-۲- کنترل خارجی جبرانساز استاتیکی سنکرون ۱۷

۲-۶- طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور و STATCOM ۱۹

۲-۶-۱- طراحی هماهنگ پایدارساز سیستم قدرت و STATCOM با استفاده از روش‌های هوشمند ۱۹

۲-۶-۲- طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور و STATCOM با استفاده از روش‌های غیرخطی ۱۹

فصل سوم- مدل سیستم قدرت و STATCOM

۳-۱- مدل سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت ۲۲

۳-۲- مدل سیستم قدرت چند ماشینه ۲۳

۳-۳- جبرانساز استاتیکی سنکرون (STATCOM) ۲۴

۳-۳-۱- جبرانساز استاتیکی سنکرون (STATCOM) ۲۴

۳-۳-۱-۱- جبرانساز استاتیکی سنکرون مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ ۲۴

۳-۳-۱-۲- کنترل توان راکتیو و ولتاژ ۲۶

۳-۳-۱-۳- پایداری گذرا ۲۶

۳-۳-۱-۴- پایداری دینامیکی ۲۷

عنوان **صفحه**

۳-۳-۲- مدل STATCOM ۲۸
۳-۴- معادلات حاکم بر سیستم قدرت چند ماشینه همراه با STATCOM ۳۱

فصل چهارم- طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور و STATCOM با استفاده از روش دینامیک‌های صفر

۴-۱- مقدمه ۳۳
۴-۲- دینامیک‌های - صفر ۳۴
۴-۲- روش طراحی بر اساس دینامیک‌های- صفر ۳۵
۴-۳- طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور و STATCOM با استفاده از دینامیک‌های صفر در سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت [۷۳] ۳۶
۴-۴- طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور و STATCOM با استفاده از دینامیک‌های صفر در سیستم چهار ماشینه کندور ۴۲
۴-۵- معادلات پیشنهادی طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور و STATCOM با استفاده از دینامیک‌های صفر برای سیستم n ماشینه ۴۵

فصل پنجم- طراحی هماهنگ پایدارساز سیستم قدرت و STATCOM با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند

۵-۱- مقدمه ۴۷
۵-۲- الگوریتم جستجوی ذرات (PSO) ۴۷
۵-۳- الگوریتم ترکیبی جستجوی باکتریایی و نلدر - مید (BF-NM) ۵۰
۵-۳-۱- روش جستجوی باکتریایی ۵۱
۵-۳-۱-۱- حرکت به سمت ماده غذایی ۵۱
۵-۳-۱-۲- حرکت دسته جمعی ۵۱
۵-۳-۱-۳- تولید مثل ۵۲
۵-۳-۱-۴- حذف و پراکندگی ۵۲
۵-۳-۲- روش Nelder-Mead ۵۲
۵-۳-۲-۱- تعیین مثلث اولیه BGW ۵۲
۵-۳-۲-۲- تعیین نقطه میانی ناحیه مناسب ۵۳
۵-۳-۲-۳- عمل بازتاب با استفاده از نقطه R ۵۳
۵-۳-۲-۴- عمل انبساط با استفاده از نقطه E ۵۳
۵-۳-۲-۵- عمل انقباض با استفاده از نقطه C ۵۳
۵-۳-۲-۶- حرکت به سمت کوچک شدن (انقباض) ۵۴
۵-۳-۳- الگوریتم BF همراه با NM ۵۴

عنوان **صفحه**

۵-۴- پایدارساز سیستم قدرت و ساختار STATCOM جهت طراحی هماهنگ ۵۶
۵-۵- تابع هدف ارایه شده جهت طراحی هماهنگ PSS و STATCOM ۵۶

فصل ششم- نتایج شبیه‌سازی

۶-۱- مقدمه ۵۸
۶-۲- سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت ۵۸
۶-۳- سیستم قدرت چهار ماشینه کندور ۶۲

