مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۳۹۹/ دوره ۱۰/ شماره ۳/ صفحه ۱۹۵-۲۰۶

مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

دانشگاه صنعتی شاهرود

DOI: 10.22044/jsfm.2020.9317.3104

طراحی پایدارساز سیستم قدرت با ساختار بهینه برای یک سیستم قدرت چند ماشینه به منظور میرا کردن نوسانات فرکانس پایین با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

مجید مرادی زیرکوهی

استادیار، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، دانشکده فنی و مهندسی

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

چکیده

جهت پاسخگویی به تقاضای انرژی، گسترش شبکه‌های انتقال باعث رخ دادن نوساناتی بـا فرکانس کم در سیستم قدرت شده است. این نوسانات در صورت میرا نشدن، قابلیت بـاردهی خطـوط انتقال شبکه را کاهش داده و گاهاً باعث ناپایداری کل سیسـتم مـی‌شود. از این رو تنظیم بهینه پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مهم باعث افزایش عملکرد مطلوب پایدار ساز در طی اغتشاش‌های ناخواسته می‌شود. در این مقاله، به‌منظور افزایش پایداری سیستم قدرت چند ماشینه و در نتیجه افزایش عملکرد کل سیستم قدرت، از الگوریتم بهینه سازی مبتنی برآموزش و یادگیری استفاده می‌شود. در واقع چون تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی تأثیر مستقیم در میزان پایداری فرکانس پایین دارد، این امر به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده و با الگوریتم جدید مبتنی برآموزش و یادگیری تنظیم بهینه پایدارساز سیستم قدرت انجام می‌شود. برای بررسی کارا بودن روش پیشنهادی، از یک شبکه نمونه چهار شینه استفاده می‌شود. با بررسی و مقایسه نتایج با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری در حالت‌های مختلف نشان داده می‌شود که روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری، بسیار کاراتر است.

کلمات کلیدی: پایدارساز سیستم قدرت؛ الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری؛ سیستم قدرت چند ماشینه؛ نوسانات فرکانس پایین.

Optimal Power System Stabilizer Design for a Multi-machine Power System to Damp the Low Frequencies using Metaheuristic Algorithms

M. Moradi Zirkohi*

Asst. Prof., Electrical. Eng., Behbahan Khatam Alanbia Univ. of Technology, Behbahan, Iran.

Abstract

To meet the energy demand, the expansion of transmission networks has caused low frequency oscillations in the power system. These fluctuations, if not attenuated, reduce the capability of the transmission lines and sometimes cause the whole system to be unstable. Proper selection of stabilizing parameters have great importance and increase the optimum performance during unwanted disturbances. In this article, a new algorithm based on teaching and learning is used to increase the stability of the multi-machine power system and thus increase the performance of the power system. In fact, since the optimal tuning of the control parameters has a direct effect on the low frequency stability, it becomes an optimization problem and is accomplished with a new algorithm based on the optimized training and learning algorithm of the power system stabilizer. In addition, the results are compared with the colonial competition algorithm. A four-Machin test system is used to evaluate the effectiveness of the proposed method. By examining the results in different modes, it is shown that the proposed method using the learning-based optimization algorithm is much more efficient than the proposed method using the colonial competition-based algorithm.

Keywords: Power System Stabilizer; Teaching Learning-Based Optimization Algorithm; Algorithm; Multi-Machine Power System; Low Frequency Oscillations.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۰۱۵۸۸۶۵۶۷؛ فکس: ۰۶۱۵۲۷۳۲۸۰۸

آدرس پست الکترونیک: moradi@bkatu.ac.ir

۱- مقدمه

مسأله پایداری یکی از مسایل مهم در بهره‌برداری اثر بخش از سیستم‌های قدرت بوده و بیش از سه دهه است کـه توجه مهندسان قدرت و محققان را به خود جلب کرده است. در چند سال اخیر با توجه به روند تجدید ساختار صنعت برق، شبکه‌های قدرت در معرض بار بیشتری قرار گرفته‌اند. از این رو احتمال ناپایداری آنها در اثر بروز حادثه افزایش یافته است. از این رو مباحث مربوط به پایداری دینامیکی با توجه به رخ دادن نوسانات فرکانس پایین مورد توجه محققان قرار گرفته است.

یکی از راحل‌هایی که در صنعت مورد استفاده و استقبال قرار گرفت، استفاده از تنظیم‌کننده ولتاژ[1] (AVR) با گین بالا، برای بهبود پایداری گذرا است؛ ولی استفاده از تنظیم‌کننده ولتاژ، باعث تشدید نوسانات فرکانس پایین و در نتیجه ناپایداری دینامیکی می‌شود. لازم به ذکر است که در عمل علاوه بر پایداری، روند میرایی نوسانات در مدت زمان کم نیز دارای اهمیت است. این مهم با پایدارساز سیستم قدرت[2] (PSS) قابل تحقق است.

پایدارساز سیستم قدرت یکی از روش‌های ارزان قیمت بهبود پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت است. پایدارساز سیستم قدرت سیگنال کنترلی مناسب را برای افزایش میرایی و در نتیجه افزایش توان انتقای توسط خطوط فراهم می‌کند. در واقع این ابزار می‌تواند به عنوان یک تجهیز کمکی به واحدهای نیروگاهی اضافه شود تا فرایند کنترل عدم تعادل توان تولیدی و مصرفی در شبکه بهتر انجام شود. نوع رایج پایدارساز سیستم قدرت که به نام پایدارساز سیستم قدرت متداول[3] (CPSS) شناخته می‌شود، کاربرد بیشتری پیدا کرده و شناخته‌تر است. پایدارساز سیستم قدرت متداول، شامل چندین پارامتر است که باید طی مرحله طراحی تعیین گردند و تنظیم دقیق آنها تاثیر زیادی روی عملکرد سیستم قدرت دارد. پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت متداول، معمولاً با استفاده از روش‌های مختلفی محاسبه و تعیین می‌شوند. با این حال، ساختار سیستم قدرت و تغییرات شرایط بارگذاری سیستم، می‌تواند بر عملکرد پایدارساز سیستم قدرت در میرایی تمام مدها، مخصوصاً نوسانات بین ناحیه ای اثر بخش باشد.

