

طراحی هماهنگ پایدارساز سیستم قدرت و ادوات امیدانس متغیر برای افزایش میرایی مدهای بین ناحیه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک

میثم زمانی و غضنفر شاهقلیان

توسط ادوات FACTS انجام شود [۸] و [۹]. از آنجا که روش‌های تنظیم تربیتی بهترین عملکرد کنترل‌کننده‌های شبکه قدرت را تضمین نمی‌کنند به راه‌حلی جدید برای تنظیم هم‌زمان پارامترهای پایدارسازهای شبکه قدرت نیاز است. تا کنون چندین روش برای تنظیم هماهنگ پارامترهای PSS و ادوات FACTS ارائه شده که اکثراً بر مبنای مدل‌های بهینه‌سازی پارامتری هستند [۱۰] و [۱۱].

از انواع مختلف این مدل‌ها می‌توان به مدل عملکرد حالت گذرا [۱۲] و مدل مانده‌های حلقه بسته [۱۳] اشاره کرد که از روش‌های مختلف بهینه‌سازی غیر خطی بر مبنای گرادین برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. این روش‌ها از نظر محاسباتی سریع بوده ولی مشکلاتی در یافتن نقطه بهینه سراسری سیستم و نیز یافتن نقاط شروع دارند. از روش‌های محاسباتی نرم برای غلبه بر نقص‌های روش‌های بهینه‌سازی رایج در مراجع مختلف مورد استفاده قرار گرفته که می‌توان به روش‌های ابتکاری^۴ مانند شبیه‌سازی سردشدن فلزات^۵ [۱۴]، روش‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک [۱۵]، برنامه‌ریزی تکاملی^۶ [۱۶] و بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۷ [۱۷] و روش‌های هوشمند دیگر مانند شبکه عصبی [۱۸] و منطق فازی [۱۹] اشاره کرد. این روش‌ها برای حل مسئله‌های بهینه‌سازی غیر خطی و مشتق‌ناپذیر بسیار قدرتمند هستند. روش‌های هوشمند الگوریتم ژنتیک به دلیل سادگی پیاده‌سازی و در دسترس بودن نرم‌افزارهای محاسباتی مناسب بیشتر مورد توجه هستند.

برای افزایش میرایی‌های محلی و بین ناحیه‌ای سیستم قدرت از ادوات FACTS مانند SVC^۸ [۲۰] و TCSC^۹ [۲۲]، خطوط انتقال جریان مستقیم^{۱۰} (HVDC) [۲۳] و جبران‌کننده سری استاتیکی سنکرون^{۱۱} (SSSC) [۲۴] استفاده شده است. اگرچه در تحقیقات این وسایل برای افزایش میرایی این مدها پیشنهاد شده‌اند ولی از نظر عملی و کاربردی بیشتر از SVC و TCSC استفاده می‌شود. در [۲۵] با استفاده از طراحی بهینه پارامترهای خط انتقال HVDC اقدام به افزایش میرایی مدهای بین ناحیه‌ای شده است. در این مقاله با استفاده از یک مدل خطی برای سیستم و خط انتقال DC بهینه‌سازی انجام شده و برای ارسال و دریافت سیگنال از نقاط مختلف سیستم از سنکروفازورها استفاده شده و میزان تأخیر در ارسال و دریافت بر عملکرد سیستم کنترلی در نظر گرفته شده است. در [۲۶] نیز با استفاده از SVC و سنکروفازورها اقدام به افزایش میرایی‌های بین ناحیه‌ای شده که از روش خطی‌سازی برای مدل‌سازی و

چکیده: پایدارساز سیستم قدرت تأثیر بسزایی در میرایی مدهای بین ناحیه‌ای ندارد و از سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر جریان متناوب (FACTS) برای میرایی این مدها و پایداری سیستم قدرت استفاده می‌شود. در این مقاله یک تابع هدف بر مبنای ضرایب وزنی متفاوت و متغیر بر اساس موقعیت مقادیر ویژه ارائه می‌گردد و بهینه‌سازی پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت (PSS) و ادوات امیدانس متغیر شامل جبران‌کننده وار استاتیکی (SVC) و خازن سری کنترل‌شده با تریستور (TCSC) شامل ضریب بهره تقویت‌کننده و ثابت‌های زمانی بلوک‌های جبران‌کننده فاز به صورت هماهنگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. همچنین در فرایند بهینه‌سازی مکان ادوات FACTS و سیگنال کنترلی نیز به عنوان پارامتر بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت ۶۸ باسه IEEE بهبود میرایی مدهای بین ناحیه‌ای را با استفاده از روش پیشنهادی نشان می‌دهد.

کلیدواژه: پایدارساز سیستم قدرت، جبران‌کننده وار استاتیکی، خازن سری کنترل‌شده با تریستور، طراحی هماهنگ کنترل‌کننده‌های سیستم قدرت، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

در یک سیستم قدرت به هم پیوسته ولتاژ و فرکانس شین‌ها و همچنین توان عبوری از خطوط انتقال در شرایط نرمال باید ثابت باشد. نوسانات سیستم‌های قدرت از مشخصه‌های ذاتی این سیستم‌ها بوده و وقوع آنها در سیستم اجتناب‌ناپذیر است [۱]. این نوسانات مادامی که در زمان مناسبی میرا شوند برای شبکه قدرت قابل قبول است. سیستم‌های قدرت به خاطر اثر متقابل اجزای مختلف آن نسبت به یکدیگر مدهای نوسانی متعددی دارند [۲] و [۳]. از نظر کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری کنترل میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای زمانی که برای یک خط انتقال خاص به کار گرفته می‌شود بسیار مهم است [۴] و [۵]. بنابراین در مقایسه با واحدهای مجهز به PSS^۱، ادوات FACTS^۲ انتخاب بهتری برای میرا کردن مدهای نوسانی بین ناحیه‌ای به علت قرارگرفتن در خطوط انتقال و کنترل و تنظیم پارامترهای سیستم انتقال هستند [۶] و [۷].

در سال‌های اخیر کنترل‌کننده‌های تلفیقی اضافی^۳ (SMC) برای ادوات FACTS در نظر گرفته شده تا میرا کردن نوسانات بین ناحیه‌ای

این مقاله در تاریخ ۱۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۱۵ اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

میثم زمانی، مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، (email: zamani_proj@yahoo.com).

غضنفر شاهقلیان (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، (email: shahgholian@iaun.ac.ir).

1. Power System Stabilizer
2. Flexible AC Transmission Line
3. Supplementary Modulation Controllers

4. Heuristic Methods

5. Simulated Annealing

6. Evolutionary Programming

7. Particle Swarm Optimization

8. Static VAR Compensator

9. Thyristor Controlled Series Compensator

10. High Voltage Direct Current

11. Static Synchronous Series Compensator

میرایی، پایداری سیگنال گذرا و سیگنال کوچک افزایش یافته و قابلیت ژنراتور سنکرون و DFIG تحت اغتشاشات شدید نیز با بهینه‌سازی هماهنگ پارامترهای کنترل‌کننده‌ها افزایش یافته است. در [۳۶] برای میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای از طراحی پایدارساز سیستم قدرت ناحیه گسترده مبتنی بر اندازه‌گیری سنکروفازورها (WAPSS) استفاده شده است. پارامترهای WAPSS با الگوریتم Jaya تنظیم شده است. نتایج حاصل دستیابی به عملکرد مطلوب توسط WAPSS مبتنی بر JA در ارتباط با میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای را نشان می‌دهد. در [۳۷] مشکل اصلاح PSS که به عنوان یک مشکل بهینه‌سازی چندهدفه فرموله شده است با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک حل شده است. روش پیشنهادی به شبکه چندماشینه اعمال شده و شبیه‌سازی‌های غیر خطی برای تحلیل پایداری سیستم قدرت انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی حوزه زمانی نیز نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده توانسته میرایی خوبی به عمل آورد.