فصل هفتم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ادامه کار

۷-۱- مقدمه ۷۳
۷-۲- نتیجه‌گیری ۷۳
۷-۳- پیشنهادات ادامه کار ۷۴
پیوست الف ۷۵
منابع و مآخذ ۷۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل(۳-۱): سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت ۲۲
شکل(۳-۲): دیاگرام جبرانساز سنکرون مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ [۴۶] ۲۴
شکل(۳-۳): سیستم قدرت دو ماشینه با یک جبرانساز استاتیکی سنکرون ۲۷
شکل(۳-۴): دیاگرام $(p-\delta)$ سیستم قدرت جبران نشده و جبران شده با STATCOM [۴۶] ۲۷
شکل(۳-۵): سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت همراه با STATCOM ۲۸
شکل(۳-۶): دیاگرام برداری قاب مرجع d و q و قاب d' و q' ۲۹
شکل(۳-۷): ساختار کنترل‌کننده STATCOM [۲۲] ۳۰
شکل(۳-۸): مدل مرتبه اول STATCOM ۳۱
شکل(۴-۱): مدار معادل سیستم SMIB همراه STATCOM ۳۷
شکل(۴-۲): سیستم قدرت چهار ماشینه همراه با STATCOM ۴۳
شکل(۵-۱): نمایش مسیر حرکت ذرات هجومی ۵۰
شکل(۵-۲): فلوچارت الگوریتم PSO ۵۰
شکل(۵-۳): الگوریتم Nelder-Mead در فضای ۲ بعدی ۵۳
شکل(۵-۴): الگوریتم ترکیبی BF همراه با Nelder-Mead[۸۳] ۵۵
شکل(۵-۵): ساختار پس‌فاز-پیش‌فاز پایدارساز سیستم قدرت. ۵۶
شکل(۶-۱): سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت همراه با STATCOM ۵۹
شکل(۶-۲): سرعت ژنراتور سیستم تک ماشینه برای ۵۰ msec خطای سه فاز ۶۰
شکل(۶-۳): ولتاژ ترمینال ژنراتور سیستم تک ماشینه برای ۵۰ msec خطای سه ۶۰
شکل(۶-۴): سرعت ژنراتور سیستم تک ماشینه برای تغییر ۵۰ MW در بار ۶۱
شکل(۶-۵): توان خروجی ژنراتور سیستم تک ماشینه برای تغییر ۵۰ MW در بار ۶۱
شکل(۶-۶): زاویه بار ژنراتور سیستم تک ماشینه برای تغییر ۵۰ MW در بار ۶۲
شکل(۶-۷): سیستم چهار ماشینه کندور همراه با STATCOM ۶۳
شکل(۶-۸): سرعت ماشین اول سیستم چهار ماشینه برای خطای ۲۰۰ msec ۶۴
شکل(۶-۹): سرعت ماشین دوم سیستم چهار ماشینه برای خطای ۲۰۰ msec ۶۴
شکل(۶-۱۰): سرعت ماشین سوم سیستم چهار ماشینه برای خطای ۲۰۰ msec ۶۵
شکل(۶-۱۱): سرعت ماشین چهارم سیستم چهار ماشینه برای خطای ۲۰۰ msec ۶۵
شکل(۶-۱۲): ولتاژ ترمینال ماشین اول سیستم چهار ماشینه برای خطای ۲۰۰ msec ۶۵
شکل(۶-۱۳): ولتاژ ترمینال ماشین دوم سیستم چهار ماشینه برای خطای ۲۰۰ msec ۶۶
شکل(۶-۱۴): ولتاژ ترمینال ماشین سوم سیستم چهار ماشینه برای خطای ۲۰۰ msec ۶۶
شکل(۶-۱۵): ولتاژ ترمینال ماشین چهارم سیستم چهار ماشینه برای خطای ۲۰۰ msec ۶۶