برای غلبه بر این مشکل و داشتن یک پایدارساز سیستم قدرت بهینه مناسب، تحقیقات خوبی در این حوزه انجام گرفته است. در این تحقیقات روش‌های متفاوتی برای طراحی پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت متداول ارائه شده است تا با افزایش عملکرد پایدارساز سیستم قدرت بتواند در مقابل نوسانات سیستم قدرت به خوبی عمل کند و آنها را میرا نماید. روش‌های کنترل کلاسیک مبتنی بر کنترل‌کننده پس-فاز-پیش‌فاز [۳]، غیرخطی [۴] و روش‌های کنترل تطبیقی [۵]، روش‌های کنترل مقاوم [۶]، هوش مصنوعی [۷] و روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری [۱, ۸] از جمله این روش‌ها هستند. استفاده از شبکه‌های عصبی نیز برای حل این مسئله پیشنهاد شده که مزایا و معایب خود را دارد. یکی از عمده معایب آن، طولانی بودن زمان آموزش است [۹]. برای مثال در [۱۰] از شبکه عصبی برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت بهره برده شده است. یکی از مشکلات کاربرد شبکه عصبی که در این مقاله به آن اشاره شده است، طولانی بودن زمان آموزش شبکه و همچنین سختی انتخاب تعداد لایه‌ها و نرون‌ها است؛ در نتیجه در بعضی مقالات از جمله [۱۱] از کنترل کننده فازی نیز به این منظور استفاده شده است. با توجه به اینکه در طراحی کنترل کننده فازی نیازی به مشخص بودن کامل مدل ندارد، در عمل بسیار کارا است. در مرجع [۸] یک کنترل‌کننده مد لغزشی فازی تطبیقی به کمک کنترل‌کننده تناسب- انتگرالی به منظور میرایی نوسانات سیستم قدرت ارائه شده است. در این مطالعه از شبکه عصبی مبتنی بر تابع ویولت[4] استفاده شده است. در [۵]، یک نوع پایدارساز سیستم قدرت فازی تطبیقی مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های روش پیشنهادی در این مقاله، عدم حساسیت دینامیک سیستم به تغییرات پارامترها است. از روش‌های کنترل مقاوم نیز برای تنظیم پایدارساز قدرت استفاده شده است[۱۲]. با توجه به اینکه دینامیک پایدارساز سیستم قدرت مرتبه بالا است، استفاده از روش‌های کنترل مقاوم، باعث پیچیدگی کنترل کننده می-

[1] Automatic Voltage Regulator
[2] Power System Stabilizer
[3] Conventional PSS
[4] Wavelet

شود. در مرجع [۱۳] از روش بهینه‌سازی باکتری برای تنظیم ضرایب پایدار ساز سیستم قدرت بهره برده شده است. در [۱۳] نیز از یک روش ترکیبی بهینه سازی باکتری[1] و الگوریتم ذرات استفاده شده است. در [۱۳] از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ[2] نیز برای اینکار استفاده شده است. در [۱۴] از الگوریتم بهینه‌سازی وال[3] نیز برای طراحی یک سیستم چند ماشینه استفاده شده است. در مرجع [۱۵] روش بهینه-سازی جستجوی عقب‌گرد برای حل مسئله طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت‌های یک شبکه قدرت پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده از این روش، با دو روش دیگر الگوریتم بهینه‌سازی تغذیه باکتری و ذرات مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان داده است که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با دو روش دیگر، عملکرد بهتری داشته است. در مرجع [۱۶]، تابع میرایی به عنوان تابع هدف مسئله طراحی در نظر گرفته شده است. در این مقاله، طراحی پایدارساز سیستم قدرت و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با هدف بهبود میرایی سیستم قدرت در شرایط مختلف بهره‌برداری، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی ترکیبی تدریجی برای حل مسئله استفاده شده است.

در [۱۷]، یک پایدارساز سیستم قدرت مقاوم جدید مبتنی بر ترکیب کنترل‌کننده تناسبی –انتگرالی- مشتقی مرتبه کسری و پایدارساز سیستم قدرت معمول به کمک الگوریتم بهینه‌سازی خفاش طراحی شده است. طراحی این پایدارساز سیستم قدرت به شکل یک مسئله بهینه‌سازی فرمول بندی شده است.

یک روش مبتنی بر الگوریتم ابتکاری برای طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت برای سیستم‌های قدرت چندماشینه که شامل، توربین‌های بادی دو سو تغذیه هستند، در [۱۸] ارائه شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری[4](TLBO)، که با الهام گرفتن از فرایند یادگیری و آموزش معرفی شده است کارامدی خود را در حل بسیاری از مسائل مهندسی نشان داده شده است. الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری یا الگوریتم آموزش معلم بر اساس اصول یادگیری و آموزش معلم و دانش آموزان طراحی گردیده است و با استفاده از سیستم کارامد یادگیری و یاددهی به بهینه‌سازی مسایل متفاوت می‌پردازد. در این الگوریتم در واقع رابطه بین معلم و دانش آموز در بالا بردن دانش دانش آموز نقش دارد. معلم در کلاس نقش مهمی دارد و می‌تواند با روش تدریس و بیان خوب خود به بالا بردن سطح دانش دانش آموزان کمک نماید و در مجموع میانگین سطح کلاس را بالا بکشد. تا کنون الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری هم برای مسایل پیوسته و هم برای مسایل گسسته کاربردهای موفقیت آمیزی داشته است [۱۹]. از این رو در این مقاله طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت با فرمول بندی مناسب و تعریف یک تابع هزینه مناسب با الگوریتم بهینه‌سازی توانمند مبتنی بر آموزش و یادگیری پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این بمنظور اثبات درستی و کارایی کنترل کننده پیشنهادی، نتایج با الگوریتم رقابت استعماری مقایسه می‌شود.

در ادامه در بخش دوم پایدار ساز سیستم قدرت بصورت مختصر بیان می‌شود. سپس در بخش سوم به معرفی الگوریتم بهینه‌سازی چرخه مبتنی بر آموزش و یادگیری پرداخته می‌شود. در بخش چهارم روش پیشنهادی معرفی می‌شود. در بخش پنجم نتایج ارایه می‌شود. نهایتاً در بخش ششم، نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- پایدار ساز سیستم قدرت

پایدارساز سیستم قدرت یکی از روش‌های کارامد بهبود پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت است. پایدارساز سیستم قدرت سیگنال کنترلی مناسب را برای افزیش میرایی و در نتیجه افزایش توان انتقای توسط خطوط فراهم می‌کند. در واقع این ابزار می‌تواند به عنوان یک تجهیز کمکی به واحدهای نیروگاهی اضافه شود تا فرایند کنترل عدم تعادل توان تولیدی و مصرفی در شبکه بهتر انجام شود. لازم به ذکر است که تأثیرپذیری سیستم‌های قدرت از نوسانات فرکانس پایین باعث می‌شود کـه نتوان از حداکثر ظرفیت خطوط انتقال استفاده کرد. ایـن مهم به یکی از مباحث

[1] Bacterial Foraging
[2] Grasshopper Optimization Algorithm
[3] Whale Optimization Algorithm
[4] Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

مهم در کارکرد بهینه سیستم‌های قدرت امروزی تبدیل شده است.