در این مقاله با ارائه یک تابع هدف جدید اقدام به بهینه‌سازی هماهنگ پارامترهای PSS، SVC و TCSC به منظور میرایی مدهای بین ناحیه‌ای شده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و با روش مانده‌ها مقایسه گردیده است. در این روش به منظور افزایش اثربخشی الگوریتم بهینه‌سازی، ناحیه بهینه‌سازی به ۳ قسمت تقسیم‌بندی شده و ضرایب وزنی تخصیص داده شده به هر قطب بر اساس موقعیت آن تعیین می‌شود. در فرایند بهینه‌سازی هر قطب که در شرایط بحرانی‌تری باشد بر اساس ضرایب وزنی تخصیص داده شده بیشتر هدف الگوریتم بهینه‌سازی قرار می‌گیرد و مدهایی که دارای میرایی بهتری هستند کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. از آنجایی که موقعیت قرارگرفتن این ادوات به شدت بر روی نتایج بهینه‌سازی تأثیرگذار خواهد بود و همچنین در بیشتر مراجع موقعیت این ادوات یا ثابت در نظر گرفته شده یا با توجه به روش مانده‌ها تعیین می‌شود، در این تحقیق موقعیت این ادوات به صورت یک متغیر عدد صحیح در فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. بنابراین در این بهینه‌سازی اثر متقابل این ادوات و PSS در نظر گرفته شده است. برای بررسی روش پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی در یک سیستم قدرت ۸۶باسه ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی ادوات FACTS

در این مقاله دو نوع مختلف ادوات FACTS یعنی TCSC و SVC استفاده شده است. مشابه مدل‌سازی سیستم قدرت، مدل‌سازی ادوات FACTS شامل دو بخش عمده، دینامیک‌های سیگنال کوچک خود ادوات FACTS و اثر آنها روی پخش بار سیستم است. مدل معمول TCSC شامل یک TCR به صورت موازی با یک خازن سری ثابت است [۳۸]. همچنین انواع مختلفی از مدل‌های SVC وجود دارد که در این تحقیق مدل SVC شامل یک TCR به صورت موازی با یک TSC در نظر گرفته شده است [۳۹]. ادوات FACTS روی خطوط انتقال و برای کنترل و تنظیم پارامترهای سیستم انتقال نصب می‌شوند. روش میرایی به کار گرفته شده توسط ادوات FACTS را می‌توان به عنوان مدولاسیون پارامتر سیستم در نظر گرفت (توان اکتیو، توان راکتیو، ولتاژ و غیره). ادوات FACTS در حالت ایده‌آل مصرف‌کننده یا تولیدکننده توان اکتیو نیستند و بنابراین برای این ادوات بیشتر توان ظاهری نامی مطرح است. افزایش این توان می‌تواند باعث افزایش پایداری بیشتر شبکه شود. بنابراین برای TCSC ماکسیمم توان ظاهری بر اساس ماکسیمم توان ظاهری خطی که بر روی آن نصب شده است تعیین می‌شود و برای

بهینه‌سازی سیستم استفاده شده است. در [۲۷] نیز با استفاده از SVC برای افزایش میرایی‌های بین ناحیه‌ای روشی پیشنهاد گردیده است. نویسندگان در [۲۸] و [۲۹] از سه کنترل‌کننده PSS، SVC و TCSC به صورت هم‌زمان به منظور افزایش پایداری و میرایی نوسانات غیر خطی سیستم چندماشینه استفاده نموده‌اند. پارامترهای کنترل‌کننده‌ها با استفاده از الگوریتم AVURPSO بهینه شده تا عملکرد سیستم کنترل طراحی شده بهبود یابد و پایداری و میرایی نوسانات سیستم قدرت را افزایش دهد. طرح ارائه‌شده در برابر خطاهای اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین ناپایدار بوده ولی با به کارگیری هم‌زمان سه کنترل‌کننده پایداری سیستم بهبود یافته و نوسانات آن میرا گردیده است. در [۳۰] یک طراحی هماهنگ بین PSS و کنترل‌کننده پخش توان یکنواخت (UPFC) با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. موضوع به حالت مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی شده تا بتواند ضرایب میرایی مدهای الکترومکانیکی را حداکثر نماید به طوری که تعداد متعددی از UPFCها و PSSها با همدیگر مطابقت نمایند. این روش در شبکه به هم پیوسته ۱۶ماشینه و ۶۸باسه نیوانگلند و نیویورک مورد آزمایش قرار گرفته و تأثیرگذاری آن بر میرایی نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای اثبات شده است. در [۳۱] طراحی هماهنگ بین کنترل‌کننده‌های PSS، SVC و TCSC انجام شده است. ضرایب کنترلی خطی شده سیستم قدرت به طور هم‌زمان و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌اند. بهینه‌سازی به صورت تابع بیشینه بوده و ضرایب کلی میرایی‌های سیستم را بهینه می‌نماید و در نهایت عملکرد کنترل‌کننده‌ها به وسیله تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی‌های حوزه زمان مورد آزمایش قرار گرفته و بهبود میرایی سیستم تحت آزمایش نشان داده شده است. در [۳۲] به طور هم‌زمان پارامترهای SVC و TCSC را با استفاده از الگوریتم MOSAEP بهینه‌سازی نموده‌اند تا قابلیت انتقال توان و پایداری ولتاژ بهبود یابد. بهبود عملکرد پایداری گذرای سیستم قدرت به وسیله هماهنگی SVC و TCSC در یک سیستم قدرت ۹باسه و ۳ماشینه مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که کنترل‌کننده‌های هماهنگ طراحی‌شده SVC و TCSC دارای مزیت‌های عملکردی پایداری ولتاژ در مقایسه با پارامتر کنترلی ارائه‌شده است. در [۳۳] طراحی هماهنگ کنترل‌کننده‌های PSS-POD با استفاده از الگوریتم PSO در یک سیستم دوناحیه‌ای و چهارماشین انجام شده به طوری که باعث افزایش نسبت و ضرایب میرایی شده است. همچنین شبیه‌سازی حوزه زمان سیستم چندماشینه تحت شرایط بارگذاری متفاوت و اغتشاشات نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های هماهنگ PSS-POD سریعاً نوسانات الکترومکانیکی را میرا ساخته و دارای حداقل بالازدگی و پایین‌زدگی هستند. در [۳۴] با استفاده از طراحی کنترل‌کننده حلقه بسته اقدام به میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای شده است. این روش مبتنی بر شکل‌دهی تابع تبدیل حلقه باز در دیگرام نایکوئیست است. تفاوت بین تابع تبدیل حلقه باز مورد انتظار و حلقه باز واقعی حداقل‌سازی شده است. کنترل‌کننده طراحی‌شده بر روی یک سیستم چهارماشینه و دوناحیه‌ای با DFIG^۲ و SVC اعمال شده و نتایج نشان می‌دهند که میراسازی مناسبی از نوسانات خط انتقال قدرت تحت شرایط متفاوت باد و نقطه کار متفاوت حاصل شده است. در [۳۵] تأثیر بهینه‌سازی پارامترهای PSS و SSSC بر پایداری سیستم قدرت با استفاده از شبکه تست ۱۴باسه IEEE تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهند که نوسانات در سیستم به حداقل شده و

1. Unified Power Flow Controller
2. Double Fed Induction Generator

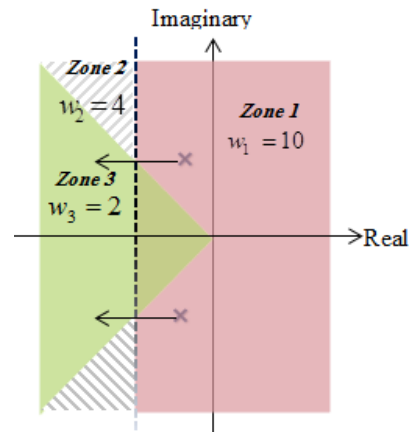
سیستم قدرت و K_{FACTSj} ، T_{vj} و T_{vj} برای ادوات FACTS است. در این پارامترها مقایر i و j به ترتیب تعداد پایدار ساز سیستم قدرت و ادوات FACTS را بیان می‌کنند. هدف از تنظیم هم‌زمان پارامترها بهینه‌شدن عملکرد میرایی است. این عمل را می‌توان با مینیمم کردن تابع هدف تعریف شده با به دست آوردن مینیمم مکان مورد نظر برای حالت بحرانی انجام داد. میرایی یک مد نوسانی برابر $\xi = -\sigma/(\sigma^2 + \omega^2)^{0.5}$ است. بنابراین قسمت حقیقی مد نوسانی به طرف نیمه چپ صفحه مختلط حرکت می‌کند. اگر فرکانس نوسان ثابت نگه داشته شود نرخ میرایی آن افزایش می‌یابد. تابع هدف مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر است

$$\min f(z) = \sum_{i=1}^n w_i (\sigma_{des} - \sigma_i)^2 \quad (3)$$

$$\text{s.t.} : \begin{cases} 0 < T_{jk} < T_{j\max} \\ 0 < K_p < K_{p\max} \end{cases}$$

