

Optimized Fuzzy PID Controller Design to Reduce Low Frequency Oscillations using the Improved Cryogenic Search Virus Algorithm

**Mohammad Eslami¹, Mohammad Reza Shayesteh¹, Majid Pourahmadi¹,
Vahid Ayatollahi²**

¹ Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University,
Yazd, Iran

² Department of Computer Engineering, Taft Branch, Islamic Azad University,
Taft, Iran

Abstract:

In this paper, the modeling of the system under study was first proposed and then a fuzzy-PID controller was designed considering the downstream filter for optimal system performance to simulate the stability of a nonlinear system and to simulate low frequency oscillations. In designing the proposed controller, the parameters of controller and fuzzy members were considered as the variable, which ultimately turns into an optimization issue. The controlling structure of the proposed PID is such that, regardless of type and structure of the system under study, it can guarantee the stability of the system and minimize the volatility and frequency fluctuations. The most important feature of the proposed method is its independence on the structure of the system and operating conditions. On the other hand, this paper attempts to reduce the frequency deviation of the dynamic mode by improving the frequency controller and implementing a new method. The new method is based on minimizing total sum of summing time, peak time, peak value, and permanent error state over load changes using the virus search optimization algorithm. Investigations done by different criteria in time and frequency domains, using the proposed algorithm shows high efficiency in comparison with other methods in the articles. Also, the proposed fuzzy controller has a better performance for damping system disturbances in bad situations.

Keywords: Fuzzy PID Controller, Improved Virus Search Algorithm, Optimization, ,
Low Frequency Oscillations.

طراحی بهینه کنترل کننده فازی PID به منظور جبران سازی نوسانات فرکانس

کم به کمک الگوریتم بهبود یافته کلونی جستجوی ویروس

محمد اسلامی^۱، محمدرضا شایسته^۲، مجید پوراحمدی^۳، وحید آیت‌اللهی تفتی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد- یزد- ایران

m.eslami@iauzah.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد - یزد- ایران

shayesteh@iauyazd.ac.ir, pourahmadi@iauyazd.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت - تفت- ایران

vahid.ayat@taftiau.ac.ir

چکیده: در این مقاله به منظور پایداری سیستم غیرخطی و میراسازی نوسانات فرکانس کم، در ابتدا مدل سازی سیستم مورد مطالعه، ارائه و سپس کنترل کننده فازی PID- با در نظر گرفتن فیلتر پایین گذر برای عملکرد مطلوب سیستم طراحی شده است. در طراحی کنترل کننده پیشنهادی، پارامترهای کنترل کننده و اعضاء فازی به صورت متغیر در نظر گرفته شده اند که در نهایت تبدیل به مسئله بهینه سازی شده اند. ساختار کنترلی فازی PID پیشنهادی به گونه ای است که صرف نظر از نوع و ساختار سیستم مورد مطالعه، پایداری سیستم را تضمین و نوسانات ولتاژ و فرکانس را به حداقل می رساند. مهم ترین ویژگی روش پیشنهادی، وابسته نبودن آن به ساختار سیستم و شرایط کاری است. از سویی دیگر، در این مقاله سعی شده است با بهبود کنترل کننده فرکانس و پیاده سازی روشی جدید، مقدار انحراف فرکانس در حالت دینامیکی کاهش یابد. روش جدید به کار گرفته شده مبتنی بر کمینه سازی مجموع قدر مطلق زمان نشست، زمان اوج، مقدار پیک و خطای حالت دائم به ازای تغییرات بار با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جستجوی ویروس است. بررسی با معیارهای مختلف در حوزه زمان و فرکانس به کمک الگوریتم پیشنهادی نشان از کارایی بیشتر در مقایسه با سایر روش های موجود در مقالات دارد. همچنین، کنترل کننده فازی پیشنهادی، کارایی بهتری برای میرا کردن اغتشاشات سیستم در شرایط بد کاری را داراست.

واژه های کلیدی: کنترل کننده فازی PID، الگوریتم بهبود یافته جستجوی ویروس، بهینه سازی، نوسانات فرکانس کم

۱- مقدمه

[۱]. موارد بسیاری از خاموشی های بزرگ ناشی از ناپایداری سیستم، اهمیت این پدیده را نشان می دهد. گرچه این مسئله ای قدیمی است، با رشد و توسعه اتصالات به هم پیوسته سیستم ها، استفاده از کنترل های جدید برای بهبود بهره برداری در شرایط عادی و اضطراری باعث شده است مسئله پایداری، نگرانی بزرگ تری تا گذشته به شمار آید. یکی از انواع پایداری، پایداری زاویه روتور اغتشاش کوچک است که به توانایی سیستم برای نگهداری سنکرونیزم تحت اغتشاش های کوچک مربوط می شود [۲]. امروزه، همراه با پیشرفت های چشمگیری در تئوری

پایداری سیستم به منزله مسئله ای مهم برای عملکرد سیستم مطمئن، از سال ۱۹۲۰ شایان توجه قرار گرفته است

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۳۰

نام نویسنده مسئول: محمدرضا شایسته

نشانی نویسنده مسئول: ایران - یزد - دانشگاه آزاد اسلامی واحد

یزد - دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق

سیستم‌ها و کنترل، روش‌های جدید برای طراحی کنترل کننده‌ها پیشنهاد شده است که برای نمونه به کنترل کننده‌های طراحی شده براساس تئوری‌های کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم، شبکه‌های عصبی مصنوعی و کنترل فازی اشاره می‌شود [۳-۴]. در دسته بندی کلی می‌توان روش‌های ارائه شده را به روش‌های کلاسیک و هوش بهینه‌سازی تقسیم بندی کرد:

در پایدارسازهای قدیمی، طراحی براساس مشتق گیری در تئوری کنترل کلاسیک بوده است. در استراتژی کنترل کلاسیک برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت از توان، سرعت و فرکانس به عنوان سیگنال کنترلی به‌نهایی یا به صورت ترکیب‌های متعدد برای تولید گشتاور اضافی روتور برای میرا کردن نوسانات فرکانس پایین استفاده شده است [۵]. باید توجه داشت برای طراحی کنترل کننده‌های میراگر کلاسیک از مدل خطی شده حول نقطه کار معین استفاده می‌شود و فرض بر آن است که مدل دقیقی از سیستم در دسترس و پارامترهای آن ثابت است. با توجه به اینکه از ویژگی‌های برجسته سیستم قدرت ماهیت متغیر بارگذاری، تولید، مصرف و تغییر آرایش سیستم است، چنانچه نقطه کار سیستم تغییر کند، کنترل کننده‌های کلاسیک طراحی شده براساس پارامترهای ثابت مدل عملکرد سیستم را مختل می‌کند و کارایی مناسبی نخواهند داشت [۶].

کاربرد روش‌های هوشمند در کنترل سیستم‌های پیچیده و غیرخطی در دهه گذشته بیش از پیش و به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علوم و فن آوری به کار گرفته می‌شوند. گاهی اوقات چنین مسائلی با توجه به ماهیت واقعی و عملی تابع هدف یا قیود مدل بسیار پیچیده اند. روش‌های بهینه‌سازی سنتی دربرگیرنده فن‌های مبتنی بر مشتق‌گیری اند. چنین روش‌هایی نیرومندان و کارایی آنها در حل انواع مختلف مسائل بهینه‌سازی به اثبات رسیده است [۷-۸]. در مرجع [۹] مقایسه‌ای بین کنترل کننده کلاسیک پایدارساز سیستم قدرت و پایدارساز فازی برای سیستم چندماشینه به کمک الگوریتم اجتماع ذرات ارائه شده است. از الگوریتم پیشنهادی برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده کلاسیک و اعضای فازی استفاده شده است. در [۱۰] روشی

برای تنظیم بلادرنگ پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت سنتی با استفاده از شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی ارائه شده‌اند که براساس الگوریتم یادگیری متعامد کمترین خطای مربعات آموزش داده می‌شود. عملکرد اساسی این مدل مبتنی بر جمع کردن ورودی‌ها و به دنبال آن به وجود آمدن یک خروجی است. در مرجع [۳] از ادوات FACTS سعی در افزایش قابلیت توان انتقالی و از بین بردن نوسانات فرکانس کوتاه شده است. در این مقاله ادعان دارد به دلیل ناهماهنگی بین این ادوات امکان رسیدن به میرایی پذیرفته شده امکان پذیر نخواهد بود؛ به همین دلیل برای رفع این نقص برای سیستم غیرخطی با شرایط کاری زیاد، از پایداری دینامیکی براساس ماتریس فیدبک استفاده شده است. در [۱۱] طراحی چندمنظوره پایدارسازهای سیستم قدرت چندماشینه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات ارائه شده است. پارامترهای پایدارسازها به‌طور همزمان طوری تنظیم می‌شوند که مدهای الکترومکانیکی ناپایدار و با میرایی ضعیف را به ناحیه مشخصی از صفحه مختلط انتقال دهند. در [۱۲] تنظیم همزمان پارامتر پایدارسازها با الگوریتم ژنتیک در سیستم قدرت چندماشینه با حل مجموعه‌ای از نامساوی‌ها ارائه شده است که بیان کننده اهداف مسئله بهینه‌سازی است. تنظیم همزمان پارامترهای ثابت پایدارسازها با الگوریتم ژنتیک در سیستم قدرت واقعی برای مجموعه‌ای از شرایط بهره‌برداری مشخص شده سیستم ارائه شده است. در [۱۳] تنظیم همزمان پارامترهای ثابت پایدارسازها با الگوریتم ژنتیک در سیستم قدرت واقعی برای مجموعه‌ای از شرایط بهره‌برداری ارائه شده است. نتایج نشان داده‌اند تابع برازندگی دقیق و ورودی خبره سیستم قدرت در مراحل طراحی فرآیند بهینه‌سازی خیلی مهم است و گاهی اوقات انتخاب بهترین راه حل از میان نتایج زیاد به دست آمده از الگوریتم لازم است. علاوه بر الگوریتم ژنتیک از سایر روش‌های هوشمند بهینه‌سازی همانند برنامه نویسی تکاملی، جستجوی ممنوع، فرایند بازیخت فلزات و روش غذایی باکتری‌ها برای بهینه‌سازی پارامترهای PSS به کار گرفته شده است [۱۴-۱۵]. در مرجع [۱۶] از الگوریتم QPSO استفاده شده است که این الگوریتم هم پارامتر کمتری نسبت به PSO دارد، هم

د- مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در شرایط مختلف کاری با سایر روش های موجود.