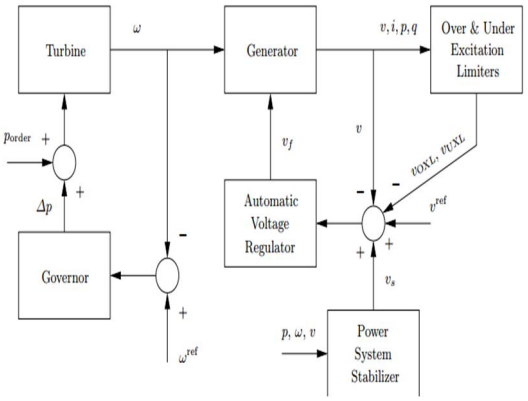
پایداری سیستم‌های قدرت، یکی از جنبه‌های مهم در عملکرد سیستم‌های الکتریکی بوده و لازم است، سیستم کنترلی اندازه فرکانس و ولتاژ را در حضور هر اغتشاشی از قبیل، افزایش ناگهانی بار، خارج شدن یک ژنراتور از مدار یا قطع شدن یک خط انتقال در سطوح ثابتی حفظ نمایند. توسعه سیستم‌های قدرت بزرگ و اتصال آنها به هم باعث ایجاد نوساناتی با فرکانس خیلی پایین در محدوده ۰/۲ تا ۳ هرتز می‌شود. معمولاً این نوسانات هنگام وقوع اغتشاش و یا بعد از وقوع اغتشاشات در سیستم رخ می‌دهد و اثر خود را در متغیرهای شبکه می‌گذارد. در واقع می‌توان گفت، نوسانات الکترومکانیکی با موازی شدن ژنراتورهای سنکرون در شبکه قدرت ظاهر می‌شوند. این نوسانات به مدت طولانی در سیستم ادامه داشته و در بسیاری از موارد اگر میرایی کافی ایجاد نشود، دامنه این نوسانات افزایش یافته و باعث جداسازی و ناپایداری سیستم شده و در نتیجه باعث محدود شدن ظرفیت توان انتقالی می‌شوند. برای میرا کردن این نوسانات ژنراتورها مجهز به پایدارساز سیستم قدرت هستند تا سیگنال پایدارکننده مکملی را برای سیستم تحریک فراهم کنند. پایدارساز سیستم قدرت به عنوان یکی از ارزانترین روش‌های بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت ابزاری است که حلقه‌های کنترلی تکمیلی را برای سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ فراهم ساخته و بر عملکرد دینامیکی سیستم قدرت با میرا کردن نوسان‌های آن تأثیر مطلوب می‌گذارد [۲]. پایدار سازها با میرا کردن نوسانات فرکانس پایین، باعث افزایش توان انتقالی هم می‌شوند. این روش، روش بسیار سودمندی در تقویت عملکرد پایداری سیگنال کوچک (حالت ماندگار) و پایداری سیگنال بزرگ (گذاری) سیستم است. با این وجود طراحی پایدار ساز سیستم قدرت به دلیل تغییر ساختار و شرایط بهره برداری سیستم قدرت و مواجه بودن آن با انواع اختلالات و تغییرات مداوم بار ساده نبوده و نیازمند تجزیه و تحلیل کامل ساختار کنترلی آن و پارامترهایش دارد [۲].

برای مقابله با این مشکلات یکی از اولین راه کارهای پیشنهادی، استفاده از سیم‌پیچ میراکننده روی قطب‌ها است؛ اما این سیم‌پیچ‌ها باعث افزایش جریان خطا می‌شد. از این رو این سیم‌پیچ‌ها چندان توجه قرار نگرفتند. با وجود این مسایل و با در نظر گرفتم محدودیت‌های پیاده‌سازی، سرانجام سیم‌پیچ‌های میراکننده‌ی به طور عام استفاده شدند [۳].

شایان ذکر است که این نوسانات عملکرد سیستم را با محدود مواجه می‌کنند و انتقال توان از یک ناحیه به ناحیه دیگر را مختل می‌سازند. از ان رو از آنجایی که سیستم دینامیکی، سیستم قدرت به طور پیوسته با اغتشاشات و تغییراتی مواجه است، بنابراین همواره از یک حالت کارکرد به حالت دیگری در حال تغییر است. حال اگر در اثر این تغییرات سیستم به حالت و نقطه کار اولیه خود برگردد و یا به نقطه کار پایدار دیگری برود، سیستم قدرت همچنان به کار خود ادامه می‌دهد، در غیر این‌صورت سیستم قدرت در ناحیه مورد نظر دچار مشکل و ناپایداری شده و این ناپایداری ممکن است، به خاموشی بخش‌هایی از شبکه منجر شود. پایداری سیستم قدرت از سال ۱۹۲۰ برای مهندسان این زمینه تبدیل به یک مساله مهم شده است. علی‌رغم اینکه پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌های حفاظت و کنترل انجام شده است، با وجود این هنوز هم خاموشی‌هایی به علت ناپایداری رخ می‌دهد. این مهم لزوم طراحی کنترل کننده برای میراسازی این نوسانات و در نتیجه افزایش پایداری سیستم را آشکار می‌کند. در واقع پایدارساز سیستم قدرت، به عنوان یکی از ادوات کمکی سیگنال کنترلی مناسب را برای افزیش میرایی و در نتیجه افزایش توان انتقالی توسط خطوط فراهم می‌کند. برای روشن شدن موضوع نمای کلی یک ژنراتو سنکرون به همراه تنظیم کننده ولتاژ و پایدار ساز سیستم قدرت، در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری، یکی از جدیدترین و قویترین الگوریتم‌های بهینه سازی هوشمند است، با الهام گرفتن از فرایند یادگیری و آموزش که معرفی شده است. الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری یا الگوریتم آموزش معلم بر اساس اصول یادگیری و آموزش معلم و دانش آموزان طراحی گردیده است و با استفاده از سیستم کارامد یادگیری و یاددهی به بهینه سازی مسایل متفاوت می‌پردازد.