که در آن σ_i جزء حقیقی مقادیر ویژه بحرانی، σ_{des} مقدار مطلوب جزء حقیقی مقادیر ویژه بحرانی و z نیز متغیر بهینه‌سازی است که شامل یک عدد صحیح برای شماره باس یا خط و یک سری اعداد پیوسته برای پارامترهای PSS و ادوات FACTS است. تابع $f(z)$ زمانی که بخش حقیقی مد نوسانی σ_i در قسمت حقیقی مورد انتظار σ_{des} باشد می‌تواند به حداقل برسد. محدودیت‌ها برای ملاحظات عملی اعمال می‌شود. ثابت‌های زمانی برای این که یافتن پاسخ بهینه آسان‌تر شود محدود می‌شوند و بهره کنترل‌کننده جهت جلوگیری از تقویت نویز و اشباع کنترل‌کننده‌ها به مقدار ۵۰ محدود می‌شود. ضرایب وزنی به صورتی تعیین می‌شوند که عملگر بهینه‌ساز بیشتر به تغییر مکان بخش حقیقی مد با میرایی پایین تمرکز کند. بخش موهومی به سه ناحیه تقسیم می‌گردد که در شکل ۱ نشان داده شده است. بخش اول به مدهای بحرانی مربوط می‌شود که مقادیر ویژه آنها باید به سمت چپ و با اولویت بالا انتقال داده شود. بخش دوم مربوط به مدهای نوسان‌پذیر نسبتاً متفرق مربوط می‌شود و منطقه سوم به مدهای میراشده‌ای اختصاص دارد که نرخ میرایی آنها بیش از ۲۰٪ است. برای مدهایی که در منطقه سه قرار دارند کنترل بیشتری لازم نیست که مقدار آنها به سمت چپ منتقل شوند. این ضرایب وزنی اهمیت مدهای بحرانی‌تر را در عملکرد تابع برجسته‌تر می‌کند و از تلاش عملگر بهینه‌ساز جهت کنترل جاهایی که لازم نیست جلوگیری به عمل می‌آورد.

در این الگوریتم مقدار حقیقی مطلوب نیز بر اساس قرارگرفتن در هر ناحیه تعیین می‌شود. این مقادیر توسط طراح تعیین و قرار داده می‌شوند. در این مقاله مقدار حقیقی مطلوب یا σ_{des} برای ناحیه ۱، ۱- و برای ناحیه ۲ و ۳ مقدار ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور کاهش محاسبات مدهای با قسمت حقیقی بزرگ‌تر از ۱/۵- در داخل تابع هدف قرار داده نمی‌شود و فقط در انتهای هر نسل از الگوریتم ژنتیک ضریب میرایی تمامی قطب‌های هر ژن بررسی می‌شود. در صورتی که این ضریب میرایی حداقل برای یکی از ژن‌های یک نسل کمتر از مقدار مطلوب باشد الگوریتم ژنتیک، متوقف و در غیر این صورت نسل بعدی ایجاد خواهد شد. روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. یکی از مواردی که در تابع هدف بالا به عنوان ورودی به سیستم بهینه‌سازی اعمال می‌شود، تعیین باس مناسب جهت نصب SVC و همچنین تعیین خط مناسب جهت نصب TCSC است که به صورت یک عدد صحیح به الگوریتم ژنتیک اعمال خواهد شد.



شکل ۱: مناطق مختلف برای تخصیص ضرایب وزنی.

SVC نیز ماکسیمم توان ظاهری باس در نظر گرفته می‌شود.

۳- بیان مسئله

تابع تبدیل سیستم پایدار ساز سیستم قدرت عبارت است از [۴۰] و [۴۱]

$$H_{PSS}(s) = K_{PSS} \frac{T_W s}{1 + T_W s} \cdot \frac{1 + T_V s}{1 + T_V s} \cdot \frac{1 + T_F s}{1 + T_F s} \quad (1)$$

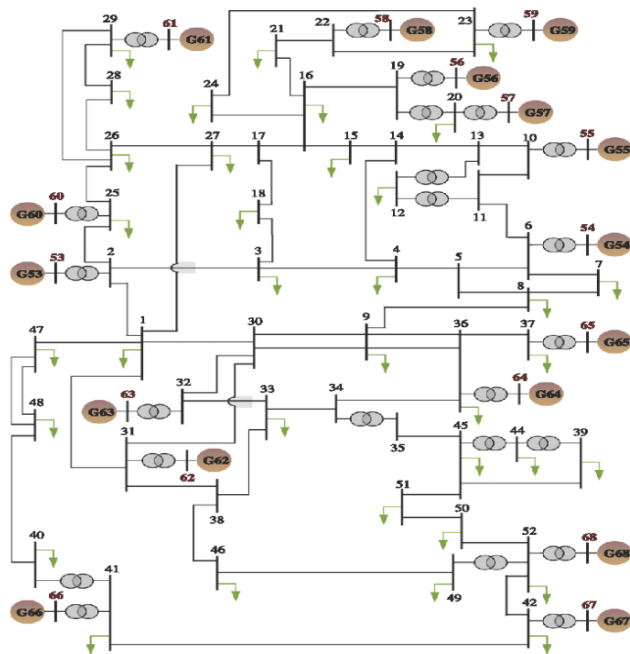
تابع تبدیل شامل یک فیلتر پاکساز به منظور حذف خطای حالت دایم، یک بلوک بهره تقویت‌کننده و دو بلوک پیش‌فاز-پس‌فاز است. این بلوک یک مشخصه پیش‌فازی به منظور جبران پس‌فازی بین سیستم تحریک و گشتاور الکتریکی ژنراتور فراهم می‌کند که می‌تواند برای میرایی مدهای محلی بسیار مناسب باشد [۴۲]. همچنین تابع تبدیل سیستم ادوات FACTS به صورت رابطه زیر است

$$H_{FACTS}(s) = K_{FACTS} \frac{T_W s}{1 + T_W s} \left(\frac{1 + T_V s}{1 + T_V s} \right)^2 \quad (2)$$

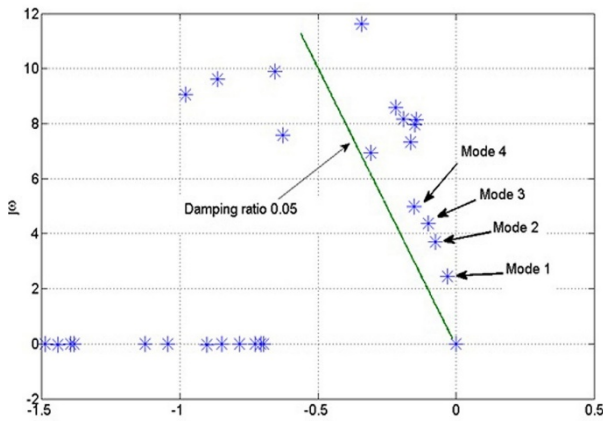
تابع تبدیل ادوات FACTS نیز شامل یک فیلتر پاکساز، یک بلوک بهره تقویت‌کننده و یک بلوک جبران فاز است. در این تابع تبدیل و تابع تبدیل PSS پارامتر T_W معمولاً از پیش تعیین شده است و در فرایندهای بهینه‌سازی اثری ندارند. در روش تنظیم هماهنگ بر مبنای بهینه‌سازی عملکرد بهینه کنترل‌کننده‌ها با کمینه یا بیشینه‌کردن یک تابع هدف به دست می‌آید. تابع هدف به صورتی باید تعریف شود که کمینه‌شدن آن متناظر با کسب عملکرد بهینه مجموعه کنترل‌کننده‌ها باشد. حل مسئله بهینه‌سازی در این مقاله با الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد. الگوریتم ژنتیک در حل مسایل بهینه‌سازی بزرگ عملکرد کندی دارد. از طرفی با توجه به این که در هر بار بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک جواب‌های متفاوتی به دست می‌آید، لازم است که الگوریتم بهینه‌سازی چندین بار اجرا شود تا یک جواب مطلوب از بین جواب‌های خروجی انتخاب شود. ولی با توجه به این که ما در تعیین پارامترهای مناسب برای کنترل‌کننده‌ها محدودیت زمانی نداریم کندی حل با الگوریتم ژنتیک مشکل خاصی در مطالعات ایجاد نمی‌کند.