عنوان **صفحه**

شکل(۶-۱۶): سرعت ماشین اول سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۶۷
شکل(۶-۱۷): سرعت ماشین دوم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۶۷
شکل(۶-۱۸): سرعت ماشین سوم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۶۸
شکل(۶-۱۹): سرعت ماشین چهارم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۶۸
شکل(۶-۲۰): توان خروجی ماشین اول سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۶۸
شکل(۶-۲۱): توان خروجی ماشین دوم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۶۹
شکل(۶-۲۲): توان خروجی ماشین سوم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۶۹
شکل(۶-۲۳): توان خروجی ماشین چهارم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۶۹
شکل(۶-۲۴): اختلاف زاویه روتور ماشین اول و چهارم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۷۰
شکل(۶-۲۵): اختلاف زاویه روتور ماشین دوم و چهارم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۷۰
شکل(۶-۲۶): اختلاف زاویه روتور ماشین سوم و چهارم سیستم چهار ماشینه برای تغییر MW ۵۰ در بار ۷۰
شکل(۶-۲۷): نمودار همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی ۷۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول(۲-۱) دیدگاه کنترل داخلی برای جبرانساز استاتیکی سنکرون ۱۷
جدول(۶-۱) پارامترهای الگوریتم BF-NM ۵۹
جدول(۶-۲) ضرایب PSS و کنترل‌کننده‌های PI مربوط به STATCOM ۶۰
جدول(۶-۳) ضرایب PSS و کنترل‌کننده‌های PI مربوط به STATCOM در سیستم چهار ماشینه ۶۴
جدول(۶-۴) مقادیر سطح زیر نمودار مربوط به معیار ITAE ۷۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

پایداری سیستم‌های قدرت یکی از مهمترین مسائل در عملکرد سیستم قدرت می‌باشد. این موضوع از این حقیقت ناشی می‌شود که سیستم قدرت بایستی توانایی حفظ ولتاژ و فرکانس را در تراز مطلوبی تحت هر گونه اغتشاش وارد شده به سیستم را داشته باشد. اغتشاشات ممکن است کوچک باشند، همانند تغییرات ناگهانی بار شبکه (پایداری دینامیکی) و یا اغتشاشات بزرگ و ناگهانی مثل خروج ژنراتوری از شبکه یا خطای اتصال کوتاه در یک خط انتقال (پایداری گذرا) [۱].

کنترل سیستم‌های قدرت یک عنصرحیاتی در حفظ پایداری سیستم قدرت می‌باشد. در این راستا، ساختارهای کنترلی بسیار مهم و تضمین‌کننده پایداری سیستم قدرت در رنج وسیعی از شرایط کاری می‌باشند. این ساختارهای کنترلی می‌توانند برروی ژنراتورها، خطوط انتقال و توزیع نصب گردند.

با رشد سریع سیستم‌های قدرت الکتریکی، که به شدت غیرخطی و متغیر با زمان می‌باشند، طراحی و پیاده‌سازی تکنیک‌های کنترلی جهت بهبود پایداری سیستم‌های قدرت بزرگ یکی از مسائل مهم در دهه‌های اخیر بوده است.

یکی از راه‌های اقتصادی و عملی بهبود پایداری سیستم قدرت، سیستم‌های تحریک می‌باشند [۱]. یکی دیگر از ادواتی که نقش اساسی در پایداری سیستم‌های قدرت دارد، ادوات سیستم انتقال نیروی انعطاف‌پذیر[1] (FACTS) می‌باشند که امروزه در سیستم‌های قدرت به صورت روزافزونی استفاده می‌شوند [۲-۳]. ساختار این ادوات FACTS براساس کلیدهای الکترونیک قدرت فرکانس بالا یا ولتاژ بالا می‌باشد. همچنین این ادوات قابلیت کنترل‌پذیری پخش بار و بهبود ولتاژ سیستم‌های قدرت را امکان پذیر می‌کنند [۳]. در این راستا کنترل سیستم‌های قدرت و ادوات FACTS جهت بهبود عملکرد سیستم‌های قدرت ضروری می باشد.