شکل ۱- نمای کلی یک ژنراتور سنکرون [۳]

در این الگوریتم که بر پایه رابطه معلم و دانش آموز است، معلم در کلاس نقش مهمی دارد و می‌تواند با روش تدریس و طرز بیان خوب خود به بالا بردن سطح دانش آموزان کمک نماید و میانگین سطح کلاس را بالا بکشد. در هر مرحله و تکرار در الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری معلم کسی است که بهترین فرد کلاس یا به عبارتی دارای بهترین دانش است و در نتیجه بهترین تابع هدف را دارد و در هر مرحله آموزش ممکن است، دانش آموز کارامد تری نقش معلم را ایفا کند. الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری مشتمل بر دو فاز بهینه سازی است. این دو فاز کارامد، فاز معلم و فاز دانش آموز هستند. در فاز معلم، معلم با سهیم کردن دانش خود با دانش اموزان سطح کلاس را بالا می‌برد. در واقع در این مرحله سطح دانش دانش اموزان ارتقا می‌یابد. بعد از فاز دانش آموزان فاز معلم شروع می‌شود و دانش آموزان می‌توانند از یکدیگر نیز آموزش ببینند و روی یکدیگر تاثیر بگذارند. این تعامل باعث می‌شود که سطوح دانش آموزان ارتقا پیدا کند. در ادامه به توصیف این دو فاز خواهیم پرداخت [۲۰].

۳-۱- فاز معلم

یک معلم خوب (بهترین فرد کلاس) می‌تواند میانگین نمرات دانش آموزان را افزایش دهد. یک معلم خوب شخصی است که دانش آموزان را با دانش خود ارتقا می‌دهد؛ اما در عمل این امر ممکن نیست و یک معلم می‌تواند تنها میانگین کلاس را تا سطح خاصی بسته به ظرفیت و استعداد دانش آموزان ارتقا دهد.

فرض کند M_i میانگین و T_i معلم در نسل i باشد. T_i سعی می‌کند که میانگین M_i را به سمت سطح خودش سوق دهد، بنابراین اکنون میانگین جدید T_i خواهد بود که با M_{new} نشان داده می‌شود. راه حل (پاسخ) براساس تفاوت بین میانگین موجود و میانگین جدید به روز می‌شود و توسط فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$Difference_mean_i = r_i(M_{new} - T_F M_i) \quad (۱)$$

که در این فرمول T_F عامل آموزش[1] است که تصمیم می‌گیرد، مقدار میانگین چقدر باید تغییرکند. r_i یک عدد تصادفی در محدوده بین صفر تا یک است؛ در نتیجه راه حل موجود طبق رابطه (۳) اصلاح می‌شود:

$$X_{new,i} = X_{old,i} + Difference_mean_i \quad (۲)$$

۳-۲- فاز دانش آموز (یاد گیرنده)

دانش آموزان دانش خود را توسط دو میانگین مختلف یکی از طریق معلم و یکی از طریق تعامل بین خودشان افزایش می‌دهند. تعامل یک دانش آموز به طور تصادفی با دیگر دانش آموزان با کمک بحث‌های گروهی، ارائه‌ها، ارتباطات رسمی و ... صورت خواهد گرفت. یک دانش آموز چیزهای جدیدی یاد می‌گیرد، اگر دانش‌آموزان دیگر دانش بیشتری از خودش داشته باشد. فرآیند یادگیری برای دو دانش آموز X_i و X_j بصورت زیر است.

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_j(X_i - X_j) \quad if \ f(X_i) < f(X_j) \quad (۳)$$

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_j(X_j - X_i) \quad if \ f(X_j) < f(X_i) \quad (۴)$$

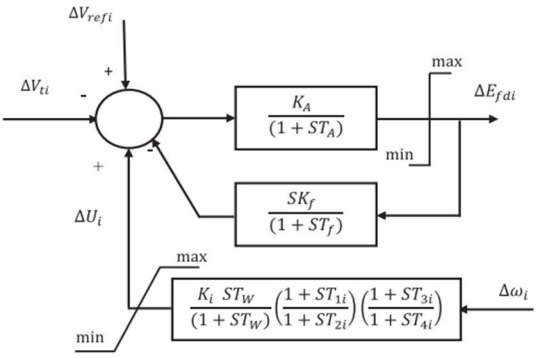
۴- روش پیشنهادی

در این قسمت ابتدا مسئله اصلی یعنی طراحی و نحوه مدل‌سازی مسئله فرموله می‌شود و سپس با تعریف تابع هزینه مناسب روش کار بیان می‌شود.

در حالت کلی یک سیستم قدرت را می‌توان با رابطه (۵) مدل کرد.

$$\dot{X} = f(X, U) \quad (۵)$$

[1] Teaching Factor



شکل ۲- بلوک دیاگرام PSS [۲۰, ۲۲]

که در آن X بردار حالت مشتمل بر متغیرهای حالت سیستم و U خروجی واحدهای پایدارساز سیستم قدرت است. در بحث تنظیم پایدارساز سیستم قدرت مدل خطی سازی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که یک سیستم n ماشینه با m واحد پایدارساز سیستم قدرت داشته باشیم می‌توان نوشت:

$$\dot{X} = AX + BU \qquad (۶)$$

که در آن ماتریس A و B دارای ابعاد $5n \times 5n$، بردار حالت دارای ابعاد $5n \times 1$ و بردار U دارای ابعاد $m \times 1$ است.

در ادامه مدل پایدارساز سیستم قدرت و پارامترهایی بیان می‌شود که بایستی توسط الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی تنظیم شوند. آنالیز جامعی در مورد نقش پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت در مراجع مختلف از جمله [۲۱] آمده است. ساختار پایدارساز سیستم قدرت، در شکل ۲ نشان داده شده است. توجه شود انحراف سرعت ژنراتور به عنوان سیگنال ورودی مورد استفاده قرار گرفته است.

از لحاظ ریاضی مدل ریاضی خطی شده پایدار ساز را می‌توان بصورت رابطه (۷) بیان کرد.

$$U_{PSS} = K_{PSS}\frac{ST_w}{1+ST_w}\frac{1+ST_1}{1+ST_2}\frac{1+ST_3}{1+ST_4}\Delta w \qquad (۷)$$

در این رابطه Δw انحراف سرعت ژنراتور بر حسب پریونیت است. واحد پایدارساز سیستم قدرت شامل یک فیلتر و جبران کننده دینامیکی است [۳]. سیگنال خروجی به عنوان یک سیگنال ورودی کمکی به سیستم تحریک اعمال می‌شود. فیلتر بالاگذر به منظور ریست کردن آفست حالت ماندگار در خروجی پایدارساز سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پارامترهای $T_1 - T_4$ و K_{PSS} ثابت‌های زمانی و بهره دو جبران‌ساز پس‌فاز-پیش‌فاز هستند.