۴- تابع هدف

هدف اصلی تابع هدف در نظر گرفته شده برای الگوریتم ژنتیک حداقل ۵٪ میرایی برای تمامی مدها است. در صورتی که $\xi_i \geq 5\%$ باشد فرایند بهینه‌سازی به اتمام می‌رسد. پارامترهایی که در این بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود شامل K_{PSSi} ، T_{Vi} ، T_{Fi} ، T_{Vi} و T_{Fi} برای پایدار ساز



شکل ۳: سیستم ۶۸ باسه ۱۶ ماشین.



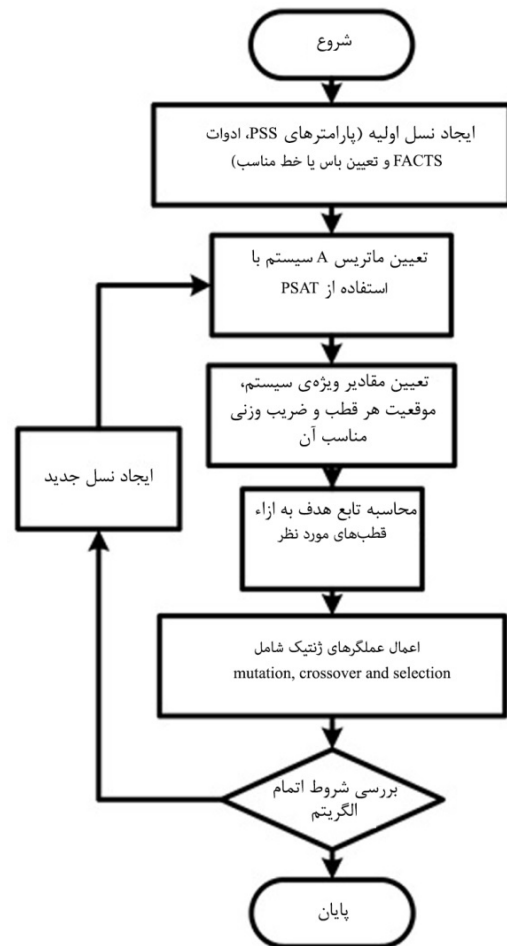
شکل ۴: مکان مدهای سیستم قبل از بهینه‌سازی و نصب ادوات FACTS.

شبیه‌سازی بسیاری از محدودیت‌ها شامل حداکثر و حداقل توان ورودی به ژنراتور توسط توربین، حداکثر و حداقل ولتاژ خروجی تحریک و همچنین ماکسیمم توان انتقالی از خطوط در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی یک سری خطا ایجاد شده و بعضی از خطوط نیز از مدار خارج شده است، بنابراین ممکن است بسیاری از خطوط انتقال به ماکسیمم توان خود نزدیک شوند و در نتیجه باعث ایجاد تراکم^۱ شود. بنابراین این وضعیت با در نظر گرفتن ماکسیمم توان انتقالی خط در نظر گرفته شده است.

۶-۱ طراحی هماهنگ برای شبکه ۶۸ باسه IEEE

در این قسمت طراحی هماهنگ PSS و ادوات FACTS برای شبکه ۶۸ باسه استاندارد IEEE ارائه خواهد شد و کلیه نتایج با طراحی کلاسیک به روش مانده‌ها مقایسه می‌شود. در این شبکه کلیه ژنراتورها به جز ژنراتور مبنای G13 دارای تنظیم‌کننده ولتاژ (AVR) و PSS می‌باشند که از فیدبک توان اکتیو و ولتاژ باس برای TCSC و SVC استفاده می‌شود. شکل ۴ مکان صفر و قطب‌های سیستم را قبل از بهینه‌سازی و نصب

1. Congestion



شکل ۲: روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی.

جدول ۱: مدهای بین ناحیه‌ای و میرایی این مدها.

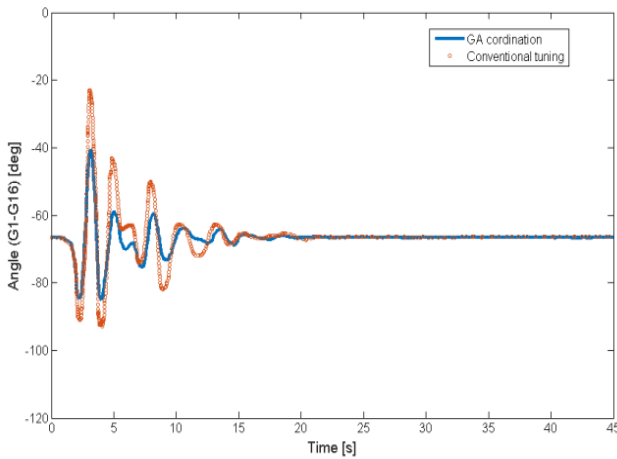
مُد بین ناحیه‌ای	$\sigma \pm j\omega$	$-\frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + \omega^2}}$	$\frac{\omega}{2\pi}$
مُد یک	$-0.0347 \pm j 2.4208$	۰.۱۴۳	۰.۳۸۵۳
مُد دو	$-0.0663 \pm j 3.7208$	۰.۱۷۸	۰.۵۹۲۲
مُد سه	$-0.1020 \pm j 4.3134$	۰.۲۳۶	۰.۶۸۶۵
مُد چهار	$-0.1390 \pm j 4.9806$	۰.۲۷۹	۰.۷۹۲۷

۵- سیستم مورد مطالعه

برای بررسی روش پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی در یک سیستم قدرت ۶۸ باسه IEEE ارائه شده است. شکل ۳ ساختار این شبکه را نشان می‌دهد [۴۳] و [۴۴]. مدهای بین ناحیه‌ای سیستم قدرت در جدول ۱ آمده است.

۶- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله حالت‌های مختلف طراحی هماهنگ با هم مقایسه شده که یکی از روش‌های طراحی، روش مانده‌ها است. در این روش، بر اساس پایداری لیاپانوف برای این که یک سیستم حول نقطه تعادل پایدار باشد، باید همه مقادیر ویژه ماتریس حالت سیستم، مقادیر حقیقی منفی داشته باشند. این مفهوم ایده اصلی روش طراحی کنترل‌کننده است. روش دوم طراحی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با روش مانده‌ها مقایسه شده است، روش تنظیم هماهنگ است. در انجام



شکل ۶: اختلاف زاویه ژنراتور ۱ و ۱۶ در اثر خطای شماره یک.

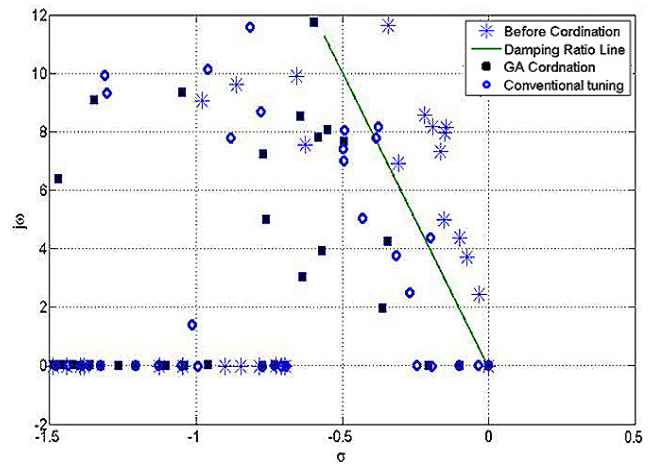
جدول ۴: پارامترهای PSS بعد از بهینه‌سازی به روش هماهنگ.