اغلب تکنیک‌های کنترلی موجود براساس مدلهای خطی حول نقطه کار سیستم قدرت طراحی می‌شوند. [۴]. اما با توجه به اینکه سیستم‌های قدرت ذاتاً غیر خطی می‌باشند، طراحی کنترل‌کننده بر اساس روش‌های غیرخطی که مدل دقیق سیستم را در نظر می‌گیرد نسبت به کنترل‌کننده‌های خطی ضروری است. جهت بهبود عملکرد ایمن[2] سیستم قدرت، کنترل‌کننده غیرخطی باید عملکرد مطلوبی در برابر سناریوهای مختلفی که یک سیستم می‌تواند با آن روبرو شود را داشته باشد، بدون آنکه بر روی جنبه‌های دیگری از عملکرد سیستم قدرت اثر نامطلوبی داشته باشد. امروزه کنترل سیستم‌های قدرت با استفاده از تحریک ژنراتور سنکرون و ادوات سرعت بالایی همچون ادوات FACTS با استفاده از روش‌های غیرخطی باعث بهبود پایداری سیستم قدرت می‌شود [۴].

۱-۲- موضوع و ساختار پایان‌نامه

با توجه به پیچیدگی و گسترش سیستم‌های قدرت امروزی و ذات غیر خطی این سیستم‌ها، طراحی کنترل-کننده بر اساس روش‌های غیرخطی لازم است. لازم به ذکر است که کنترل‌کننده‌های تحریک ژنراتور بر روی میرایی مدهای محلی تاثیرگذار می‌باشد. همچنین با افزایش روز افزون استفاده از ادوات FACTS و تاثیر آنها در بهبود میرائی مدهای بین ناحیه‌ای سیستم قدرت، کنترل هماهنگ این ادوات با ژنراتورهای سیستم قدرت لازم و ضروری می‌باشد. لزوم هماهنگی بین کنترل‌کننده‌های تحریک ژنراتور و ادوات FACTS از این حقیقت ناشی می‌شود که طراحی جداگانه کنترل‌کننده تحریک ژنراتور و ادوات FACTS سبب تقویت یک مد ناپایدار یا اثر معکوس بر روی یک مد می‌شود.

در این پایان‌نامه، هماهنگ‌سازی تحریک ژنراتور سنکرون و جبرانساز استاتیکی سنکرون[3] با استفاده از روش دینامیک‌های صفر در سیستم‌های تک ماشینه و چند ماشینه مورد مطالعه قرار گرفته است. در فصل دوم مروری بر

[1] Flexible AC Transmission System
[2] Safe
[3] STATCOM

طراحی کنترل‌کننده تحریک ژنراتور و هماهنگی آن با جبرانساز استاتیکی سنکرون انجام شده است. در فصل سوم مدل سیستم‌های تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت و چند ماشینه و همچنین مدل جبرانساز استاتیکی سنکرون که در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است، ارائه شده است. در فصل چهارم مروری بر دینامیک‌های صفر و طراحی هماهنگ تحریک ژنراتور سنکرون و کنترل جبرانساز استاتیکی سنکرون در سیستم‌های تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت و چند ماشینه ارائه شده است. با توجه به اینکه در سال‌های اخیر از دو الگوریتم BFA[1] و PSO[2] در حل مسائل بهینه‌سازی به طور گسترده استفاده شده است از اینرو در فصل پنجم از الگوریتم PSO و با توجه به مشکلات همگرایی و عدم دقت BFA، از الگوریتم جدید و هایبرید جستجوی باکتریایی و نلدر مید[۳] (BF-NM) جهت طراحی پایدارساز سیستم قدرت و هماهنگی آن با جبرانساز استاتیکی سنکرون استفاده شده است. در فصل ششم نتایج شبیه‌سازی سیستم تک ماشینه و چند ماشینه ارائه شده است و نتایج حاصل از روش دینامیک‌های صفر با نتایج حاصل از هماهنگی PSS و جبرانساز استاتیکی سنکرون با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، مقایسه شده است. در نهایت، در فصل هفتم نتایج این پژوهش و پیشنهادهای ادامه این کار بیان شده است.