۲- مدل سازی مسئله مورد مطالعه

۲-۱- مدل سازی غیرخطی سیستم چندماشینه

مدل غیرخطی سیستم قدرت تک - ماشینه با مجموعه ای از معادلات جبری - دیفرانسیلی توصیف شده است که ناشی از مدل های ژنراتورها، بارها و سایر ادوات همچون سیستم های کنترل است که از طریق معادلات جبری شبکه به هم اتصال داده می شوند. در این مقاله از ژنراتور سیستم قدرت با مدل دومحوری [۱] برای شبیه سازی در حوزه زمان استفاده می شود که معادلات آن به صورت زیر بیان می شود:

$$\dot{\delta}_i = \omega_b (\omega_i - 1) \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (P_{mi} - P_{ei} - D_i (\omega_i - 1)) \quad (2)$$

$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{doi}} (E_{fdi} - (x_{di} - x'_{di})i_{di} - E'_{qi}) \quad (3)$$

$$\dot{E}_{fdi} = \frac{1}{T_{Ai}} (K_{Ai} (v_{refi} - v_i + u_i) - E_{fdi}) \quad (4)$$

$$T_{ei} = E'_{qi}i_{qi} - (x_{qi} - x'_{di})i_{di}i_{qi} \quad (5)$$

که در آن:

δ	زاویه روتور	T_e	گشتاور الکتریکی
ω	سرعت روتور	T_{do}	ثابت زمانی مدار تحریک
P_m	توان ورودی مکانیکی	K_A	بهره رگولاتور
P_e	توان خروجی الکتریکی	T_A	ثابت زمانی رگولاتور
E'_{qi}	ولتاژ داخلی ژنراتور	v_{ref}	ولتاژ مرجع
E_{fdi}	ولتاژ تحریک معادل	v	ولتاژ ترمینال

با توجه به اینکه تولید در سیستم قدرت بر پایه ماشین های سنکرون (ژنراتورها) استوار است، شرط لازم برای عملکرد پذیرنده سیستم این است که همه ماشین های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون باقی بمانند. معادلات مکانیکی بر مبنای پریونیت چندماشینه را به صورت زیر بیان می شوند:

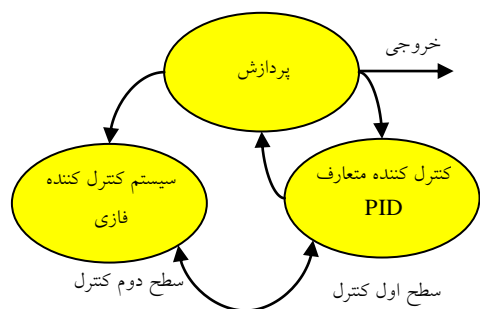
قدرتمندتر از PSO است و همچنین در مقایسه با PSO نتایج بهتری را به دست داده است. در مرجع [۱۷] تنظیم پارامترهای کنترلر تناسبی - انتگرالی - مشتقی با الگوریتم هایبیرید اجتماع ذرات و نلدرمید NM-PSO پیشنهاد شده است. نوآوری کار در وزن دهی پارامترهای پاسخ سیستم شامل ماکزیمم فراجش، زمان نشست و زمان خیزش بوده است. در مرجع [۱۸] کنترل کننده فازی مبتنی بر پایدارساز سیستم قدرت در سیستم چندماشینه ارائه شده است. در این روش از سیستم تشخیص فازی برای ساختار غیرخطی ماشین سنکرون به کمک بازخورد خطی شده بهره گرفته شده است. در اصلاح ساختار فازی، در مرجع [۱۹] پایداری سیستم قدرت به کمک کنترل کننده تطبیقی فازی روی سیستم چندماشینه به کمک الگوریتم اجتماع ذرات بررسی شده است. هرچند روش پیشنهادی کارایی مناسبی در میراسازی نوسانات از خود نشان داده بود؛ اما در اختلالات بزرگتر نمی تواند مقاوم بودن خود را حفظ کند.

در این مقاله، برای رفع این نقطه ضعف الگوریتم بهبودیافته جستجوی کلونی ویروس ارائه شده است [۲۰]. روش پیشنهادی روش بسیار جدید در سال ۲۰۱۶ بوده که در مقایسه با سایر روش های بهینه سازی عملکرد سریع تر و بهتری داشته است. در روش پیشنهادی از تئوری آشوب بهره گرفته شده است که یکی از نکات برجسته است. در مقایسه با سایر روش های بهینه سازی مشابه، روش پیشنهادی دارای مزایای کلیدی بسیاری است که در ادامه مقاله بیان خواهند شد. نوآوری های مقاله به صورت خلاصه عبارت اند از:

الف- ارائه کنترل کننده فازی PID مبتنی بر وابسته نبودن آن به ساختار سیستم و شرایط کاری با استفاده از الگوریتم بهبودیافته کلونی جستجوی ویروس.

ب- تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده فازی پیشنهادی در چند مرحله شامل ۱- تنظیم ضرایب و توابع عضویت؛ ۲- تنظیم ضرایب وزنی قواعد و ۳- تنظیم قواعد فازی به منظور کم کردن زمان محاسبات.

ج- در نظر گرفتن پارامترهای غیرخطی روی مدل چندماشینه برای نزدیک شدن رفتار سیستم مورد مطالعه سیستم واقعی.



شکل (۱): طرح‌واره سیستم کنترل پیشنهادی

برای توضیح بیشتر، فرض کنید بتوان محدوده های $K_p^{\min} \leq K_p \leq K_p^{\max}$ و $K_D^{\min} \leq K_D \leq K_D^{\max}$ را برای بهره تناسبی و بهره مشتق تعیین کرد؛ در این صورت به منظور توصیف بهتر متغیرها در محدوده کوچک تر و جلوگیری از اختلاف احتمالی بین آنها، این ضرایب به محدوده بین صفر و یک مطابق با روابط زیر نرمالیزه می‌شوند:

$$K_p' = \frac{K_p - K_{p \min}}{K_{p \max} - K_{p \min}}, K_D' = \frac{K_D - K_{D \min}}{K_{D \max} - K_{D \min}} \quad (۸)$$

$$K_I' = \frac{K_I - K_{I \min}}{K_{I \max} - K_{I \min}}$$

حال فرض کنید ورودی‌های سیستم فازی $e(t)$ و $e'(t)$ باشد؛ به طوری که سیستم فازی تعیین کننده پارامترها از ۳ سیستم فازی ۲ ورودی و یک خروجی تشکیل شده است، می‌توانیم قواعد اگر - آنگاه فازی را استخراج کنیم. فرض کنید قواعد اگر - آنگاه فازی به فرم زیر باشند. اگر $e(t)$ متعلق به A^L و $e'(t)$ متعلق به B^L باشد، آنگاه K_p^L متعلق به C^L و K_D^L متعلق به D^L و α متعلق به E^L است که A^L, B^L, C^L, D^L, E^L مجموعه های فازی و $L=1,2,\dots,M$ است. فرض کنید دامنه مدنظر برای $e(t)$ و $e'(t)$ به ترتیب $[e_m^-, e_m^+]$ و $[e_{md}^-, e_{md}^+]$ باشد. مجموعه فازی همانند شکل (۲) چنان تعریف می‌شود که دامنه مدنظر را بپوشاند. به این منظور، در ابتدا یک پایگاه قاعده به صورت تصادفی تولید می‌شود و سپس با توجه به عملکرد سیستم فازی پایگاه قاعده بازسازی می‌شود که در آن از سه پارامتر CA و CS و CO استفاده شده است.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_B (S_{mi} - S_{mi0}) = \omega_i - \omega_{i0} \quad (۶)$$

$$2H_i \frac{dS_{mi}}{dt} = -D_i (S_{mi} - S_{mi0}) + T_{mi} - T_{ei} \quad (۷)$$

که T_{ei} و T_{mi}, H_i به ترتیب اینرسی و گشتاورهای مکانیکی و الکتریکی i امین ماشین‌اند.

۲-۲- کنترل کننده فازی - PID

به منظور افزایش پایداری سیستم قدرت و فائق آمدن بر مشکلات کنترل کننده های کلاسیک در شرایط کاری مختلف، کنترل کننده های فازی به عنوان پایدارسازهای مقاوم، در میراسازی نوسانات سیگنال کوچک به کار گرفته شده اند. کنترل کننده فازی براساس ساختار PID به عنوان کنترل گر کارآمد، در بسیاری از پروژه‌ها ارائه شده است. در این بخش ایده کنترل کننده فازی PID پیشنهادی برای پایداری فرکانس کم ارائه شده است. استراتژی کنترل کننده پیشنهادی به گونه ای است که ضرایب کنترل کننده فازی PID با منطق فازی تنظیم می‌شوند. برای بهبود عملکرد کنترل کننده مدنظر، الگوریتم بهبود یافته کلونی جستجوی ویروس (VCS) پیشنهادی که دارای سرعت همگرایی و کارآیی خوبی برای بهینه یابی توابع غیرخطی است، برای تنظیم بهینه پارامترهای آن شامل ضرایب، توابع عضویت، ضرایب وزنی قواعد و قواعد فازی در چند مرحله استفاده می‌شود. شکل ۱ اصول طراحی کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد که در آن لایه اول کنترل کننده متداول بوده و لایه دوم شامل سیستم های منطق فازی است که بر عملکرد کنترل کننده متعارف نظارت دارد و در صورت لزوم آن را اصلاح می‌کند. در این سیستم پیشنهادی، بخش متعارف آن از کنترل کننده PID تشکیل شده است که سیستم بهره های PID را به صورت بلادرنگ تعیین می‌کند. سیستم فازی از مجموعه قواعد اگر - آنگاه فازی بنا نهاده شده است که چگونگی انتخاب بهره های PID را در شرایط عملکرد مشخص تشریح می‌کند.

ایده این کنترل کننده از این دیدگاه ناشی می شود که کنترل کننده PD فازی پاسخ سیستم را سریع تر می کند و مقدار حداکثر فراجش را کاهش می دهد و کنترل کننده انتگرالی خطای حالت ماندگار را حذف می کند؛ بنابراین با ترکیب دو نوع کنترل کننده مذکور با یک کلید فازی می توان ضمن بهبود عملکرد کنترل کننده تمام خصوصیات کنترل کننده PD و انتگرالی را به دست آورد.

۳- الگوریتم بهبود یافته کلونی ویروس

۳-۱- الگوریتم استاندارد کلونی ویروس

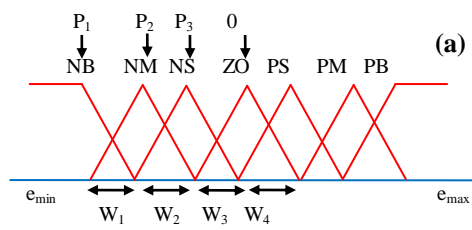
الگوریتم کلونی ویروس (VCS) روش مبتنی بر جمعیت ویروس ها و سلول های میزبان است که براساس دو رفتار ویروس در آلوده کردن سلول میزبان و انتشار یا بازتولید بنیان گذاری شده است. با توجه به اینکه برای مدل توسعه یافته پیشنهادی اساس ریاضی آن لازم است، در این بخش به صورت کامل فرمول بندی ریاضی آن بیان می شود و برای مطالعه بیشتر به مرجع [۲۰] مراجعه شود.

زاویه خط نتیجه گیری: در این بازسازی CA در واقع زاویه خط نتیجه گیری است که برای تولید فضاها، استفاده و با ۴ بیت نمایش داده می شود.