از این رو، برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت، هدف بدست آوردن مقدار بهینه این پنج پارامتر با استفاده از الگوریتم جدید مبتنی بر آموزش و یادگیری است. برای اجرای الگوریتم آموزش و یادگیری تعداد جمعیت اولی ۱۰۰ و حداکثر تعداد تکرار نیز ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. برای اعمال الگوریتم بهینه‌سازی باید ابتدا تابع هزینه مناسب تعریف کرد. در این مقاله از تابع هزینه (۸) استفاده می‌شود:

$$J = \int_0^{60} (|dw_1| + |dw_2| + |dw_3| + |dw_4|)dt \qquad (۸)$$

که dw_i انحراف سرعت است. در واقع تابع هدف در نظر گرفته شده بر این کار، میزان خطای کل (انتگرال زیر منحنی خطای سرعت ژنراتورها) است که پس از وقوع یک خطا در شبکه محاسبه می‌شود.

۵- بحث و نتایج

در این قسمت ابتدا سیستم مورد مطالعه بیان می‌شود و سپس به بیان نتایج پرداخته می‌شود.

۵-۱- سیستم مورد مطالعه

سیستم چهار ماشینه دو ناحیه‌ای به عنوان سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. علت انتخاب این سیستم وجود نوسانات بین ناحیه‌ای است. این شبکه دارای چهار ژنراتور است که توان مورد نیاز بارها را تامین می‌کنند. این شبکه دو ناحیه‌ای، از طریق دو خط انتقال به یکدیگر وصل شده‌اند. دیاگرام تک خطی این شبکه، در شکل ۳ نشان داده شده است. این شبکه دارای ۴ ژنراتور تولیدی، ۲ بار مصرفی است که توسط این ۴ ژنراتور تغذیه می‌شوند. در این شبکه ۴ ترانسفورماتور استفاده شده است که وظیفه تبدیل سطوح مختلف ولتاژ را بر عهده دارد. این ترانسفورماتورها از نوع افزاینده بوده و وظیفه افزایش سطح ولتاژ ژنراتورها از ۲۰ کیلوولت به ۲۳۰ کیلوولت را برعهده دارند. شبکه انتقال با سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت بهره‌برداری می‌شود. بار مصرفی این شبکه ۲۷۴۳ مگاوات و ۱۴۷ مگاوار است.

۵-۲- نتایج شبیه سازی

با توجه به مباحث مطرح شده در بخش قبل، پایدارساز مناسب با استفاده از روش پیشنهادی طراحی شده و روی ژنراتورها اعمال می‌شود. در ادامه عملکرد پایدارساز طراحی شده بر پایداری شبکه در حالات مختلف بحث می‌شود. جهت ارزیابی عملکرد این کنترل‌کننده، نتایج بدست آمده با حالت-هایی که از پایدارساز طراحی شده توسط روش الگوریتم رقابت استعماری طراحی شده، مقایسه می‌شود. در شبیه-سازی‌ها برای هر پایدارساز پنج متغیر در نظر گرفته شده است که توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی تعیین می‌شوند.

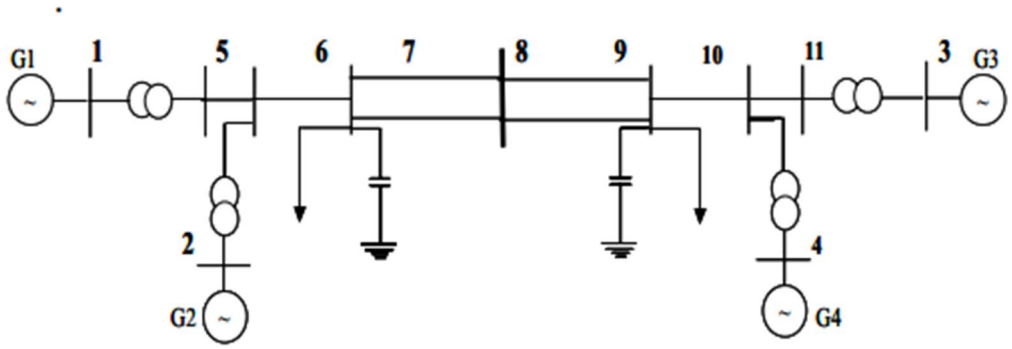
در ابتدا باید محدوده پارامترها مشخص شود. محدوده پارامترها در جدول ۱ آمده است. با اعمال روش پیشنهادی در جدول ۲ و جدول ۳ مقدار نهایی پارامترهای بهینه بدست آمده با استفاده از الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری و الگوریتم رقابت استعماری آورده شده است. حال در ادامه به‌دلیل محدودیت فضا فقط چند حالت مهم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲-۱- افزایش بار شین شماره ۳

در این حالت فرض می‌شود که بار موجود در شین شماره سه، به اندازه ۱۲ درصد بار اولیه، افزایش پیدا کند. در این حالت فرض می‌شود که بار متصله به شین شماره ۳، مشابه بار شبکه باشد. زمان اتصال این بار به شبکه، ثانیه ۳۰ است. برای نمونه سرعت ژنراتور اول در شکل ۴ و سرعت ژنراتور چهارم در شکل ۵، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در همه حالات الگوریتم مبتی بر آموزش و یادگیری به دامنه نوسانات کمتری منجر شده است.

جدول ۱- محدوده پارامترها

پارامتر	K	T_1	T_2	T_3	T_4
مقدار مینیمم	۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
مقدار ماکزیمم	۱۰۰	۱	۱	۱	۱



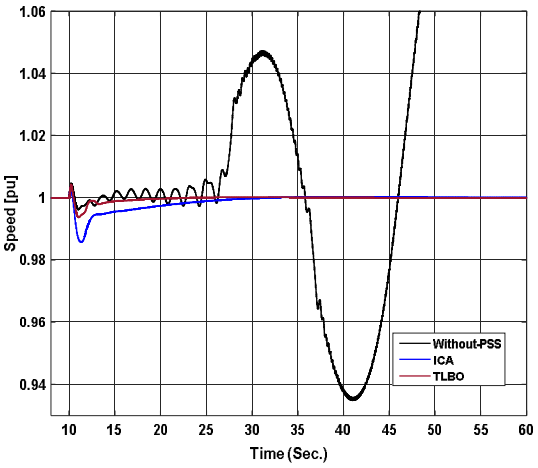
شکل ۳- دیاگرام تک خطی شبکه برق مورد مطالعه [۲۳]

جدول ۲- پارامترهای بهینه شده پایدارساز با استفاده الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری

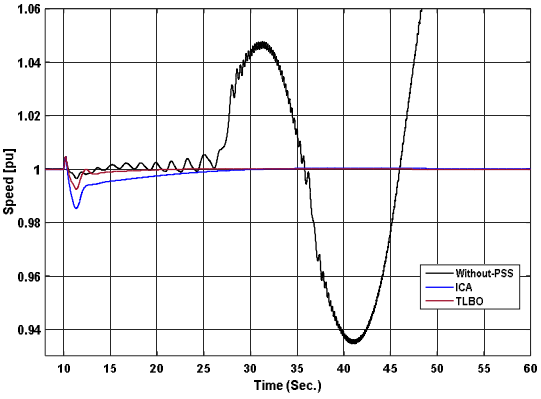
	T_1	T_2	T_3	T_4	K_{pss}
G_1	۰/۶۶۲۳۱	۰/۸۳۲۴۵	۰/۳۶۱۰۲	۰/۶۹۵۲۳	۳۲/۸۶۵۲
G_2	۰/۰۳۳۱۷۶	۰/۵۶۵۴	۰/۳۸۲۱	۰/۸۸۴۵۲	۰/۰۷۶۵۲۱
G_3	۰/۴۷۷۹۲	۰/۴۲۱۲۵	۰/۴۵۶۲۳	۰/۶۷۵۲۱	۱۵/۹۹۱۲
G_4	۰/۷۹۶۷۹	۰/۴۶۲۵۸	۰/۰۳۹۵۶۲	۰/۱۸۴۲۱	۳۵/۰۸۰۷

جدول ۳- پارامترهای بهینه شده پایدارساز با استفاده الگوریتم رقابت استعماری

K_{pss}	T_4	T_3	T_2	T_1	
۲/۶۵۲۳	۰/۹۳۰۵۶	۰/۳۱۰۵۶	۰/۰۵۴۲۱۴	۰/۷۹۲۵۶	G_1
۱/۸۱۴۶	۰/۹۱۷۰۴	۰/۴۹۲۳۵	۰/۰۳۴۲۵۱	۰/۳۳۸۵۲	G_2
۰/۴۸۰۶	۰/۴۵۰۲۶	۰/۶۲۴۵۸	۰/۰۷۱۲۳۵	۰/۲۴۵۶۲	G_3
۳/۰۲۱۲	۰/۷۹۰۸۲	۰/۷۹۲۳۵	۰/۰۳۶۰۲۳	۰/۲۳۱۸۲	G_4



شکل ۴- سرعت ژنراتور اول در حالت اول



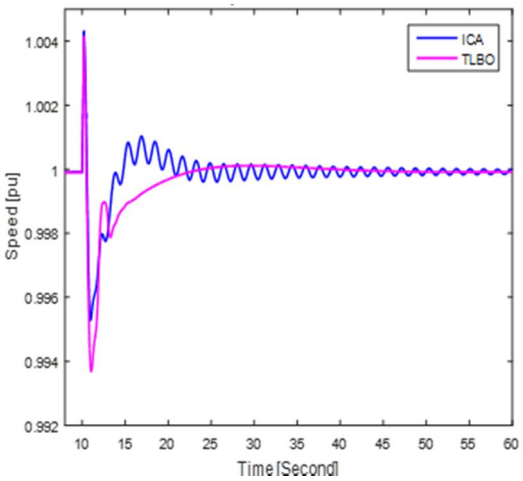
شکل ۵- سرعت ژنراتور چهارم در حالت اول

لازم به ذکر است که پاسخ سیستم در حالتی که پایدارسازی در شبکه وجود ندارد، واگرا شده و مقدار متغیرها خیلی بزرگتر از حالتی است که پایدارساز در شبکه وجود دارد. روی هم رفته با توجه به نتایج می‌توان گفت، با افزایش بار در شین شماره ۳، سرعت ژنراتورها ابتدا افت پیدا کرده است (در واقع فرکانس شبکه کاهش پیدا کرده است). با کاهش فرکانس، سیستم‌های کنترل فرکانس (گاورنر) واحدها فعال شده و فرامین کنترلی صادر می‌شود تا سیستم به حالت پایدار اولیه برگردد.

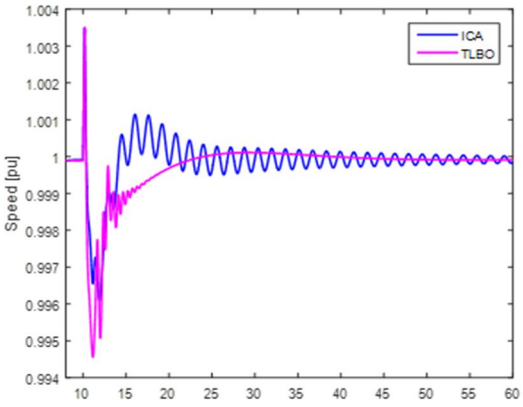
وجود پایدارساز به عنوان یک ابزار کمکی، باعث کنترل بهتر شبکه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالتی که در شبکه پایدارساز قرار ندارد، سیستم از حالت پایدار خارج شده و سرعت ژنراتورها از حد نرمال خارج شده و مداوم نوسان می‌نماید؛ اما در حالتی که پایدار ساز در شبکه قرار دارد، بعد از گذشت دوره گذرا، سیستم به حالت پایدار رسیده است. لازم به ذکر است، در حالتی که از پایدار ساز مبتنی بر روش آموزش و یادگیری استفاده شده است، سیستم به نحو مطلوب‌تری به پایداری رسیده است؛ بنابراین می‌توان گفت که پایدار ساز طراحی شده توسط الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری عملکرد بهتری در مقایسه با پایدار ساز مبتنی بر رقابت استعماری داشته است.

۵-۲-۲- خطای سه فاز متقارن گذرا در وسط خط شماره ۳

در این حالت فرض می‌شود که یک خطای سه فاز متقارن در وسط خط شماره ۳ رخ دهد. این خطا از نوع خطای سه فاز متقارن به زمین بوده است که در زمان ۱۰ ثانیه رخ داده و بعد از گذشت ۱۲ سیکل (۲۰ میلی ثانیه) برطرف می‌شود. در حقیقت این نوع خطا از نوع خطای گذرا است. برای بررسی عکس العمل سیستم قدرت سرعت ژنراتور اول در حالت دوم شکل ۶ و سرعت ژنراتور چهارم در حالت دوم، در شکل ۷