PSS number	Tw	KPSS	T1	T2	T3	T4
G1	۱۰	۲۲,۲۰۸۵	۰,۰۹۰۸	۰,۵۹۵۳	۰,۹۵۸۴	۰,۳۵۰۱
G2	۱۰	۱۱,۷۸۰۵	۰,۶۳۴۹	۰,۲۲۹۱	۰,۸۰۱۴	۰,۵۸۸۹
G3	۱۰	۳۷,۷۸۴۵	۰,۸۸۶۹	۰,۱۵۷۴	۰,۶۶۹۱	۰,۶۴۵۲
G4	۱۰	۳۸,۳۲۵۵	۰,۴۳۷۶	۰,۹۱۹۲	۰,۸۵۵۲	۰,۵۱۴۴
G5	۱۰	۱۳,۸۷۱۵	۰,۲۷۸۸	۰,۸۷۸۹	۰,۲۹۹۰	۰,۴۶۳۲
G6	۱۰	۰,۶۲۷۵	۰,۰۳۲۲	۰,۹۸۰۱	۰,۰۲۲۴	۰,۲۷۹۹
G7	۱۰	۱۸,۹۴۸۳	۰,۴۳۹۱	۰,۷۰۸۷	۰,۶۷۵۴	۰,۰۱۴۰
G8	۱۰	۴,۲۶۵۰	۰,۴۶۳۹	۰,۹۶۶۲	۰,۴۵۱۹	۰,۸۷۶۷
G9	۱۰	۲۳,۵۴۶۹	۰,۳۰۷۳	۰,۱۶۱۶	۰,۹۸۱۴	۰,۶۰۲۰
G10	۱۰	۱۶,۵۵۸۴	۰,۸۷۸۳	۰,۷۶۵۹	۰,۶۲۴۲	۰,۸۷۲۱
G11	۱۰	۳۳,۱۲۲۱	۰,۷۲۴۸	۰,۱۳۹۴	۰,۵۹۳۶	۰,۸۳۲۸
G12	۱۰	۳۹,۶۹۰۳	۰,۵۶۵۳	۰,۰۷۰۹	۰,۰۸۸۹	۰,۸۸۳۳
G13	-	-	-	-	-	-
G14	۱۰	۳۹,۲۱۵۸	۰,۹۱۱۷	۰,۰۴۸۸	۰,۹۳۸۱	۰,۸۹۹۷
G15	۱۰	۱۶,۰۱۲۴	۰,۲۱۶۷	۰,۶۸۲۵	۰,۳۸۹۶	۰,۴۷۱۵
G16	۱۰	۲۹,۸۲۲۹	۰,۷۳۰۴	۰,۱۹۰۶	۰,۳۲۷۸	۰,۶۶۵۹

نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود تمامی قطب‌های سیستم به بعد از خط نرخ میرایی ۵ درصد منتقل شده است. جدول ۳ و ۴ مقادیر نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. به منظور بررسی پارامترهای به دست آمده یک خطا در سیستم قدرت به مدت ۸۰ میلی‌ثانیه ایجاد می‌شود. این خطا در لحظه یک ثانیه ($t=1$) ایجاد می‌شود. در این خطا یک اتصال کوتاه در باس ۴۲ ایجاد می‌شود و خط ۴۱-۴۲ بعد از ۸۰ میلی‌ثانیه خارج می‌شود. شکل ۶ اختلاف زاویه بین G1 و G16 را برای دو روش طراحی برای خطای ایجاد شده نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده در روش هماهنگ میرایی سیستم قدرت خیلی بهتر است.

۳-۶ طراحی هماهنگ برای SVC

برای انتخاب باس مناسب برای نصب SVC به علت بالابودن تعداد باس‌ها از روش مانده‌ها تعدادی از باس‌ها انتخاب می‌شود و سپس این تعداد باس در الگوریتم ژنتیک به عنوان متغیر عدد صحیح در نظر گرفته می‌شود. جدول ۵ باس‌ها و همچنین مقدار مانده‌های بین ناحیه‌ای را نشان می‌دهد. در انتها نیز مشخص می‌شود که بهترین باس، باس ۵۰ برای نصب SVC است. شکل ۷ نیز مکان قطب‌های سیستم را قبل و بعد



شکل ۵: مکان مدهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی (نصب TCSC).

جدول ۲: مدهای سیستم بعد از نصب کنترل‌کننده‌های متفاوت.

مانده‌های نرمالیزه شده				
خط	مُد یک	مُد دو	مُد سه	مُد چهار
۵۲-۴۲	۰,۰۴۷۵	۰,۰۱۲۰	۰,۰۳۰۵	۰,۰۱۴۶
۴۲-۴۱	۰,۰۰۲۳	۱	۰,۹۵۷۳	۰,۹۵۵۱
۵۳-۴۷	۰,۰۱۸۴	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۱	۰,۰۰۰۴
۵۳-۵۴	۰,۱۲۸۸	۰,۰۳۵۸	۰,۷۷۲۶	۰,۰۰۵۵
۵۳-۲۷	۰,۰۰۸۶	۰,۰۰۲۴	۰,۰۵۱۵	۰,۰۰۰۴
۴۶-۴۹	۰,۰۴۳	۰,۰۳۴۹	۰,۰۰۷۹	۰,۰۳۶۷
۶۰-۶۱	۰,۱۲۱۰	۰,۰۵۵۶	۱	۰,۰۱۱۱
۵۰-۵۱	۱	۰,۳۶۹۹	۰,۵۵۲۵	۱

جدول ۳: پارامترهای TCSC بعد از بهینه‌سازی به روش هماهنگ.

FACTS controller	Tw	KFACTS	Tlead	Tlag
TCSC	۱۰	۳,۹۷۴۰	۰,۱۵۲۱	۰,۸۱۱۸

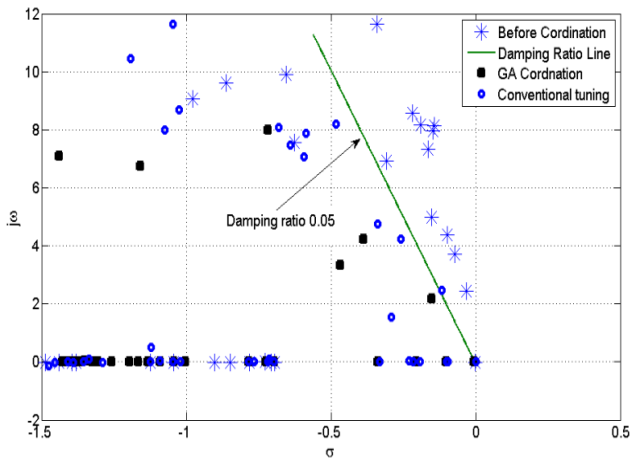
ادوات FACTS نشان می‌دهد. مدهای بین ناحیه‌ای در این شکل نیز مشخص شده است. هدف از نصب ادوات FACTS نیز افزایش میرایی این مدها است. همچنین قابل ذکر است که برای این شبکه شرایط سخت‌تری برای بهینه‌سازی ایجاد شده و لذا نرخ میرایی ۵٪ در نظر گرفته شده است.

۲-۶ طراحی هماهنگ برای TCSC

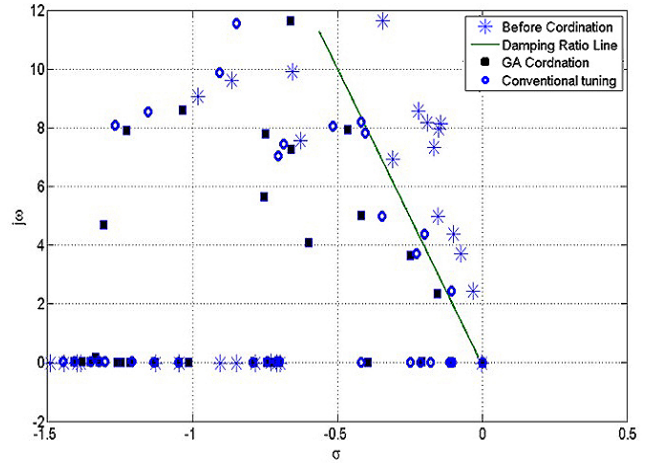
در فرایند بهینه‌سازی مکان نصب TCSC نیز به عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. در این قسمت برای کاهش زمان فرایند بهینه‌سازی تعدادی از خطوط بر اساس مانده‌های سیستم انتخاب می‌شود. در جدول ۲ تعدادی از مکان‌های نصب TCSC همراه با مقدار نرمالیزه شده مانده نشان داده شده است.