[1] Bacterial foraging Algorithm
[2] Particle Swarm Optimization
[3] Nelder-Mead

فصل دوم

کنترل‌کننده‌های تحریک ژنراتور و STATCOM

۲-۱- مقدمه

در ابتدا مقدمه‌ای در مورد پایداری در سیستم‌های قدرت ارائه می‌شود و در نهایت مروری بر کارهای انجام گرفته شده در زمینه کنترل تحریک ژنراتور و STATCOM صورت می‌گیرد.

۲-۲- پایداری زاویه ای روتور

پایداری زاویه‌ای روتور به بررسی توانایی حفظ سنکرونیزم ماشین‌های سنکرون در یک سیستم قدرت به هم پیوسته، در هنگام وقوع اغتشاش در شبکه می‌پردازد. پایداری زاویه‌ای روتور در شبکه، وابسته به توانایی نگهداری و یا برقراری تعادل بین گشتاور الکترومکانیکی و گشتاور مکانیکی هر ماشین سنکرون در سیستم می‌باشد. ناپایداری در این حالت می‌تواند به صورت افزایش نوسانات زاویه‌ای تعدادی از ژنراتورهای شبکه باشد که منجر به از دست دادن سنکرونیزم آنها نسبت به ژنراتورهای دیگر شبکه گردد. مسئله پایداری زاویه‌ای روتور، مستلزم مطالعات نوسانات الکترومکانیکی ذاتی در سیستم‌های قدرت می‌باشد. عامل تاثیر گذار در این بحث، تغییر توان خروجی ماشین‌های سنکرون به محض تغییر در زوایای روتور آنها می‌باشد [۱].

در شرایط عملکرد حالت ماندگار، بین گشتاور مکانیکی ورودی و گشتاور الکترومکانیکی خروجی هر ژنراتور تعادل برقرار بوده و سرعت ثابت باقی می‌ماند. در صورت بروز یک اغتشاش در شبکه، تعادل موجود بر

هم خورده و باعث شتابگیری و یا آهسته شدن سرعت روتور ژنراتورها (مطابق با قوانین حاکم بر اجسام دوار) می‌گردد. در صورتی که یکی از ژنراتورها بطور موقت سریعتر نسبت به دیگری حرکت کند، مکان زاویه‌ای روتور آن نسبت به ماشین کندتر، پیش می‌افتد. این تفاوت زاویه‌ای ایجاد شده باعث انتقال قسمتی از بار از ماشین کندتر به ماشین سریعتر وابسته به رابطه توان- زاویه آن ماشین می‌گردد و این کار باعث کاهش اختلاف سرعت می‌گردد. افزایش اختلاف زاویه‌ای روتور از یک حد مشخص، با کاهش توان انتقالی همراه شده و در این حالت، اختلاف زاویه‌ای روتور بیشتر می‌گردد. در صورتی که سیستم توانایی جذب انرژی جنبشی ایجاد شده در اثر تفاوت سرعت روتور را نداشته باشد، سیستم ناپایدار خواهد گردید.

در شبکه‌های قدرت، از دست دادن سنکرونیزم می‌تواند بین ژنراتور با بقیه شبکه و یا بین گروهی از ماشین‌ها اتفاق بیفتد. این در حالی است که ژنراتورهای هر گروه ممکن است سنکرونیزم بین خود را حفظ کرده باشند. تغییرات مربوط به گشتاور الکترومکانیکی یک ژنراتور سنکرون را می توان شامل دو جزء مجزای زیر دانست:

- جزء سنکرون‌کننده گشتاور که هم فاز با انحراف زاویه روتور می‌باشد.
- جزء میراکننده گشتاور که هم فاز با انحراف سرعت می‌باشد.