ناحیه نتیجه گیری: در این بازسازی CS ناحیه وابسته با فاصله ثابت بین فرض هاست. این پارامتر بین ۰/۵ تا ۱/۵ است و با ۴ بیت نمایش داده می شود.

درجه خط نتیجه گیری: در این بازسازی CO درجه خط نتیجه گیری است و در دو وضعیت NB-NS-Z-PS-PB و یا PS-Z-NS-NB تعریف می شود؛ بنابراین دارای یک بیت است.

در روش های طراحی سنتی، اطلاعات طراحی مبتنی بر تجربه افراد خبره اند که با آزمون سعی و خطا تعیین می شوند؛ بنابراین طراحی کنترل کننده مناسب زمان زیادی می گیرد. در این مقاله نیز برای بهینه سازی رفتار کنترل کننده های فازی پیشنهادی از الگوریتم بهبود یافته کلونی جستجوی ویروس بهره گرفته شده است. عملکرد این روش در تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی به صورت طرح گونه در شکل (۳) نشان داده شده است.

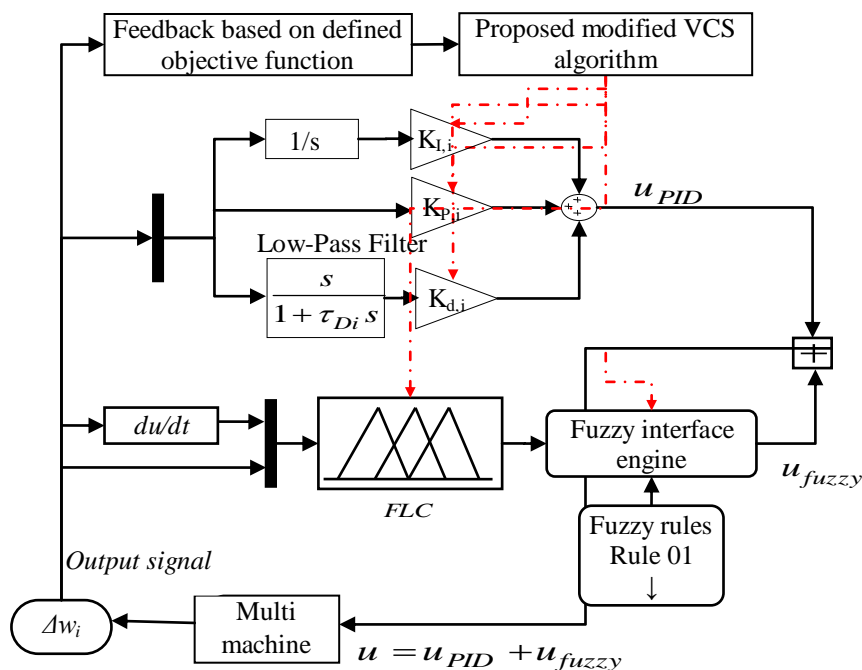


NB: Negative Big NM: Negative Medium
 NS: Negative Small PS: positive Small
 PM: Positive Medium PB: Positive Big

$$\begin{aligned}
 S_1 & [P_{11} \dots P_{19} \ W_{11} \dots W_{112} \ SF_{11} \ SF_{12} \ SF_{13} \ *] \\
 S_2 & [P_{21} \dots P_{29} \ W_{21} \dots W_{212} \ SF_{21} \ SF_{22} \ SF_{23} \ *] \\
 & \vdots \\
 S_n & [P_{n1} \dots P_{n9} \ W_{n1} \dots W_{n12} \ SF_{n1} \ SF_{n2} \ SF_{n3} \ *]
 \end{aligned}
 \tag{b}$$

n : Population size SF_{ij}: Scaling factor
 P_{ij} : Center of the MFs * : Operator code
 W_{ij} : Width of the MFs MFs: Membership Function

شکل (۲): نحوه تنظیم توابع عضویت



شکل (۳): ساختار کنترل کننده فازی PID- تنظیم شده با الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی

پایین تر سوق پیدا می کند و هدایت بهتری به سمت جواب بهینه نهایی ایجاد می کند. همچنین (G_{best}^g, τ) تضمین کننده تولید جواب های بهتر براساس هدایت جواب نهایی دارد که با بردار $(r_1 \cdot G_{best}^g - r_2 \cdot V_{pop_i})$ جهت گیری می کند.

ب- تأثیرپذیری سلول میزبان

هنگامی که سلول آلوده می شود، ساختمان داخلی آن با ویروس، تخریب و تا زمانی که به مرگ سلول منجر شود، ادامه می یابد. این رفتار به بهترین نحو با مدل CMA-ES مبتنی بر ماتریس کوواریانس با گام های زیر مدل می شود:

گام اول: به روزرسانی Hpop با رابطه:

$$H_{pop_i}^g = X_{mean}^g + \sigma_i^g \times N_i(0, C^g) \quad (10)$$

که $N_i(0, C^g)$ توزیع نرمال با میانگین 0 و ماتریس کوواریانس C^g با ابعاد $D \times D$ ، g تکرار فعلی برنامه، D بعد مسئله و $\sigma^g > 0$ است. X_{mean}^g با مقدار اولیه زیر بیان می شود:

$$X_{mean}^0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{pop_i} \quad (11)$$

گام دوم: بهترین بردار \mathcal{Y} از بخش قبلی، انتخاب و بردار والدین با مرکزیت زیر در نظر گرفته شود:

الف) انتشار ویروس

در حالت کلی ویروس در همه جا مانند هوا و آب یافت می شوند. الگوریتم پیاده روی بیان کننده رفتار ویروس دریافتن سلول میزبان است. روش پیاده روی گوسی روش مناسب برای مدل کردن این رفتار و دوری گزیدن از جواب بهینه محلی است که با رابطه زیر فرموله می شود:

$$V_{pop_i} = Gaussian(G_{best}^g, \tau) + (r_1 \cdot G_{best}^g - r_2 \cdot V_{pop_i}) \quad (9)$$

که i شاخص انتخاب تصادفی از مجموعه $\{1, 2, \dots, N\}$ که N تعداد کل جمعیت است. G_{best}^g بهترین جواب تولید شده در تکرار g و r_1 و r_2 دو متغیر تصادفی بین 0 و 1 هستند. برای پارامتر گوسین، انحراف معیار l با رابطه $\log(g)/g \cdot (V_{pop_i} - G_{best}^g)$ به دست می آید. در فرمول فوق جهت بردار $(r_1 \cdot G_{best}^g - r_2 \cdot V_{pop_i})$ برای دوری گزیدن از نقاط محلی است که V_{pop_i} بیان کننده i امین مکان از کل جمعیت V_{pop_i} است. همچنین برای بهبود عملکرد جستجوی محلی، $\log(g)/g$ در نظر گرفته شده است. این ضریب در تکرارهای اولیه مقدار نوسانات بالاتری دارد که به تدریج با افزایش تکرار برنامه به سمت نوسانات

ج- عملکرد سیستم ایمنی

عملکرد سیستم ایمنی بدن به صورت زیر فرموله می شود:

گام اول: محاسبه معیار عملکردی P_r برای جمعیت V_{pop} براساس تابع هدف سیستم مورد مطالعه:

$$Pr_{rank(i)} = \frac{N - i + 1}{N} \quad (18)$$

که N تعداد کل جمعیت V_{pop} و $rank(i)$ میانگین تابع هدف از i^{th} جمعیت V_{pop} است.

گام دوم: رشد کردن هر جمعیت به صورت انفرادی از میان جمعیت V_{pop} با رابطه:

$$\begin{cases} V_{pop} = V_{pop} - rand \cdot (V_{pop} - V_{pop}) & \text{if } r > Pr_{rank(i)} \\ V_{pop} = V_{pop} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

که اندیس های k, i, h به صورت تصادفی از مجموعه $[1, 2, 3, \dots, N]$ انتخاب می شوند؛ به گونه ای که $i \neq h \neq k$ و $r \in [1, 2, 3, \dots, d]$ است. r و $rand$ عددهای تصادفی بین ۰ و ۱ هستند. فرمول های فوق نشان می دهند هر جواب به تنهایی سعی در ذخیره بهترین مقدار فعلی خود برای مرحله دارد. همچنین اگر جوابی از محدوده مسئله خارج شوند، مجدداً براساس محدوده بالا up_{ij} و پایین low_{ij} خود تولید می شود:

$$x_{ij} = low_{ij} + rand \times (up_{ij} - low_{ij}) \quad (20)$$

۳-۲- الگوریتم بهبود یافته پیشنهادی

به منظور بهبود عملکرد الگوریتم کلونی جستجوی ویروس، در این بخش مدل توسعه یافته براساس جستجوی محلی و کلی پیشنهاد شده است. مدل توسعه یافته پیشنهادی در بخش های زیر پیگیری می شود:

• تولید اولیه

$$X_{mean}^{g+1} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^{\gamma} \omega_i V_{pop_i^{best}} \mid \omega_i = \ln(\gamma+1) / (\sum_{j=1}^{\gamma} (\ln(\gamma+1) - \ln(j))) \quad (12)$$

که در رابطه فوق، $\gamma = [N / 2]$ و w_i ضریب ترکیب و اندیس i نشان دهنده بهترین جواب در مجموعه جواب است. بر اساس این، دو مسیر حرکت تکاملی مطابق با روابط زیر خواهیم داشت:

$$P_{\sigma}^{g+1} = (1 - C_{\sigma}) P_{\sigma}^g + \sqrt{C_{\sigma} (2 - C_{\sigma})} \gamma_{\omega} \frac{1}{\sigma^g} (C^g)^{\frac{1}{2}} (X_{mean}^{g+1} - X_{mean}^g) \quad (13)$$

$$P_C^{g+1} = (1 - C_C) P_C^g + h_{\sigma} \sqrt{C_C (2 - C_C)} \gamma_{\omega} \frac{1}{\sigma^g} (X_{mean}^{g+1} - X_{mean}^g) \quad (14)$$

که $\gamma_w^{-1} = \sum_{i=1}^{\gamma} w_i^2 \cdot (C^g)^{-0.5}$ متقارن، مثبت و برقرارکننده شرط $(C^g)^{-0.5} = (C^g)^{-1}$ است. پارامترهای محاسباتی به صورت معمول با $C_C = 4 / (4 + N)$ ، $C_{\sigma} = (\gamma_{\omega} + 2) / (N + \gamma_{\omega} + 3)$ و $h_{\sigma} = 1$ تنظیم می شوند؛ البته اگر $h_{\sigma} = 0$ آنگاه $\|P_{\sigma}^{g+1}\|$ مقدار بزرگی است.