از میان مدهای به دست آمده برای کلیه خطوط، خطوط فوق به عنوان متغیر بهینه‌سازی انتخاب می‌شود که بعد از فرایند بهینه‌سازی خط ۵۱-۵۰ به عنوان خط مناسب برای نصب TCSC تعیین می‌گردد.

همچنین بر اساس روش مانده‌ها با توجه به این که این خط برای مد یک و چهار نیز دارای مقدار یک است در روش معمولی نیز از همین خط برای نصب TCSC استفاده شده ولی پارامترهای آن بر اساس روش مانده‌ها به دست آمده است. شکل ۵ قطب‌های سیستم را قبل و بعد از نصب TCSC و بهینه‌سازی به دو روش کلاسیک و الگوریتم ژنتیک



شکل ۹: مکان مدهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی (نصب SVC و TCSC).



شکل ۷: مکان مدهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی (نصب SVC).

جدول ۶: پارامترهای PSS بعد از بهینه‌سازی به روش هماهنگ.

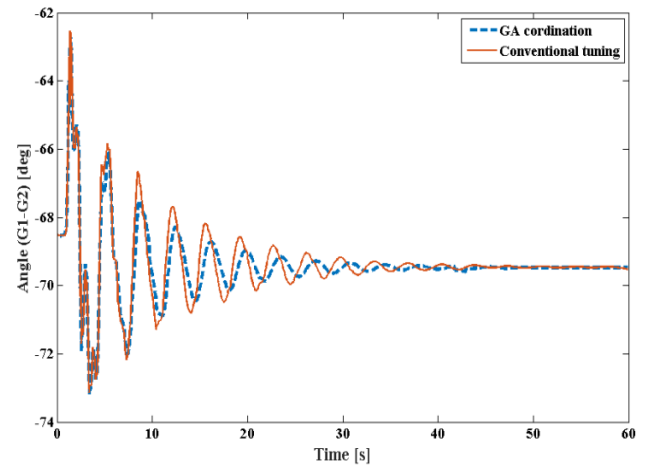
PSS number	T_w	K_{PSS}	T_1	T_r	T_r	T_r
G1	۱۰	۱۰,۲۶۵۳	۰,۴۴۲۴	۰,۸۱۸۹	۰,۷۵۰۸	۰,۲۳۵۱
G2	۱۰	۷,۶۷۴۶	۰,۲۷۰۳	۰,۲۰۷۲	۰,۱۸۳۲	۰,۵۳۱۲
G3	۱۰	۳۶,۹۹۵۰	۰,۴۳۶۰	۰,۶۴۷۶	۰,۶۳۷۲	۰,۴۸۱۲
G4	۱۰	۳۱,۰۳۰۷	۰,۲۹۲۴	۰,۰۰۴۸	۰,۹۵۳۴	۰,۹۴۳۱
G5	۱۰	۳۲,۸۵۸۵	۰,۱۳۵۴	۰,۳۰۸۷	۰,۸۳۰۶	۰,۲۳۲۷
G6	۱۰	۳۳,۹۹۹۵	۰,۲۲۷۲	۰,۲۸۶۱	۰,۲۷۴۷	۰,۹۹۴۲
G7	۱۰	۱۹,۵۴۵۲	۰,۲۲۱۵	۰,۱۸۳۰	۰,۹۷۷۸	۰,۳۱۱۱
G8	۱۰	۳۷,۹۸۳۹	۰,۶۹۴۴	۰,۲۵۵۹	۰,۵۵۴۵	۰,۶۴۳۷
G9	۱۰	۲۶,۴۱۷۲	۰,۶۱۵۰	۰,۰۵۳۳	۰,۹۹۷۲	۰,۹۲۱۲
G10	۱۰	۱۴,۹۵۹۷	۰,۸۲۴۵	۰,۱۴۵۷	۰,۲۶۴۰	۰,۷۱۴۱
G11	۱۰	۱۲,۷۷۶۲	۰,۸۷۴۲	۰,۴۰۹۰	۰,۰۶۹۷	۰,۳۳۴۵
G12	۱۰	۳۹,۶۳۵۳	۰,۸۸۳۶	۰,۶۰۲۹	۰,۹۴۲۴	۰,۵۴۹۵
G13	-	-	-	-	-	-
G14	۱۰	۳۷,۲۲۴۸	۰,۶۷۶۰	۰,۲۱۵۴	۰,۷۲۱۶	۰,۵۲۰۳
G15	۱۰	۲۱,۴۲۸۷	۰,۸۳۱۶	۰,۴۲۵۲	۰,۹۴۴۱	۰,۷۲۰۴
G16	۱۰	۲۲,۰۸۵۵	۰,۱۱۹۵	۰,۱۷۴۶	۰,۹۴۳۱	۰,۶۰۵۴

جدول ۷: پارامترهای SVC بعد از بهینه‌سازی به روش هماهنگ.

FACTS controller	T_w	K_{FACTS}	T_{lead}	T_{lag}
SVC	۱۰	۷,۰۹	۰,۹۳۰۱	۰,۸۳۱۹

۶-۴ طراحی هماهنگ برای SVC و TCSC به طور هم‌زمان

در این حالت به صورت هم‌زمان پارامترهای PSS، SVC و TCSC در فرایند بهینه‌سازی قرار داده می‌شوند. البته شایان ذکر است که باس و خط مورد نظر به عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته نشده‌اند زیرا در قسمت قبل مکان بهینه برای هر کدام از ادوات FACTS بر اساس مقدار مانده‌ها و همچنین بر اساس روش تنظیم هماهنگ طراحی شده است. شکل ۹ مکان قطب‌های سیستم را قبل و بعد از بهینه‌سازی نشان می‌دهد. همچنین جدول‌های ۸ و ۹ پارامترهای بهینه‌سازی شده PSS، TCSC و SVC را نشان می‌دهد. به منظور بررسی کارایی دینامیکی سیستم همانند دو حالت قبل یک خط ایجاد می‌شود. این خط در لحظه $t = 1$ ثانیه ایجاد می‌شود و بعد از ۸۰ میلی‌ثانیه با حذف خط مورد نظر برطرف



شکل ۸: اختلاف زاویه ژنراتور یک و دو در اثر خطای شماره یک.

جدول ۵: مدهای سیستم بعد از نصب کنترل‌کننده‌های متفاوت به روش هماهنگ.

Normalized residues				
Bus	مُد یک	مُد دو	مُد سه	مُد چهار
۲۷	۰,۰۱۶۳	۰,۰۱۹۴	۰,۱۵۲۷	۰,۰۰۳۵
۴۱	۰,۰۰۹۰	۰,۰۰۹۰	۰,۰۰۷۱	۰,۰۰۲۰
۴۲	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۰۱	۰,۰۰۱۵	۰,۰۰۲۶
۵۰	۰,۴۰۶۴	۱	۰,۴۹۳۷	۱
۵۱	۰,۰۵۸۵	۰,۸۶۶۹	۰,۱۳۶۹	۰,۹۶۴۳
۵۲	۰,۰۳۰۴	۰,۰۹۱۶	۰,۰۰۸۸	۰,۲۷۸۶
۵۳	۰,۰۳۸۳	۰,۳۶۹۵	۰,۴۲۹۶	۰,۰۸۱۱
۶۰	۰,۰۰۶۵	۰,۰۲۶۳	۰,۰۲۰۶۹	۰,۰۱۳۲
۶۱	۱	۰,۰۵۲۴	۱	۰,۶۰۸۰

از بهینه‌سازی نشان می‌دهد. همچنین جدول‌های ۶ و ۷ نیز پارامترهای PSS و SVC را بعد از بهینه‌سازی به روش طراحی هماهنگ بیان می‌کند. در این حالت نیز یک خطا در سیستم ایجاد می‌شود تا کارایی سیستم کنترلی در شرایط خطا نیز مورد بررسی قرار گیرد. این خطا در لحظه $t = 1$ ثانیه رخ می‌دهد و بعد از ۸۰ میلی‌ثانیه برطرف می‌گردد. در این خطا یک اتصال کوتاه سه‌فاز در باس ۵۳ ایجاد می‌شود و خط ۴۷-۵۳ بعد از ۸۰ میلی‌ثانیه از مدار خارج می‌شود. شکل ۸ تغییرات زاویه ژنراتور G1-G2 را برای دو حالت در شرایط خطا نشان می‌دهد. همان‌طور که در این حالت نیز نشان داده شده است طراحی هماهنگ باز هم توانسته عملکرد بهتری نسبت به روش معمولی داشته باشد.