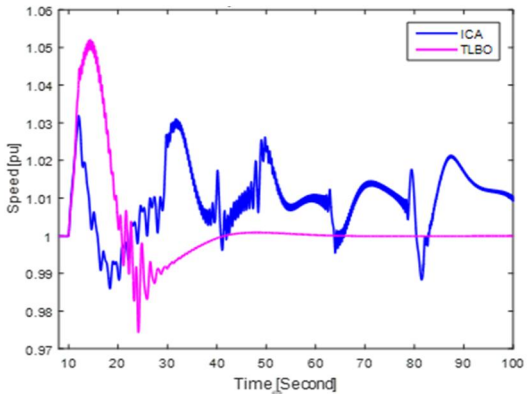
شکل ۶- سرعت ژنراتور اول در حالت دوم



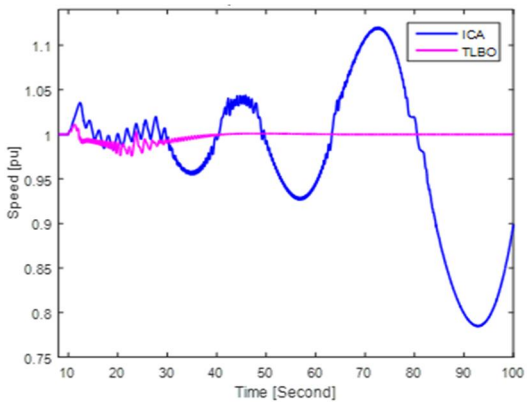
شکل ۷- سرعت ژنراتور چهارم در حالت دوم

نشان داده شده است. همانطور که آشکار است، در این حالت نیز با بروز خطا سرعت واحدها ابتدا کاهش پیدا کرده و در نتیجه سیستم‌های کنترل شبکه فعال و عمل کنترلی به نحو مطلوب انجام شده است. در این حالت نیز همانطور که در شکل‌ها آشکار است، پایدار ساز مبتنی بر آموزش و یادگیری عملکرد بهتری در مقایسه با پایدار ساز مبتنی بر رقابت استعماری داشته است.

در واقع رفتار پاسخ سیستم در حالتی که پایدار ساز مبتنی بر رقابت استعماری استفاده شده است، نوسانی‌تر بوده و در زمان بیشتری به حالت پایدار و ماندگار رسیده است. این در حالی است که در روش مبتنی بر آموزش و یادگیری هم نوسان و هم زمان ماندگاری کمتر است.



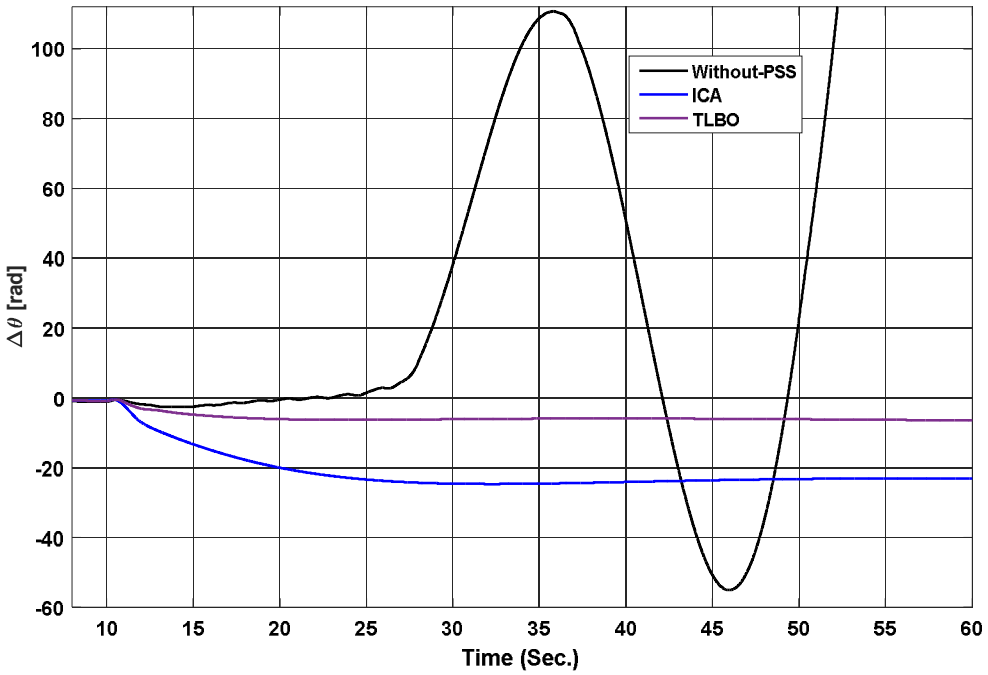
شکل ۸- سرعت ژنراتور اول در حالت سوم



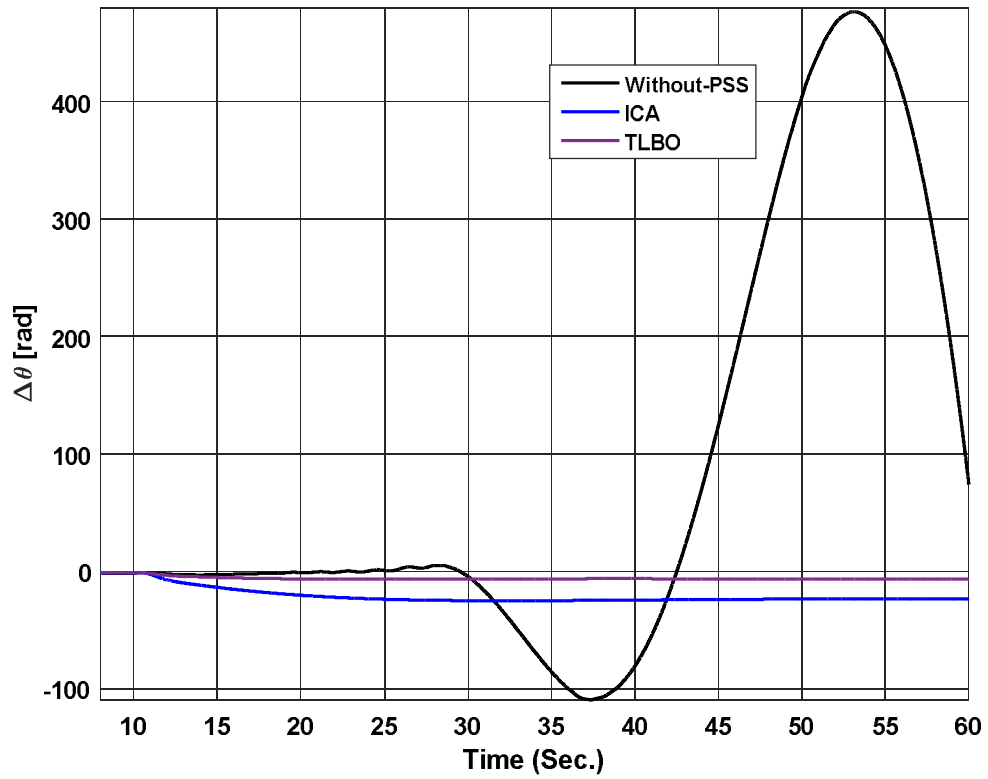
شکل ۹- سرعت ژنراتور چهارم در حالت سوم

۵-۲-۳- خطای سه فاز متقارن ماندگار در وسط خط شماره ۳ بدون عملکرد سیستم حفاظتی

در این حالت فرض می‌شود که یک خطای سه فاز متقارن در وسط خط شماره ۳ رخ دهد. این خطا از نوع خطای سه فاز متقارن به زمین است که در زمان ۱۰ ثانیه رخ می‌دهد. توجه شود که در حالت قبل خطا از نوع گذار بود و بعد از ۲۰۰ میلی ثانیه برطرف شده بود. در این حالت فرض بر این است که خطا از نوع دائم بوده و همیشه در سیستم باقی می‌ماند. از سوی دیگر در این حالت فرض می‌شود که سیستم حفاظتی عمل نکرده و خطا مدت زمان زیادی در شبکه وجود داشته باشد. در این حالت، سرعت ژنراتور اول در حالت سوم در شکل ۸ و سرعت ژنراتور چهارم در حالت سوم در شکل ۹ نشان داده شده است؛ همچنین انحراف زاویه ژنراتور اول در حالت سوم در شکل ۱۰ و انحراف زاویه ژنراتور چهارم در حالت سوم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که