گام سوم: به روزرسانی اندازه σ^{g+1} و ماتریس کوواریانس C^{g+1} با:

$$\sigma^{g+1} = \sigma^g \times \exp\left(\frac{C_{\sigma}}{d_{\sigma}} \left(\frac{\|P_{\sigma}^{g+1}\|}{E \mid \mid N(0,1) \mid \mid} - 1\right)\right) \quad (15)$$

$$C^{g+1} = (1 - C_1 - C_{\gamma}) C^g + C_1 P_C^{g+1} (P_C^{g+1})^T + C_{\gamma} \sum_{i=1}^{\gamma} w_i \frac{(V_{pop_i^{best}} - X_{mean}^g) (V_{pop_i^{best}} - X_{mean}^g)^T}{\sigma^g} \quad (16)$$

که $d_{\sigma} = 1 + C_{\sigma} + 2 \max\{0, (\sqrt{\gamma_{\omega} - 1} / \sqrt{N - 1}) - 1\}$ معمولاً نزدیک به ۱ و C_{γ} است که C_{γ} مطابق با رابطه زیر عمل می کند:

$$C_1 = \frac{1}{\gamma_w} \left((1 - \frac{1}{\gamma_w}) \min\left\{1, \frac{2\gamma_w - 1}{(N + 2)^2 + \gamma_w}\right\} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{2}{(N + \sqrt{2})^2} \right), \quad C_{\gamma} = (\gamma_w - 1) C_1 \quad (17)$$

که $0 \leq C_{\gamma} \leq 1$ نرخ به روزرسانی برای ماتریس کوواریانس C است.

طراحی بهینه کنترل کننده فازی PID به منظور جبران سازی نوسانات فرکانس کم به کمک الگوریتم ...

تولید متغیر $\gamma_1(i)$ براساس فرمول آشوب انجام خواهد شد. یکی از معادلات معتبر بر مبنای قانون آشوب، معادله تند است که به صورت زیر فرموله می شود [۲۱]:

$$\gamma_{i+1}^j = \begin{cases} 2\gamma_i^j, & \text{if } 0 < \gamma_i^j \leq 0.5 \\ 2(1-\gamma_i^j), & \text{if } 0.5 < \gamma_i^j \leq 1 \end{cases}, j=1,2,\dots,Ng \quad (24)$$

که در معادله فوق، c معرف ذرات آشوب در بعد z ام و تکرار نام است. N_g تعداد متغیر برای بهینه سازی تعریف می شود. درحقیقت این ضریب با توجه به مقدار به دست آمده در مرحله قبلی به ایجاد ضریب آشوب برای مرحله بعدی می انجامد.

پله پنجم - تکرار گام های قبلی تا زمانی که شرط N_1 برقرار شود. در پله های قبلی فضای جستجو $[\bar{L}, \bar{U}]$ به زیر فضای بهتر $[\bar{x}^{l*}, \bar{x}^{u*}]$ تبدیل می شود که $\bar{x}^{l*} = (\bar{x}_1^{l*}, \bar{x}_2^{l*}, \dots, \bar{x}_n^{l*})$ و $\bar{x}^{u*} = (\bar{x}_1^{u*}, \bar{x}_2^{u*}, \dots, \bar{x}_n^{u*})$ هستند.

• جستجوی محلی در زیر فضای بهتر

پله ششم - برای مقدار ثابت c به ازای $j=1, \dots, n$ داریم:

$$\bar{x}_j^1 = \bar{x}_j^{u*} - c(\bar{x}_j^{u*} - \bar{x}_j^{l*}) \quad (25)$$

$$\bar{x}_j^2 = \bar{x}_j^{l*} + c(\bar{x}_j^{u*} - \bar{x}_j^{l*})$$

که $\bar{x}^2 = (\bar{x}_1^2, \bar{x}_2^2, \dots, \bar{x}_n^2)$

$\bar{x}^1 = (\bar{x}_1^1, \bar{x}_2^1, \dots, \bar{x}_n^1)$ خروجی از پله قبلی است.

پله هفتم - اگر $f(\bar{x}^1) < f(\bar{x}^2)$ آنگاه جواب بهینه در مدل توسعه یافته به دست می آید.

۴- اعمال الگوریتم پیشنهادی برای طراحی

کنترل کننده پیشنهادی

در این بخش نحوه طراحی کنترل کننده فازی پیشنهادی براساس مدل توسعه یافته الگوریتم کلونی ویروس بیان می شود. برای طراحی مدنظر گام های زیر پیگیری می شوند:

گام اول: مرتب سازی داده های اولیه مانند اطلاعات سیستم مورد مطالعه، اعمال قیود وارده، اطلاعات ژنراتورها و سیستم های مرتبط، اطلاعات باس ها و غیره.

پله اول - تنظیم اولیه پارامترهای اولیه $N_1, N_2, N_1(i), N_2(i)$ برای $i=1, \dots, n$ که N_1 تعداد تکرارهای مورد نیاز به منظور دستیابی به زیر منطقه امکان پذیر است. N_2 تعداد پله های اسکن کننده در فضای n -D الگوریتم جستجوی نهایی است. $\gamma_1(i)$ یک مقدار متغیر تصادفی بین 0 و 1 است.

• تئوری آشوب

پله دوم - برای محدوده $[\bar{L}, \bar{U}]$ از تئوری آشوب برای تولید جواب های جدید $\bar{x}^l = (\bar{x}_1^l, \bar{x}_2^l, \dots, \bar{x}_n^l)$ و $\bar{x}^u = (\bar{x}_1^u, \bar{x}_2^u, \dots, \bar{x}_n^u)$ استفاده می شود. برای تولید جواب ها از حلقه زیر استفاده می شود:

```
for i=1,...,n
   $\bar{x}_i^l = l_i + \gamma_1(i)(u_i - l_i)$ 
   $\bar{x}_i^u = u_i - \gamma_1(i)(u_i - l_i)$ 
  if  $\bar{x}_i^u < \bar{x}_i^l$ 
     $\bar{x}_i^l \leftarrow ll$ 
     $\bar{x}_i^u \leftarrow \bar{x}_i^l$ 
     $ll \leftarrow \bar{x}_i^u$ 
  end
end
```

که $\bar{x}^l = (\bar{x}_1^l, \bar{x}_2^l, \dots, \bar{x}_n^l)$ و $\bar{x}^u = (\bar{x}_1^u, \bar{x}_2^u, \dots, \bar{x}_n^u)$ به ترتیب خروجی های گام دوم اند.

پله سوم -

```
if  $f(\bar{x}^l) < f(\bar{L})$ 
   $\bar{L} \leftarrow \bar{x}^l$ 
elseif
```

```
 $\bar{L} \leftarrow \text{fix constant}$ 
end
```

پله چهارم -

```
if  $f(\bar{x}^u) < f(\bar{U})$ 
   $\bar{U} \leftarrow \bar{x}^u$ 
elseif
   $\bar{U} \leftarrow \text{fix constant}$ 
end
```

(۲۳)

علاوه بر اعضاء فازی برای سیستم فوق، پارامترهای PID به عنوان متغیرهای بهینه سازی به کمک الگوریتم پیشنهادی به دست می آیند. به منظور حل مسئله بهینه سازی غیرخطی قیوددار از الگوریتم بهبودیافته پیشنهادی استفاده می شود. گام پنجم: انتخاب بهترین جواب و ذخیره سازی آن در حافظه به منظور ارتقا نسل های بعدی. درخور ذکر است این مجموعه جواب ها در جواب های اولی جایگزین می شوند که به صورت تهی در نظر گرفته شده اند.

گام هشتم: استفاده از تابع هدف معرفی شده در رابطه (۲۶) و محاسبه برازندگی جواب های فعلی و انتخاب بهترین پاسخ.

گام هفتم: مقایسه بهترین پاسخ با پاسخ ذخیره شده در حافظه. اگر این پاسخ از پاسخ موجود در حافظه بهتر باشد، جایگزین آن می شود، در غیر این صورت همان مقدار قبلی در حافظه ذخیره می شود.

گام هشتم: ارتقا پاسخ ها براساس معادله آشوب و جستجوی کلی پیشنهادی و انجام عملیات مشابه به گام چهارم. گام نهم: جایگزین کردن بدترین مجموعه پاسخ به دست آمده با پاسخ های تصادفی جدید و استفاده از جستجوی آشوب برای یافتن بهترین پاسخ در هر فضای جستجوی محلی.

گام دهم: در صورتی که شرط خاتمه برقرار شده جواب های بهینه نمایش داده شود؛ در غیر این صورت به گام چهارم ارجاع داده شود.

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است.

گام دوم: تنظیم پارامترهای اولیه الگوریتم پیشنهادی از جمله تعداد جمعیت، تعداد تکرار برنامه، تعداد سلول های میزبان، ضرایب تابع گوسی برای آسیب زدن سلول میزبان، فراخوانی اطلاعات سیستم مورد مطالعه و قراردادن محدودیت های وارده بر سیستم.

گام سوم: استفاده از مدل توسعه یافته پیشنهادی برای تولید جواب های جدید در فضای جستجو.

گام چهارم: تنظیم بهینه پارامترهای سیستم کنترل کننده پیشنهادی براساس تابعی از حوزه زمان که به صورت زیر تعریف می شود:

$$OBJ = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=2}^{N_g} \int_0^{t_{sim}} t^2 (\Delta \omega_{ij})^2 dt \quad (26)$$

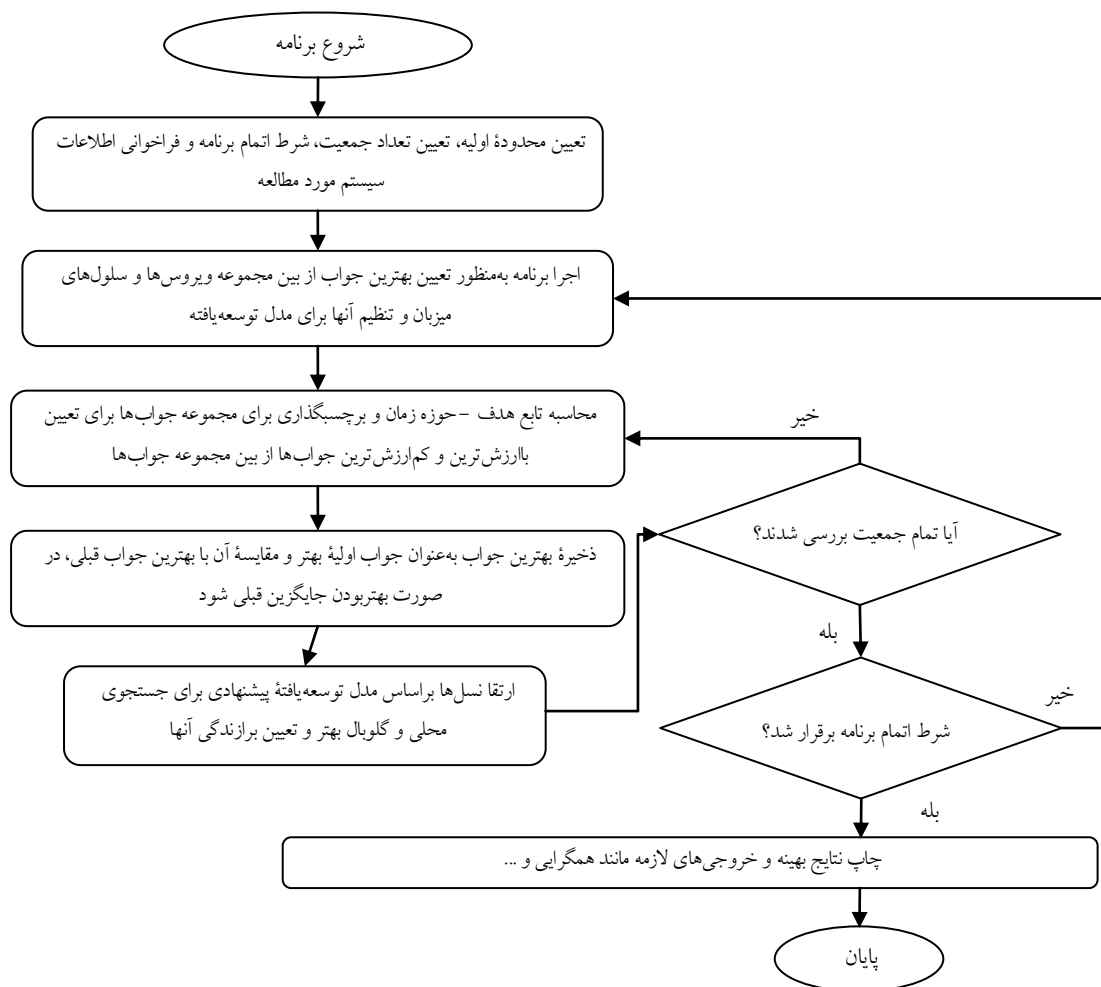
در معادله فوق، t_{sim} مدت زمان شبیه سازی برای فرایند بهینه سازی، $\Delta \omega$ تغییرات سرعت، N_p تعداد نقاط کاری سیستم و N_g تعداد ژنراتورها هستند. در این تابع، هدف، کم کردن اورشوت و آندرشوت و زمان نشست است. طراحی کنترل کننده پیشنهادی به عنوان مسئله بهینه سازی قیوددار فرمول بندی می شود که محدوده پارامترها به صورت زیرند:

Minimize J Subject to

$$\begin{aligned} K_i^{P,\min} &\leq K_i^P \leq K_i^{P,\max} \\ K_i^{D,\min} &\leq K_i^D \leq K_i^{D,\max} \\ K_i^{I,\min} &\leq K_i^I \leq K_i^{I,\max} \end{aligned} \quad (27)$$

همچنین در سیستم واقعی موجود ویژگی های غیرخطی سیستم سبب عملکرد نامناسب کنترل کننده فازی می شود؛ به همین دلیل در این مقاله، ساختار PID به سیستم فازی مورد مطالعه اضافه شده است. با توجه به شکل برای سیگنال کنترلی خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} u &= u_{fuzzy} + K_p \Delta w + \\ K_I \int \Delta w + K_D \times \frac{d \Delta w}{dt} &= u_{fuzzy} + u_{PID} \end{aligned} \quad (28)$$



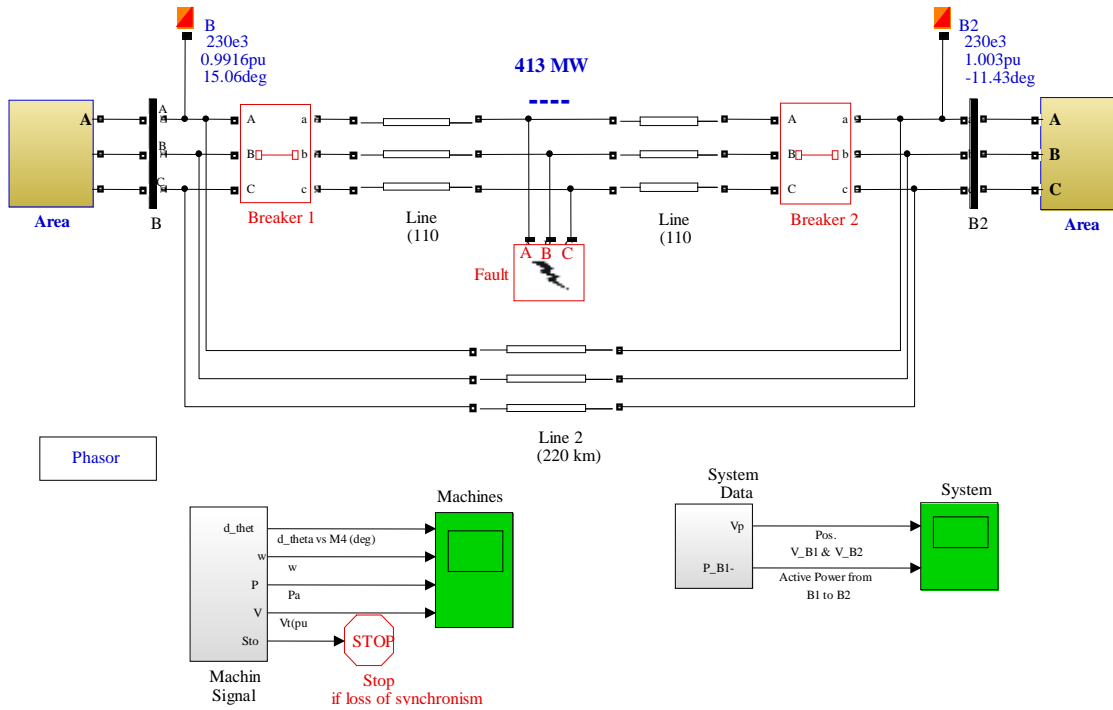
شکل (۴): فلوجارت الگوریتم پیشنهادی در مسئله طراحی کنترل کننده فازی PID پیشنهادی

۵- نتایج شبیه سازی

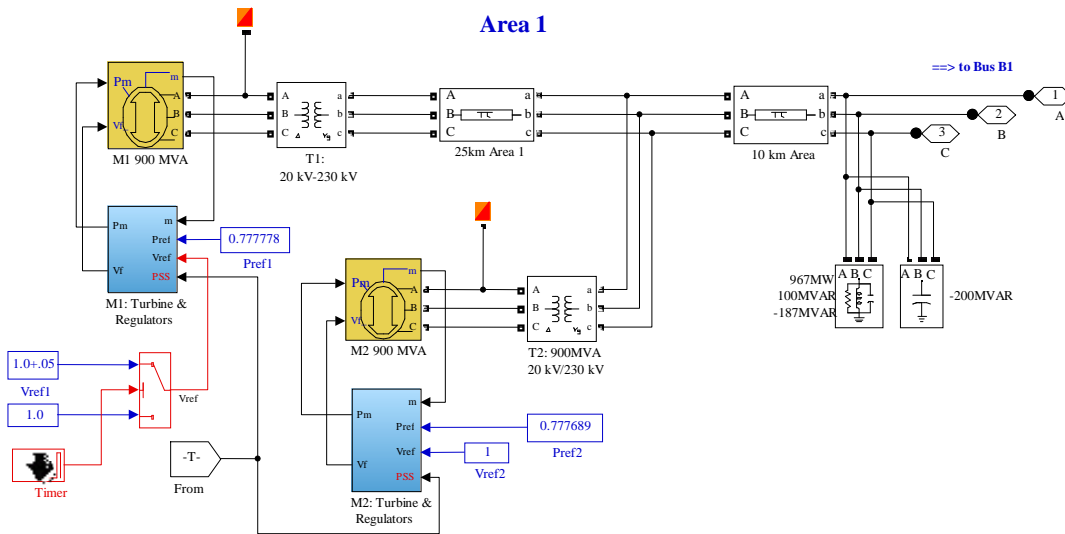
۵-۱- نتایج شبیه سازی در سیستم ۴ ماشینه

در این بخش به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای طراحی بهینه کنترل کننده پیشنهادی پرداخته شده است. عملکرد روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن شرایط کاری متفاوت بررسی شده است. در این مقاله سیستم ۴-ماشینه ۲-ناحیه سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. این سیستم در مرجع [۱] به صورت کامل توصیف شده است. علت انتخاب این سیستم وجود نوسانات بین ناحیه ای است که بیشتر پژوهش های امروزی بر این نوسانات تمرکز شده است. سیستم مورد مطالعه با دو خط

۲۲۰ کیلوولت به یکدیگر متصل شده اند. همچنین در هر ناحیه دو ژنراتور ۹۰۰ مگاوات آمپر و ۲۰ کیلوولت قرار گرفته اند. ثابت اینرسی در ناحیه اول ۱ ثانیه و در ناحیه دوم ۶/۱۷۵ ثانیه است و مقدار ۴۱۳ مگاوات از ناحیه اول به ناحیه دوم از طریق خطوط انتقال ارائه می شود. همچنین به دلیل افزایش بارگذاری امپدانس از خط انتقال تا حدود ۱۴۰ مگاوات، سیستم همواره در استرس قرار دارد. سیستم مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین برای نمونه، شکل (۶) ساختار ناحیه ۱ نشان داده شده در شکل (۵) را نشان می دهد. ناحیه ۲ ساختاری مشابه با شکل (۸) دارد.



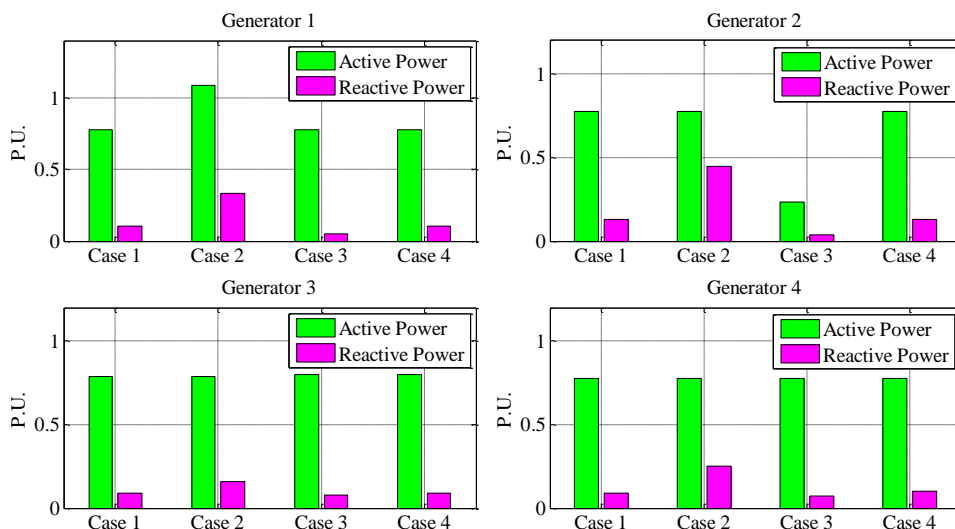
شکل (۵): سیستم چهار ماشینه دو ناحیه مورد مطالعه



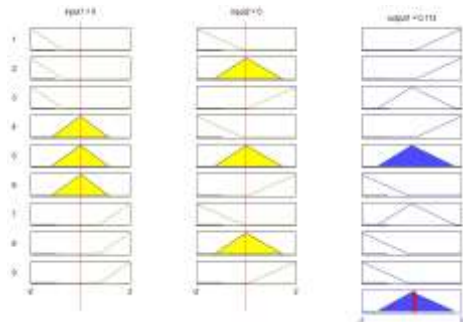
شکل (۶): سیستم مدل شده در ناحیه ۱ در شکل ۷

(ب) افزایش بار به اندازه ۲۵٪ به عنوان بار سنگین
 (ج) کاهش بار به اندازه ۲۵٪ به عنوان بار سبک
 (د) سایر شرایط کاری (۴ مورد کاری) براساس توان اکتیو و راکتیو به تفکیک ژنراتورها در شکل (۷) نشان داده شده است.