روش ارائه‌شده به خوبی مشخص گردیده است. همچنین با توجه به نتایج ارائه‌شده استفاده از TCSC برای میرایی مدهای بین ناحیه‌ای بهتر از SVC است و در صورت استفاده از SVC و TCSC به صورت هم‌زمان و تنظیم هماهنگ پارامترهای کنترلی و مکان آنها با پایدارساز سیستم قدرت می‌تواند نتیجه بهتری برای پایداری سیستم قدرت ارائه کند.

مراجع

[1] G. Shahgholian and A. Movahedi, "Coordinated control of TCSC and SVC for system stability enhancement using ANFIS method," *International Review on Modelling and Simulations*, vol. 4, no. 5, pp. 2367-2375, Oct. 2011.

[2] G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. 247, no. 935, pp. 529-551, Apr. 1955.

[3] Z. Liu, W. Yao, J. Wen, and S. Cheng, "Effect analysis of generator governor system and its frequency mode on inter-area oscillations in power systems," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 96, pp. 1-10, Mar. 2018.

[4] C. O. Maddela and B. Subudhi, "Robust wide-area TCSC controller for damping enhancement of inter-area oscillations in an interconnected power system with actuator saturation," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105, no. 1, pp. 478-487, Feb. 2019.

[5] K. Liao, Z. He, Y. Xu, G. Chen, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, "A sliding mode based damping control of DFIG for interarea power oscillations," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 258-267, Jan. 2017.

[6] G. Shahgholian, H. Hamidpour, and A. Movahedi, "Transient stability promotion by FACTS controller based on adaptive inertia weight particle swarm optimization method," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 57-70, Mar. 2018.

[7] S. Ranjbar, M. R. Aghamohammadi, and F. Haghjoo, "A new scheme of WADC for damping inter-area oscillation based on CART technique and Thevenine impedance," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 94, no. 1, pp. 339-353, Jan. 2018.

[8] M. M. Menezes, P. B. Araujo, and D. B. Valle, "Design of PSS and TCSC damping controller using particle swarm optimization," *J. of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 27, no. 5, pp. 554-561, Oct. 2016.

[9] ه. احمدی و ح. سیفی، "تحلیل احتمالاتی پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت و تنظیم هماهنگ PSSها و TCSC با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزرعه بادی،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، جلد ۱۲، شماره ۱، صص. ۲۴-۱۴، بهار ۱۳۹۳.

[10] L. H. Hassan, M. Moghavvemi, H. A. F. Almurib, and K. M. Muttaqi, "A coordinated design of PSSs and UPFC-based stabilizer using genetic algorithm," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 2957-2966, Feb. 2014.

[11] G. Shahgholian, A. Movahedi, and J. Faiz, "Coordinated design of TCSC and PSS controllers using VURPSO and genetic algorithms for multi-machine power system stability," *International J. of Control, Automation, and Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 398-409, Apr. 2015.

[12] G. Shahgholian, M. Maghsoodi, and A. Movahedi, "Fuzzy proportional integral controller design for thyristor controlled series capacitor and power system stabilizer to improve power system stability," *Revue Roumaine Des Sciences Techniques*, vol. 61, no. 4, pp. 418-423, Dec. 2016.

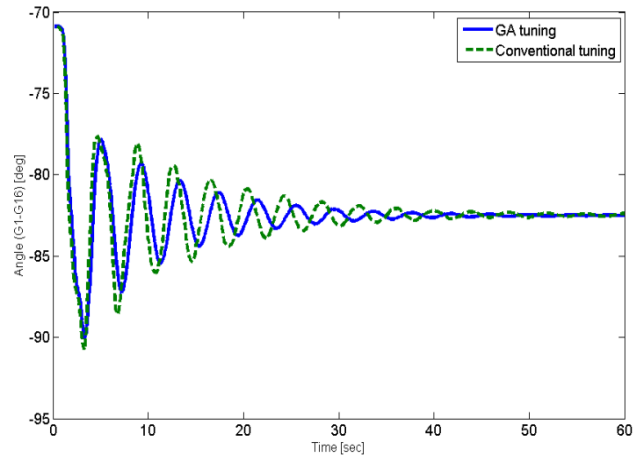
[13] T. Abdelouahed and Z. S. Ahmed, "Modeling and transient simulation of unified power," in *Proc. of the IEEE/ICEE*, 7 pp., Boumerdes, Algeria, 13-15 Dec. 2015.

[14] R. K. Pandey and N. K. Singh, "UPFC control parameter identification for effective power oscillation damping," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 269-276, Jul. 2009.

[15] M. A. Abido, "Robust design of multi-machine power system stabilizers using simulated annealing," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 15, no. 3, pp. 297-304, Sept. 2000.

[16] E. V. Fortes, P. B. Araujo, and L. H. Macedo, "Coordinated tuning of the parameters of PI, PSS and POD controllers using a Specialized Chu-Beasley's genetic algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 708-721, Nov. 2016.

[17] S. M. Alamelu and R. P. K. Devi, "Novel optimal placement of UPFC based on sensitivity analysis and evolutionary programming,"



شکل ۱۰: اختلاف زاویه ژنراتور ۱ و ۱۶ در اثر خطای شماره یک.

جدول ۸: پارامترهای PSS بعد از بهینه‌سازی به روش هماهنگ.

PSS number	T_w	K_{PSS}	T_1	T_2	T_3	T_4
G1	۱۰	۳۱,۳۵۸۶	۰,۷۶۰۶	۰,۳۳۳۱	۰,۰۸۴۸	۰,۴۸۰۹
G2	۱۰	۳۸,۲۹۳۲	۰,۹۴۶۸	۰,۱۶۹۹	۰,۶۰۰۲	۰,۹۱۶۶
G3	۱۰	۳۴,۵۴۸۴	۰,۵۲۴۴	۰,۲۱۲۵	۰,۲۴۱۳	۰,۲۰۵۲
G4	۱۰	۳۶,۴۴۸۸	۰,۹۰۷۰	۰,۴۰۳۶	۰,۴۰۶۳	۰,۳۷۹۱
G5	۱۰	۳۱,۸۲۷۱	۰,۳۷۰۱	۰,۲۸۷۰	۰,۴۸۹۶	۰,۸۱۸۶
G6	۱۰	۲۷,۴۲۶۵	۰,۴۱۶۹	۰,۷۲۲۲	۰,۶۹۵۶	۰,۱۵۸۸
G7	۱۰	۳۲,۲۴۷۳	۰,۹۹۴۶	۰,۸۵۶۶	۰,۳۷۰۰	۰,۴۲۴۱
G8	۱۰	۳۸,۹۰۴۵	۰,۴۳۱۹	۰,۷۷۲۳	۰,۵۰۰۰	۰,۳۲۱۷
G9	۱۰	۳۲,۷۷۹۵	۰,۸۸۴۶	۰,۳۵۲۷	۰,۶۵۰۲	۰,۷۴۴۹
G10	۱۰	۳۶,۹۵۸۸	۰,۸۷۸۱	۰,۲۴۴۵	۰,۶۵۰۷	۰,۳۹۳۵
G11	۱۰	۳۵,۵۶۵۶	۰,۲۸۸۱	۰,۴۳۱۳	۰,۱۰۶۰۵	۰,۱۰۴۶۲
G12	۱۰	۳۵,۰۷۱۷	۰,۹۲۸۷	۰,۱۶۳۱	۰,۲۴۴۱	۰,۵۰۱۰
G13	-	-	-	-	-	-
G14	۱۰	۳۸,۰۲۵۱	۰,۹۲۰۲	۰,۴۸۸۱	۰,۹۲۴۹	۰,۳۶۱۱
G15	۱۰	۳۶,۷۶۸۵	۰,۹۴۸۵	۰,۰۹۰۳	۰,۱۰۲۵۰	۰,۳۸۱۱
G16	۱۰	۳۵,۳۰۵۵	۰,۸۳۳۵	۰,۴۲۱۰	۰,۹۵۲۲	۰,۴۵۶۴

جدول ۹: پارامترهای SVC و TCSC بعد از بهینه‌سازی به روش هماهنگ.