پایداری سیستم به وجود هر دو جزء گشتاور در هر ماشین سنکرون بستگی دارد. نبود گشتاور سنکرون‌کننده کافی باعث ایجاد ناپایداری غیر نوسانی و یا غیر پریودیک می‌گردد. این در حالی است که نبود گشتاور میراکننده نیز باعث ایجاد ناپایداری نوسانی در شبکه می‌گردد.

جهت ایجاد سهولت در آنالیز پایداری مورد نظر و بدست آوردن مسائل مربوط به پایداری، تقسیم‌بندی پایداری زاویه روتور به دو گروه مختلف اغتشاش بزرگ و اغتشاش کوچک می‌تواند سودمند باشد[۱].

پایداری سیگنال کوچک به حالت عملکرد اولیه سیستم بستگی دارد. هدف از این پایداری، بررسی توانایی حفظ سنکرونیزم ژنراتورهای سیستم قدرت هنگام وقوع اغتشاشات کوچک می‌باشد. اغتشاشات به اندازه‌ای کوچک می‌باشند که جهت انجام آنالیز مربوطه، می‌توان معادلات سیستم را خطی‌سازی نمود. اما پایداری گذرا در شبکه‌های قدرت به هر دو عامل حالت اولیه کارکرد و نیز نوع و شدت اغتشاش بستگی دارد. ناپایداری در این حالت به صورت جدا شدن زاویه‌ای غیر پریودیک خود را نشان می‌دهد که علت آن، عدم وجود گشتاور سنکرونیزوم کافی می‌باشد. هدف از این پایداری، بررسی توانایی حفظ سنکرونیزم ژنراتورهای شبکه در برابر اغتشاشات شدید از جمله اتصال کوتاه می‌باشد، در این حالت، زوایای روتور ژنراتورها نوسان نموده و تغییر نسبتاً زیادی می‌کنند. میزان این نوسانات به رابطه ی غیر خطی توان – زاویه هر ژنراتور بستگی دارد [۱ و ۵-۶].

۲-۳- کنترل تحریک ژنراتور سیستم قدرت

۲-۳-۱- پایدارساز سیستم قدرت

در سیستم‌های قدرت اغتشاشات موجب نوسانات فرکانس پائین می‌شوند و اگر میرائی مناسبی در سیستم قدرت نباشد و این نوسانات در سیستم قدرت باقی بمانند و افزایش پیدا کنند، سبب جدائی سیستم قدرت می‌شوند. در این شرایط جهت بهبود میرائی سیستم قدرت از پایدارساز سیستم قدرت[1] (PSS) برای ژنراتورهای سنکرون استفاده می‌شود. این کنترل‌کننده یک سیگنال کمکی به سیستم تحریک ژنراتور سنکرون اعمال می‌کند [۷-۸].

پایدارساز سیستم قدرت با ساختار پیش‌فاز-پس‌فاز و پارامترهای ثابت به طور گسترده در سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته است [۹-۱۴]. عملکرد پایدارساز سیستم قدرت در مرجع [۹] براساس مدل خطی شده هفرون-فیلیپس مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از جبران‌سازی فازی در حوزه فرکانس و مکان هندسی ریشه‌ها پایدارساز سیستم قدرت طراحی گردیده است [۹-۱۰]. همچنین جهت طراحی پایدارساز سیستم قدرت از روش گشتاور میرائی [۱۱-۱۲] و آنالیز حساسیت [۱۳-۱۴] استفاده شده است. با توجه به اینکه طراحی کنترل‌کننده با استفاده از روش‌های فوق برای یک نقطه کار خاص انجام می‌گردد و نقطه کار سیستم به طور پیوسته در حال تغییر می‌باشد. لذا در سالهای اخیر جهت طراحی پایدارساز سیستم قدرت روش‌های گوناگونی براساس تئوری کنترل مدرن، کنترل بهینه[2]، کنترل تطبیقی[3] و کنترل ساختار متغیر[4] استفاده شده است [۱۵-۱۶].