به منظور طراحی کنترل کننده فازی PID پیشنهادی، شرایط بهره برداری مختلفی براساس توان اکتیو (P)، توان راکتیو (Q) در ترمینال ژنراتورها و نقاط بار C_1 , C_2 , L_1 و L_2 در نظر گرفته شده اند. شرایط بهره برداری زیر در نظر گرفته شده است:
 الف) بار نامی



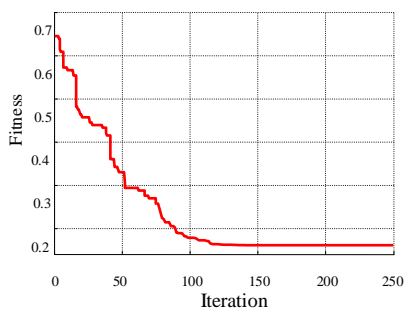
شکل (۷): شرایط کاری به کار گرفته شده برای ژنراتورها هر ناحیه براساس تغییرات توان اکتیو و راکتیو



شکل (۹): نتیجه نهایی برای استنتاج فازی در کنترل کننده

پیشنهادی

نحوه همگرایی برای الگوریتم در شکل (۱۰) به ازای ۲۵۰ تکرار نشان داده شده است.



شکل (۱۰): منحنی همگرایی برای تابع هدف مورد مطالعه

به منظور مقایسه عملکرد روش پیشنهادی، سه جنبه کنترل کننده زیر در نظر گرفته شده است:

الف) بدون وجود کنترل کننده؛

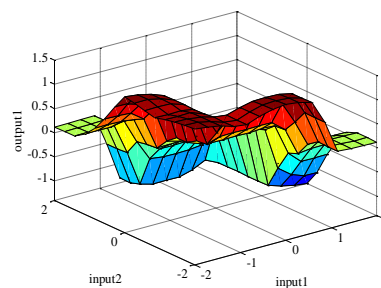
ب) با در نظر گرفتن کنترل کننده کلاسیک مرجع [۱]؛

جدول (۱) نتیجه پارامترهای بهینه به دست آمده برای کنترل کننده فازی PID پیشنهادی را نشان می دهد.

جدول (۱): نتایج به دست آمده برای طراحی کنترل کننده پیشنهادی

No- Gen	K_p	K_I	K_D
G_1	33.24	3.42	0.0176
G_2	34.07	4.33	0.0256
G_3	33.29	5.46	0.0132
G_4	32.18	3.58	0.0143

براساس بهینه سازی انجام گرفته با تغییر پارامترهای گفته شده در شکل فوق، سطح فازی و اعضاء فازی به ترتیب در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است.

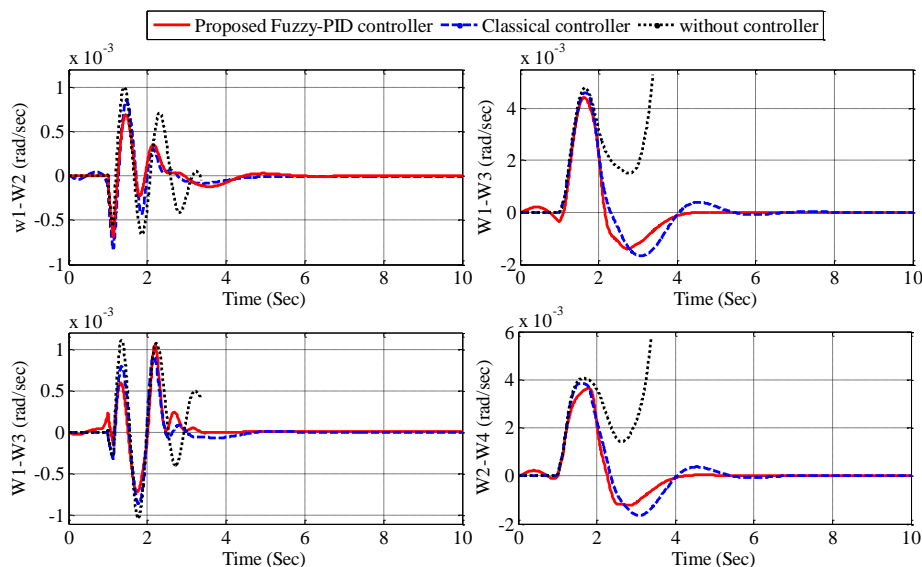


شکل (۸): سطح سه بعدی قواعد فازی بهینه شده برای خروجی کنترل کننده پیشنهادی

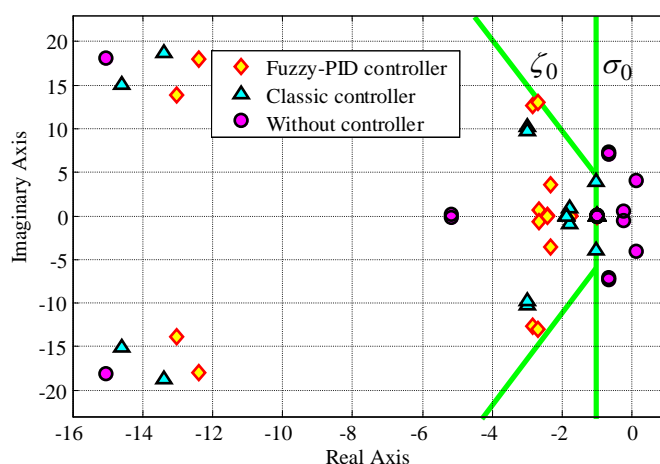
ج) کنترل‌کننده پیشنهادی.

کاهش زمان نشست دارد و مقدار بلازدگی و پایین‌زدگی هم به صورت چشمگیری کاهش یافته است. شکل (۱۲) نمایشی از مقادیر حقیقی و موهومی را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشخص است روش پیشنهادی به صورت موفق تری توانسته است به سمت چپ خط سبز پررنگ انتقال دهد.

شکل (۱۱) نتیجه تغییرات فرکانس هر ماشین با در نظر گرفتن سه کنترل‌کننده فوق را نشان می‌دهد. با وقوع اتصال کوتاه سه فاز در این شین در لحظه ۰/۲ ثانیه برای مدت زمان ۰/۱ ثانیه آزمایش شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود روش پیشنهادی دارای قابلیت مناسبی در



شکل (۱۱): تغییرات سرعت خروجی ژنراتورها بدون خروج خط از شبکه و اعمال خطای سه فاز در شرایط بارگذاری نرمال، روش پیشنهادی (خط پیوسته)، کنترل‌کننده کلاسیک (خط چین) و بدون کنترل‌کننده (نقطه چین)



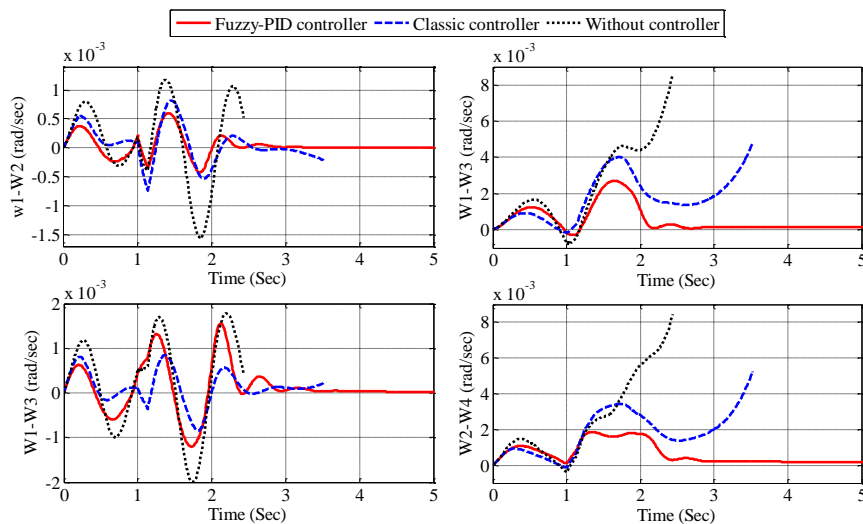
شکل (۱۲): توزیع مقادیر ویژه در صفحه مختلط به کمک روش پیشنهادی، اجتماع ذرات و کنترل‌کننده کلاسیک

وقوع اتصال کوتاه سه فاز در این شین در لحظه ۰/۲ ثانیه برای مدت زمان ۰/۱ ثانیه آزمایش شده است. نتیجه عملکرد سیستم با کنترل‌کننده مدنظر در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با وجود چنین شرایط

به عنوان سناریو و شرایط سخت کاری، ۲۵٪ افزایش بار برای هر ناحیه ایجاد کرده‌ایم؛ همچنین خطای سه فاز بین دو ناحیه در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر، با اعمال این خطا، خط بالایی بین دو مدار خارج شده است. با

بخشی از نوسانات است؛ اما نهایتاً در زمان بیشتری در مقایسه با بدون حضور کنترل کننده به سمت ناپایداری سوق پیدا می کند. مقایسه آنها نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی با سرعت بیشتری به جواب بهینه تر همگرا می شود. همچنین به منظور مقایسه در حوزه فرکانس، شکل (۱۴) نمایشی از مقادیر حقیقی و موهومی را نشان می دهد. همان گونه که در شکل مشخص است روش پیشنهادی به صورت موفق تری توانسته است به سمت چپ خط سبز پرننگ انتقال دهد. جدول (۲) مقایسه بین مقادیر موهومی و حقیقی برای عملکرد سیستم در شرایط کاری مختلف است.