FACTS controller	T_w	K_{FACTS}	T_{lead}	T_{lag}
SVC	۱۰	۰,۴۳۹۷	۰,۵۲۴۷	۰,۶۳۹۶
TCSC	۱۰	۰,۳۲۷۲	۰,۰۵۱۹	۰,۹۶۸۷

می‌گردد. در این خطا یک اتصال کوتاه در باس ۴۶ ایجاد می‌شود و خط ۴۶-۴۹ و ۵۳-۵۷ بعد از ۸۰ میلی‌ثانیه از مدار خارج می‌شود. شکل ۱۰ اختلاف زاویه G1-G16 را برای خطای ایجادشده نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی بر پایه تنظیم هماهنگ کنترل‌کننده‌های سیستم قدرت ارائه شده است. برای این منظور یک تابع هدف وزن‌دار تعریف شده و ضرایب وزنی به فرمی تعیین شده‌اند که عملگر بهینه‌ساز بیشتر به تغییر مکان بخش حقیقی مد با میرایی پایین تمرکز کند. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تابع هدف استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی توانایی روش پیشنهادی در میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای را نشان می‌دهند. روش پیشنهادی با روش مانده‌ها مقایسه شده و اثربخشی

- [33] M. Hanyi and D. Chen, "Multi-objective coordinated design of TCSC and SVC for improving transient stability," in *Proc. of the IEEE/IMCCC*, pp. 250-264, Qinhuangdao, China, 18-20 Sept. 2015.
- [34] J. Morsali, R. Kazemzadeh, and M. R. Azizian, "Coordinated design of MPSS and TCSC-based damping controller using PSO to enhance multi-machine power system stability," in *Proc. of the IEEE/ICEE*, pp. 1-6, Mashhad, Iran, 14-16 May 2013.
- [35] S. G. Jr, C. H. C. Guimaraes, N. Martins, and G. N. Taranto, "Damped Nyquist plot for a pole placement design of power system stabilizers," *Electric Power Systems Research*, vol. 158, pp. 158-169, May 2018.
- [36] J. Bhukya and V. Mahajan, "Optimization of damping controller for PSS and SSSC to improve stability of interconnected system with DFIG based wind farm," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 108, pp. 314-335, Jun. 2019.
- [37] T. Prakash, V. P. Singh, and S. R. Mohanty, "A synchrophasor measurement based wide-area power system stabilizer design for inter-area oscillation damping considering variable time-delays," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105, pp. 131-141, Feb. 2019.
- [38] O. Kahouli, M. Jebali, B. Alshammari, and H. H. Abdallah, "PSS design for damping low-frequency oscillations in a multi-machine power system with penetration of renewable power generations," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 1, pp. 116-127, Jan. 2019.
- [39] A. Abdalrahem, et al., "Design of a fixed-order robust controller using loop shaping method for damping inter-area oscillations in power systems," in *Proc. of the IEEE/PECI*, 6 pp., Urbana, IL, USA, 19-20 Feb. 2016.
- [40] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, and G. Andersson, "Improving power system dynamics by series-connected FACTS devices," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1635-1641, Oct. 1997.
- [41] L. Yong, C. Rehtanz, S. Ruberg, L. Longfu, and C. Yijia, "Wide-area robust coordination approach of HVDC and FACTS controllers for damping multiple interarea oscillations," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1096-1105, Jul. 2012.
- [42] G. Shahgholian, "Review of power system stabilizer: application, modeling, analysis and control strategy," *International J. on Technical and Physical Problems of Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 41-52, Sept. 2013.
- [43] W. Peres, I. C. S. Junior, and J. A. P. Filho, "Gradient based hybrid metaheuristics for robust tuning of power system stabilizers," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 95, pp. 47-72, Feb. 2018.
- [44] A. L. B. Do Bomfim, G. N. Taranto, and D. M. Falcao, "Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 163-169, Feb. 2000.
- [18] M. Eslami, H. Shareef, A. Mohamed, and M. Khajezadeh, "An efficient particle swarm optimization technique with chaotic sequence for optimal tuning and placement of PSS in power systems," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 1467-1478, Dec. 2012.
- [19] S. Kamalasadani, G. D. Swann, and R. Yousefian, "A novel system-centric intelligent adaptive control architecture for power system stabilizer based on adaptive neural networks," *IEEE Systems J.*, vol. 8, no. 4, pp. 1074-1085, Dec. 2014.
- [20] M. K. Panda, G. Pillai, and V. Kumar, "An interval type-2 fuzzy logic controller for TCSC to improve the damping of power system oscillations," *Frontiers in Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 307-316, Sept. 2013.
- [21] س. ابازری، ع. عرب‌دردری، م. برخورداری یزدی و م. ص. پیام، "طراحی کنترل‌کننده مقاوم محدوده وسیع SVC جهت میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای در سیستم قدرت،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، جلد ۱۳، شماره ۱-الف، صص. ۴۶-۳۶، بهار ۱۳۹۴.
- [22] A. Vahidnia, G. Ledwich, and E. W. Palmer, "Transient stability improvement through wide-area controlled SVCs," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3082-3089, Jul. 2016.
- [23] A. A. Mohamed, A. A. M. El-Gaafary, Y. S. Mohamed, and A. M. Hemeida, "Multi-objective states of matter search algorithm for TCSC-based smart controller design," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 874-885, Nov. 2016.
- [24] S. P. Azad, R. Irvani, and J. E. Tate, "Damping inter-area oscillations based on a model predictive control (MPC) HVDC supplementary controller," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3174-3183, Mar. 2013.
- [25] S. M. Abd Elazim and E. S. Ali, "Optimal SSSC design for damping power systems oscillations via gravitational search algorithm," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 82, pp. 161-168, Nov. 2016.
- [26] B. Chaudhuri, S. Ray, and R. Majumder, "Robust low-order controller design for multimodal power oscillation damping using flexible AC transmission systems devices," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 3, no. 5, pp. 448-459, May 2009.
- [27] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. of the IEEE/ICNN*, vol. 4, pp. 1942-1948, Perth, WA, Australia, 27 Nov.-1 Dec. 1995.
- [28] D. P. Ke and C. Y. Chung, "An inter-area mode oriented pole-shifting method with coordination of control efforts for robust tuning of power oscillation damping controllers," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1422-1432, Aug. 2012.
- [29] M. Mahdavian, A. Movahedi, G. Shahgholian, and M. Janghorbani, "Coordinated control of PSS and variable impedance devices by using AVURPSO to enhance the stability in power system," in *Proc. of the IEEE/ECTICON*, pp. 407-410, Phuket, Thailand, 27-30 Jun. 2017.
- [30] G. Shahgholian and A. Movahedi, "Power system stabiliser and flexible alternating current transmission systems controller coordinated design using adaptive velocity update relaxation particle swarm optimisation algorithm in multi-machine power system," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 8, pp. 1860-1868, May 2016.
- [31] L. Hassan, M. Moghavvemi, H. Almorib, and K. M. Mottaqi, "A coordinated design of PSS and UPFC-based stabilizer using genetic algorithm," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 50, no. 7, pp. 2957-2966, Sept./Oct. 2014.
- [32] R. Narne, P. C. Panda, and J. P. Theratill, "Genetic algorithm based simultaneous coordination of PSS and FACTS controllers for power oscillations damping," in *Proc. of the IEEE/ICSE*, pp. 85-90, Kathmandu, Nepal, 24-27 Sept. 2012.

میشم زمانی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در دانشگاه پیام گلیپایگان و در مقطع کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۶ به پایان رسانده و هم‌اکنون کارشناس برق شرکت برق منطقه‌ای اصفهان است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شبکه‌های عصبی و دینامیک سیستم‌های قدرت می‌باشد.

غضنفر شاهقلیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۷۳ در دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه تبریز و دکترای مهندسی برق را در دانشگاه علوم و تحقیقات تهران به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از الکترونیک قدرت، دینامیک سیستم‌های قدرت و ریزشبکه‌ها.