شکل ۱۰- انحراف زاویه ژنراتور اول در حالت سوم



شکل ۱۱- انحراف زاویه ژنراتور چهارم در حالت سوم

در نتایج ارایه شده دیده می‌شود، سرعت واحد شماره ۱ به نوعی نوسان شدید پیدا کرده و انحراف زیادی از مقدار ۱ پریونیت دارد.

سرعت واحد شماره ۴ نیز به خوبی همگرا نشده و در عمل می‌توان گفت، به سمت واگرایی رفته است. انحراف زاویه ژنراتورها نیز نشان می‌دهد که در حالت رقابت استعماری، این انحراف به مروز زمان افزایش پیدا کرده است، ولی در روش مبتنی بر آموزش و یادگیری، بعد از مدت زمانی همگرا شده است؛ بنابراین می‌توان گفت که عملکرد روش مبتنی بر آموزش و یادگیری در این حالت از رقابت استعماری بهتر است.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله به مطالعه و بررسی تنظیم پارامترهای پایدار-سازی سیستم قدرت پرداخته شد. نشان داده شد که تنظیم مناسب پارامترهای پایدارساز، باعث افزایش عملکرد آن در مقابله با اغتشاشات دارد. برای انجام اینکار از روش بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری استفاده شد. علاوه بر این نتایج با الگوریتم رقابت استعماری مقایسه شدند. بمنظور ارزیابی و قابلیت روش پیشنهادی، نتایج شبیه سازی روی یک سیستم چهار ماشینه دو ناحیه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج در حالت‌های مختلف و با اعمال خطاهای مختلف نشان داده شد که روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری بسیار کاراتر از روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری است.

۸- مراجع

[۱] عرب یار محمدی ا، محمدیون م، سعدی م، محمدیون ح (۲۰۱۸) بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته لوله‌ای به کمک الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات. مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۱۶۳-۱۵۳ :(۳)۸.

[۲] شایقی ح (۱۳۸۷) طراحی پایدارساز سیستم قدرت مقاوم به روش الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات. طرح پژوهشی، دانشگاه محقق اردبیلی.

[3] Kundur P, Balu NJ, Lauby MG (1994) Power system stability and control. McGraw-hill, New York.

[4] Talaat HE, Abdennour A, Al-Sulaiman AA (2010) Design and experimental investigation of a decentralized GA-optimized neuro-fuzzy power system stabilizer. Int J Elec Power 32(7): 751-759.

[5] Bouchama Z, Essounbouli N, Harmas M, Hamzaoui A, Saoudi K (2016) Reaching phase free adaptive fuzzy synergetic power system stabilizer. Int J Elec Power 77: 43-49.

[6] Khodabakhshian A, Hemmati R (2012) Robust decentralized multi-machine power system stabilizer design using quantitative feedback theory. Int J Elec Power 41(1): 112-119.

[7] Farahani M,Ganjefar S (2017) Intelligent power system stabilizer design using adaptive fuzzy sliding mode controller. Neurocomputing 226: 135-144.

[8] Islam NN, Hannan M, Shareef H, Mohamed A (2017) An application of backtracking search algorithm in designing power system stabilizers for large multi-machine system. Neurocomputing 237: 175-184.

[9] Ali E (2014) Optimization of power system stabilizers using BAT search algorithm. Int J Elec Power 61: 683-690.

[10] Segal R, Sharma A, Kothari M (2004) A self-tuning power system stabilizer based on artificial neural network. Int J Elec Power 26(6): 423-430.

[11] Abedinia O, Wyns B, Ghasemi A (2011) Robust fuzzy PSS design using ABC. in Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on.

[12] Werner H, Korba P, Yang TC (2003) Robust tuning of power system stabilizers using LMI-techniques. IEEE T Contr Syst T 11(1): 147-152.

[13] Hekimoğlu B (2020) Robust fractional order PID stabilizer design for multi-machine power system using grasshopper optimization algorithm. J Fac Eng Archit Gaz 35(1): 165-180.

[14] Butti D, Mangipudi SK, Rayapudi SR (2020) An improved whale optimization algorithm for the design of multi-machine power system stabilizer. Int T Electr Energy 30(2): e12314.

[15] Gaing ZL (2004) A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. IEEE T Energy Conver 19(2): 384-391.

[16] Zuo J, Li Y, Shi D, Duan X (2017) Simultaneous robust coordinated damping control of power system stabilizers (PSSs), static var compensator (SVC) and doubly-fed induction generator power oscillation dampers (DFIG PODs) in multimachine power systems. Energies 10(4): 565.

[17] Chaib L,Choucha A, Arif S (2017) Optimal design and tuning of novel fractional order PID power

system stabilizer using a new metaheuristic Bat algorithm. Ain Shams Eng J 8(2): 113-125.

[18] Derafshian M, Amjady N (2015) Optimal design of power system stabilizer for power systems including doubly fed induction generator wind turbines. Energy 84: 1-14.

[19] Talatahari S, Taghizadieh N, Goodarzimehr V (2020) Hybrid teaching-learning-based optimization and harmony search for optimum design of space trusses. Journal of Optimization in Industrial Engineering 13(1): 177-194.

[20] Rao RV, Savsani VJ, Vakharia D (2011) Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. Comput Aided Des 43(3): 303-315.

[21] Kundur P, Klein M, Rogers G, Zywno MS (1989) Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability. IEEE T Power Syst 4 (2): 614-626.

[22] Elazim SA, Ali E (2016) Optimal power system stabilizers design via cuckoo search algorithm. Int J Elec Power 75: 99-107.

[23] Das TK, Venayagamoorthy KG (2006) Bio-inspired algorithms for the design of multiple optimal power system stabilizers: SPPSO and BFA. in Conference Record of the 41st IEEE Industry Applications Conference, Tampa, FL.