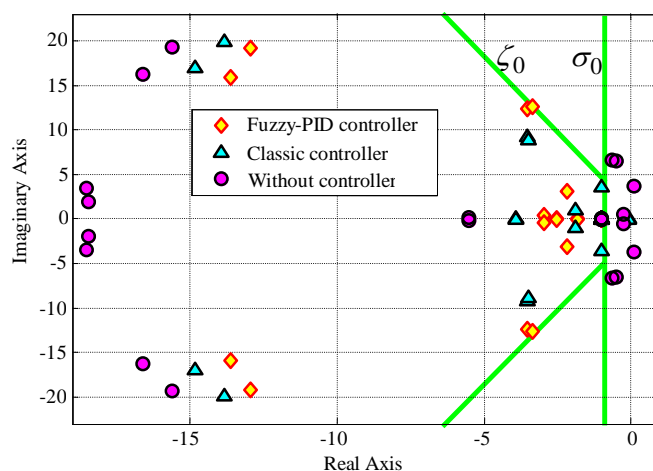
کاری سخت، همچنان روش پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته است؛ در حالی که دو روش دیگر ناپایدار شده اند. علت این امر این گونه توجیه می شود که در حالت بدون حضور کنترل کننده چون سیستم در حد مرزی خود بهره برداری می شود، اغتشاش ناخواسته (شرایط سخت) سبب می شود سیستم نتواند به حالت پایداری خود بازگردد و از محدوده پایداری خود خارج می شود و امکان بازگشت به نقطه تعادل براساس روابط (۱) الی (۵) وجود ندارد. برای حالت کنترل کننده کلاسیک هم به همین نحو بیان می شود؛ ولی با این تفاوت که وجود کنترل کننده کلاسیک سبب جبران



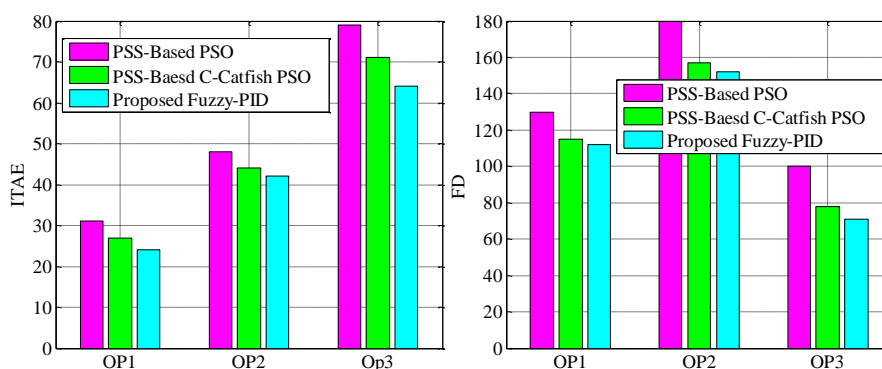
شکل (۱۳): تغییرات سرعت خروجی ژنراتورها با خروج خط از شبکه و اعمال خطای سه فاز در شرایط بارگذاری سنگین با افزایش ۲۵٪، روش پیشنهادی (خط پیوسته)، کنترل کننده کلاسیک (خط چین) و بدون کنترل کننده (نقطه چین)

جدول (۲): مقایسه ضریب میرای براساس مقادیر ویژه به دست آمده برای شرایط کاری مختلف الف تا ج

بارگذاری	بدون کنترل کننده	کنترل کننده کلاسیک	کنترل کننده پیشنهادی
+25% Load	$-0.2606 \pm 8.8683i, 0.0294$	$-0.1694 \pm 8.5814i, 0.0197$	$-0.2483 \pm 8.8628i, 0.0280$
	$-0.1758 \pm 8.6221i, 0.0204$	$-0.2302 \pm 8.3306i, 0.0276$	$-0.1825 \pm 8.7840i, 0.0208$
	$-0.2045 \pm 8.5736i, 0.0238$	$-0.2269 \pm 8.5289i, 0.0266$	$-0.2230 \pm 8.6811i, 0.0257$
	$0.0449 \pm 7.1872i, -0.0062$	$-0.0779 \pm 7.3292i, 0.0106$	$-0.1079 \pm 7.6562i, 0.0141$
-25% Load	$-0.2034 \pm 8.5606i, 0.0238$	$-0.1732 \pm 8.6593i, 0.0200$	$-0.2203 \pm 8.6572i, 0.0254$
	$-0.0951 \pm 7.4769i, 0.0127$	$-0.2236 \pm 8.5167i, 0.0262$	$-0.1044 \pm 7.6613i, 0.0136$
	$-0.0291 \pm 7.1803i, 0.0041$	$-0.2223 \pm 8.3047i, 0.0268$	$-0.0493 \pm 7.2642i, 0.0068$
	$0.0978 \pm 6.4575i, -0.0151$	$-0.1156 \pm 6.6914i, 0.0173$	$-0.1375 \pm 6.6798i, 0.0206$
Base Case	$-49.4860 \pm 0.0007i, 1.0000$	$-0.1788 \pm 8.6571i, 0.0206$	$-0.1907 \pm 8.8661i, 0.0215$
	$-0.2592 \pm 8.8811i, 0.0292$	$-0.2295 \pm 8.3341i, 0.0275$	$-0.2453 \pm 8.8776i, 0.0276$
	$0.2080 \pm 4.5810i, -0.0454$	$-0.0260 \pm 7.1047i, 0.0037$	$-0.0634 \pm 7.2584i, 0.0087$
	$0.1040 \pm 4.4617i, -0.0233$	$-0.1208 \pm 6.7151i, 0.0180$	$-0.1606 \pm 7.0100i, 0.0229$



شکل (۱۴): توزیع مقادیر ویژه در صفحه مختلط به کمک روش پیشنهادی، اجتماع ذرات و کنترل کننده کلاسیک



شکل (۱۵): مقایسه عملکرد سیستم براساس معیارهای عددی FD و ITAE با مرجع [۲۲]

ذرات [۲۲] در شکل (۱۵) نشان داده شده است. به منظور مقایسه، نقطه کاری یکسانی با مرجع [۲۲] در نظر گرفته شده است. در این نمودار، درصد بهبود در مشخصات حوزه زمان شامل مجموع مربعات خطا در مربع زمان، حداکثر فراجش و زمان نشست کنترل کننده فازی-PID بهینه شده با الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش ارائه شده در مرجع [۲۲] موفق تر است. در این نمودار بهبود مشخصات حوزه زمان کنترل کننده پیشنهادی، نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها در نقاط کار متفاوت کاملاً مشهود است.

۵-۲- نتایج شبیه سازی در سیستم ۱۰ ماشینه

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی روی سیستم بزرگتر به منظور نشان دادن عملکرد الگوریتم پیشنهادی بررسی شده است. شکل (۱۶) ساختار سیستم قدرت ۱۰ ماشینه را نشان می دهد. برای طراحی کنترل کننده پیشنهادی

همان گونه که از مقادیر ویژه تحلیل های فوق مشخص است کنترل کننده طراحی شده عملکرد مقاومی با تغییر شرایط کاری از خود نشان داده است. حال نتایج روش پیشنهادی براساس معیارهای عددی با سایر روش های موجود در مقالات منتشر شده مقایسه شده است. برای مقایسه روش های ارائه شده در این بخش، از دو معیار معرفی شده زیر بهره گرفته شده است:

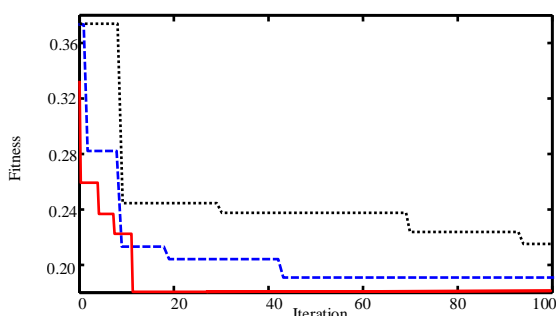
$$FD = (5000 \times OS)^2 + (5000 \times US)^2 + T_s^2 \quad (29)$$

$$ITAE = 1000 \int_0^{t_{sim}} (|W_1 - W_2| + |W_1 - W_3| + |W_1 - W_4| + |W_3 - W_4|) dt \quad (30)$$

در رابطه فوق OS^۱ نقطه اوج پاسخ، US^۲ نخستین نقطه اوج منفی پاسخ و T_s زمان نشست پاسخ است. در FD زمان نشست با معیار ۲٪ محاسبه شده است. معیار عملکرد ITAE مشابه رابطه (۳۷) است. نتایج عددی معیار عملکرد FD و ITAE برای سیستم مورد مطالعه در مقایسه با روش اجتماع

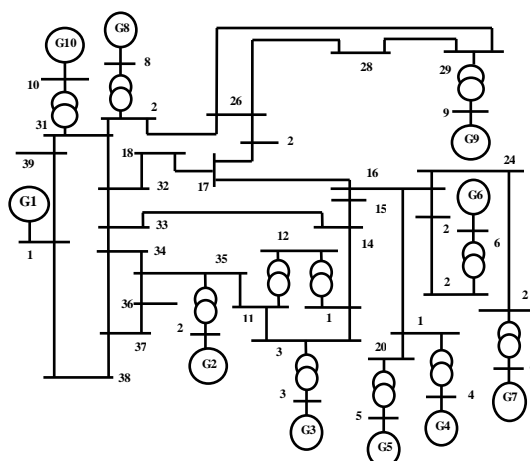
طراحی بهینه کنترل کننده فازی PID به منظور جبران سازی نوسانات فرکانس کم به کمک الگوریتم ...

به منظور طراحی کنترل کننده پیشنهادی خطا ۳ فاز در زمان ۱ ثانیه در شین ۲۹ و خط (۲۶،۲۹) اعمال شده است. در این سناریو، خطا با حذف خط مدنظر باعث برگشت سیستم به حالت عادی کار خود می شود. روش پیشنهادی با روش های بهبود یافته الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. شکل (۱۷) روند تغییرات همگرایی برای تابع معرفی شده را نشان می دهد. تغییرات سرعت خرجی ژنراتورهای در نقطه کار نامی با اعمال خطای سه فاز ۶ سیکل در شین ۲۹ که با رفع خطا در خط ۲۶-۲۹ از مدار با کنترل کننده طراحی شده در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



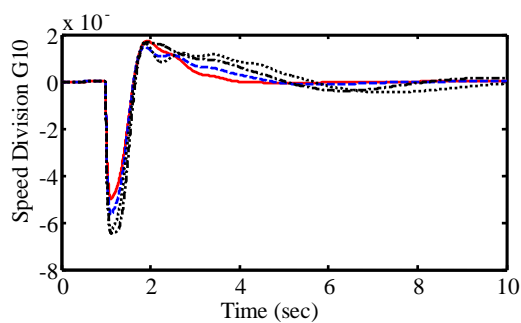
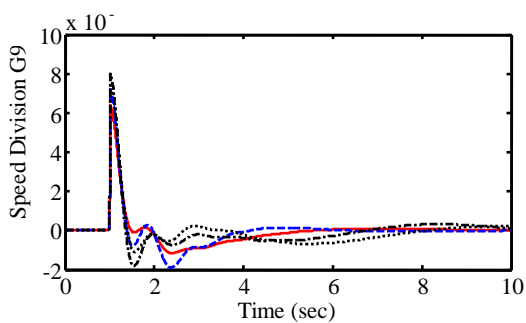
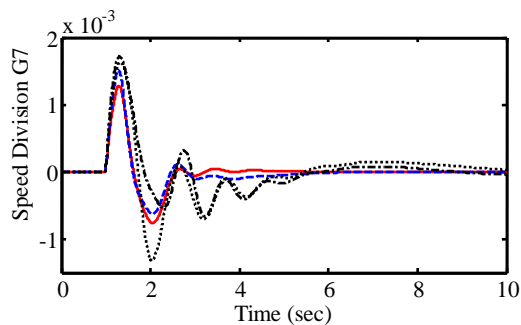
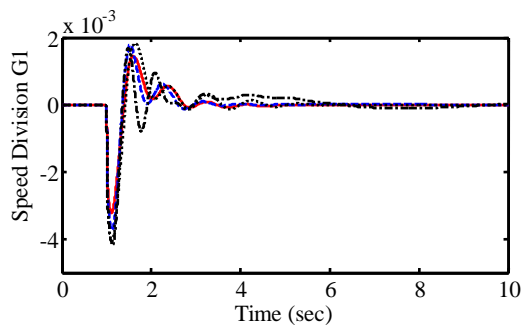
شکل (۱۷): خط پیوسته الگوریتم پیشنهادی (VCS)، خط چین (کلونی بهینه سازی ذرات اصلاح شده) و نقطه چین (GA)

از شرایط کاری بیان شده در جدول (۳) استفاده شده است. روش طراحی همانند قسمت قبل است. این سیستم دارای ۱۰ ماشین ۳۹ باس و ۶۸ خط است. کلیه اطلاعات این سیستم در مرجع [۴] داده شده است. این سیستم از سناریو زیر تشکیل شده است.