طراحی کنترل‌کننده با استفاده از روش‌های فوق [۹-۱۶] بر اساس خطی‌سازی سیستم قدرت حول یک نقطه کار می‌باشد. و با توجه به اینکه سیستم قدرت یک سیستم غیرخطی می‌باشد و روش‌های بهینه‌سازی سنتی که از مشتق و شیب معادلات استفاده می‌کنند، قابلیت تعیین نقطه بهینه کلی[5] را ندارند و ممکن است این کنترل‌کننده‌ها در مقابل شرایط متفاوت سیستم قدرت مقاوم نباشند. این کنترل‌کننده‌ها در خطاهای کوچک میرائی لازم و مؤثر را فراهم می‌آورند. کنترل‌کننده‌هایی از قبیل AVR[6] و PSS در ناحیه خطی حول نقطه کار طراحی می‌گردند و این کنترل‌کننده‌ها در خطاهای کوچک میرائی لازم و مؤثر را فراهم می‌آورند. اما نقطه کار سیستم ممکن است

[1] Power System Stabilizer
[2] Optimal Control
[3] Adaptive Control
[4] Variable Structure Control
[5] Global Minimum
[6] Automatic Voltage Regulator

تغییر کند و این کنترل‌کننده‌های خطی قابلیت حفظ پایداری را، بدلیل صرفنظرکردن غیرخطی‌های سیستم قدرت تحت شرایط حالت پایدار یا دینامیکی، ندارند. لذا در سالهای اخیر جهت طراحی پایدارساز سیستم قدرت از روشهای هوشمند استفاده شده است که در مراجع [۱۷] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تابوسرچ[1] [۱۸] و الگوریتم تبرید فلزات[2] [۱۹] جهت طراحی پایدارساز سیستم قدرت به کار برده شده‌اند. روش هوشمند دیگری که نسبت به دیگر روش‌های ذکر شده نسبتاً جدید است، الگوریتم جستجوی ذرات (PSO) می‌باشد که در مرجع [۲۰] به طراحی پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم PSO پرداخته شده است. همچنین در [۲۱] طراحی PSS با استفاده از الگوریتم جستوجوی باکتریایی (BFA) و PSO انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

در این راستا در بخش بعدی به طراحی کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش‌های غیرخطی برای ژنراتور سنکرون پرداخته می‌شود.

۲-۳-۲- کنترل‌کننده‌های غیرخطی تحریک ژنراتور سنکرون

با توجه به اثر غیرخطی‌های سیستم قدرت در حالت گذرا، نمی‌توان از این غیرخطی‌های سیستم قدرت صرفنظر کرد. لذا با توجه به ذاتی بودن غیرخطی‌های مدل سیستم قدرت، استفاده از روش‌های خطی منجر به عملکرد دینامیکی مناسبی نمی‌شود [۲۲-۲۳]. بنابراین استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرخطی، به دلیل مستقل بودن از نقطه تعادل و در نظر گرفتن غیرخطی‌های سیستم، ضروری است [۲۲-۲۳]. در این راستا طراحی کنترل‌کننده-های غیرخطی جهت طراحی کنترل تحریک ژنراتور سنکرون به جای طراحی PSS مرسوم شده است. کنترل تحریک ژنراتور سنکرون نه تنها حاشیه پایداری استاتیکی سیستم قدرت را بهبود می‌بخشد، بلکه نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پائین سیستم قدرت را در شرایط گذرا تضعیف می‌کند [۲۴-۲۷]. در این راستا مروری بر روی طراحی کنترل‌کننده تحریک ژنراتور سنکرون با استفاده از کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش‌های غیرخطی انجام می‌شود.

یادیا[3] و همکاران جهت طراحی کنترل‌کننده تحریک ژنراتور سنکرون از سه روش غیرخطی استفاده کرده‌اند [۲۳].

---

[1] Tabu Search
[2] Simulated Annealing
[3] Yadaiah