شکل (۱۶): سیستم ۱۰ ماشینه استاندارد New England
جدول (۳): شرایط مدنظر در طراحی کنترل کننده

شماره	شرایط کاری
1	Base case (normal operation)
2	Lines out: 3-18; 25-26
3	Lines out: 4-14; 16-17
4	Line out: 6-11
5	Load increase 20%
6	Load reduction 20%

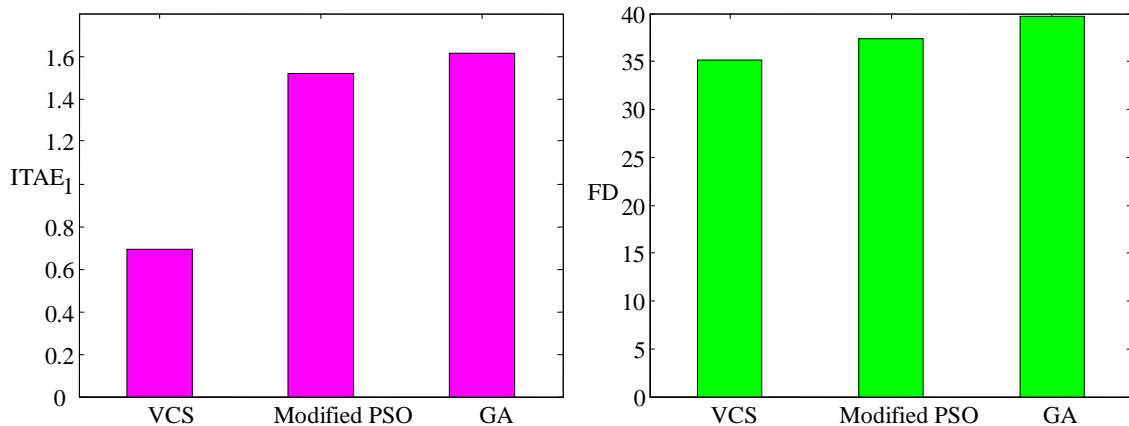


شکل (۱۸): تغییرات فرکانس خروجی برای چند ماشین نمونه، خط پیوسته الگوریتم پیشنهادی (کلونی جستجوی ویروس)، خط چین (کلونی بهینه‌سازی ذرات اصلاح‌شده) و نقطه‌چین (GA)

$$ITAE = 1000 \times \sum_{i=1}^{N_G} \int_0^{t_{sim}} t \cdot (|\Delta \omega_i|) dt \quad (31)$$

$$FD = \frac{\sum_{i=1}^{N_G} ((500 \times OS_i)^2 + (1700 \times US_i)^2 + T_{s,i}^2)}{N_G} \quad (32)$$

نتایج عددی معیار عملکرد FD و ITAE برای سیستم مورد مطالعه در مقایسه با روش اجتماع ذرات بهبودیافته و الگوریتم ژنتیک در شکل (۱۹) نشان داده شده است. فرمول‌بندی FD و ITAE به صورت زیر بیان می‌شود:



شکل (۱۹): مقایسه عملکرد سیستم براساس معیارهای عددی FD و ITAE بین الگوریتم کلونی جستجوی ویروس، الگوریتم بهبودیافته اجتماع ذرات و الگوریتم استاندارد ژنتیک

کاری مختلف پیشنهاد شده است. کنترل‌کننده فازی پیشنهادی کارایی بهتری برای میراکردن اغتشاشات سیستم در شرایط بدکاری را داراست. همان گونه که در شکل‌ها نشان داده شده است براساس بررسی عملکرد کنترل‌کننده در حضور عدم قطعیت در پارامترهای سیستم، کنترل‌کننده پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته است. با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی پس از هر تغییر بار، تغییرات فرکانس سیستم با کمترین نوسان و در کم‌ترین زمان نشست به حالت عادی سیستم برمی‌گردد؛ درحالی‌که با کنترل‌کننده‌های دیگر، فرکانس نوسانات بیشتری دارد و دیرتر به حالت عادی برمی‌گردد. از سویی دیگر، آنالیزهای عددی انجام‌گرفته براساس توابع آزمون مختلف، نشان داده است الگوریتم توسعه یافته کلونی ویروس با داشتن جستجوی محلی و نهایی مناسب، عملکرد مناسبی داشته است. در روش پیشنهادی، تبادل اطلاعات بین ویروس‌ها و سلول میزبان براساس قوانین بهینه‌سازی گوسی و تئوری آشوب انجام می‌گیرد و این

نتایج به دست آمده از روش معرفی شده نشان از کارایی بهتر برای طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادی دارای سرعت همگرایی بالا و کارایی بهتری برای میرایی نوسانات فرکانس پایین و افزایش پایداری نسبی سیستم در شرایط مختلف بهره برداری نسبت به الگوریتم بهبودیافته اجتماع ذرات و الگوریتم ژنتیک دارد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به روش جدیدی برای کنترل سیستم غیرخطی چندماشینه پیشنهاد شده است. در این روش از کنترل‌کننده فازی-PID بهینه شده با الگوریتم بهبودیافته کلونی ویروس برای کاهش فراجش، زمان نشست و زمان اضافه ولتاژ خروجی سیستم مورد مطالعه استفاده شده است. به بیان دیگر، برای پوشش دادن به نقاط ضعف کنترل‌کننده‌های کلاسیک در میراکردن فرکانس سیستم در برابر اغتشاشات، از کنترل‌کننده فازی-PID در شرایط

عوامل به افزایش توانایی الگوریتم استاندارد کلونی ویروس منجر شده است.

مراجع

- [12] H. Alkhatib, J. Duveau, "Robust design of power system stabilizers using adaptive genetic algorithms," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 267- 272, 2010.
- [13] M. Derafshian, N. Amjady, "Optimal design of power system stabilizer for power systems including doubly fed induction generator wind turbines," *Energy*, Vol.84, No. 1, pp. 1-14, 2015.
- [14] G. Jahedi, M. Ardehali, "Genetic algorithm-based fuzzy-PID control methodologies for enhancement of energy efficiency of a dynamic energy system," *Energy Convers Manage*, Vol. 52, No. 1, pp. 725-732, 2011.
- [15] S.M. Abd-Elazim, E.S. Ali, "A hybrid Particle Swarm Optimization and Bacterial Foraging for optimal Power System Stabilizers design," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 46, pp. 334-341, 2013.
- [16] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar, S. Jalilzadeh, A. Safari, "Tuning of damping controller for UPFC using quantum particle swarm optimizer," *Energy Conversion and Management*, PP. 2299–2306, 2010.
- [17] E. Amoupour, "New Method Presentation for PID Controller Design Based on PSO-NM Hybrid Algorithm," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 63-76, 2017.
- [18] T. Hussein, A. L.Elshafei, A. Bahgat, "An indirect adaptive fuzzy power system stabilizer for a multi-machine power system," In *Proceeding of the WSEAS international conference on automatic control, modeling & simulation*. Istanbul, Turkey, pp. 24–29, 2007.
- [19] T. Hussein, M.S. Saad, A.L. Elshafei, A. Bahgat, "Robust adaptive fuzzy logic power system stabilizer, *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, No. 10, pp. 12104–12112, 2009.
- [20] M.D. Li, H. Zhao, X.W. Weng, T. Han, "A novel nature-inspired algorithm for optimization: Virus colony search," *Advances in Engineering Software*, Vol. 92, pp. 65-88, 2016.
- [21] H. Shayeghi, A. Ghasemi, "Day-ahead electricity prices forecasting by a modified CGSA technique and hybrid WT in LSSVM based scheme," *Energy Conversion and Management*, Vol. 74, pp. 482-491, 2013.
- [22] M. H. Moradi, S. M. Moosavi, A. R. Reisi, "Tuning of Power System Stabilizers in a MultiMachine Power System using C-Catfish PSO," *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, Vol. 6, No. 1, pp. 76-74, 2012.
- [23] A. Singh, "An artificial bee colony algorithm for the leaf- constrained minimum spanning tree problem," *Appl. Soft Comput. J.*, pp. 625-630, 2008.
- [1] P. Kundr, "Power System Stability and Control," New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [2] R. Hemmati, "Power system stabilizer design based on optimal model reference adaptive system," *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 311-318, 2018.
- [3] Md Shafiullah, Md Juel Rana, Md Shafiul Alam, M. A. Abido, "Online tuning of power system stabilizer employing genetic programming for stability enhancement," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, In press, 2018.
- [4] A. Salgotra, S. Pan, "Model based PI power system stabilizer design for damping low frequency oscillations in power systems," *ISA Transactions*, Vol. 76, pp. 110-121, 2018.
- [5] P. Dey, A. Bhattacharya, P. Das, "Tuning of power system stabilizer for small signal stability improvement of interconnected power system," *Applied Computing and Informatics*, In press, 2017.
- [6] M. Farahani, S. Ganjefar, "Intelligent power system stabilizer design using adaptive fuzzy sliding mode controller," *Neurocomputing*, Vol. 226, pp. 135-144, 2017.
- [7] D. Zou, S. Li, Z. Li, X. Kong, "A new global particle swarm optimization for the economic emission dispatch with or without transmission losses," *Energy Conversion and Management*, Vol. 139, pp. 45-70, 2017.
- [8] A. WA, R. Kumari, R. Rengaraj, "Economic and various emission dispatch using differential evolution algorithm," In: *Proceedings of the IEEE International conference on electrical energy systems*; pp. 74-78, 2016.
- [9] A.M. El-Zonkoly, A.A. Khalil, N.M. Ahmied, "Optimal tuning of lead-lag and fuzzy logic power system stabilizers using particle swarm optimization," *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, No. 2, pp. 2097-2106, 2009.
- [10] AL. Barreiros, MD. Ferreira, Jr T. Costa, Jr W. Barre, AP. Lopes, "A neural power system stabilizer trained using local linear controllers in a gain-scheduling scheme," *Electr Power Energy Syst*, Vol. 27, No. 7, pp. 473-479, 2005.
- [11] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar, A. Safari, R. Aghmasheh, "A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment," *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 4, pp. 696-702, 2010.

¹ Oveshoot

² Undershoot