



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 13, No. 1, 2022
Research Paper

Low-Frequency Stability Based on Optimal Design of Proportional-Integral-Derferential-Fractional Order Fuzzy Controller Based on Intelligent Hybrid Algorithm

Mohammad Eslami ^{*1}

¹ Dept. of Electrical Engineering, Chabahar Branch, Islamic Azad University, Chabahar, Iran

Abstract:

In this paper, a new fractional-order fuzzy controller named proportional fuzzy + integral fuzzy + deferential fuzzy (FP + FI α + FD β) is proposed. The proposed controller is single gain, integrate, derivative and fractional order in its structure. The controller has a structure with two adjustable fractions and is simply designed. This controller performs the stability process in a short time. The response time can also be changed by adjusting the coefficient of time scale α and β , which makes it more flexible and efficient compared to the classic PID controller. On the other hand, in the design of the proposed controller, the optimal adjustment of the controller gain and fuzzy members has turned into an optimization problem, which is done by a hybrid algorithm based on the VCS and the HBC colony (ABC) based on a function in the time domain. In the proposed hybrid algorithm, attempts have been made to take advantage of local and final search as the strengths of these controllers to dramatically reduce the possibility of locating in local points. Investigations of different load variation scenarios, better performance of the proposed controller facing load disturbances from the root mean square, rise and fall time, will show the number of oscillations, and the fall time of the frequency changes.

Keywords: intelligent hybrid algorithm, optimization, virus search colony, bee colony, fractional-order fuzzy controller, low-frequency oscillations.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.122232.1353>

مقاله پژوهشی

پایداری فرکانس پایین براساس طراحی بهینه کنترل کننده فازی تناسبی -

انتگرالی - مشتقی مرتبه کسری مبتنی بر الگوریتم ترکیبی هوشمند

محمد اسلامی^۱

۱- استادیار، گروه مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد چابهار - چابهار - ایران

m.eslami@iauzah.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک کنترل کننده فازی مرتبه کسری جدید با نام فازی تناسبی + فازی انتگرالی + فازی مشتقی $(FP+FI^\alpha+FD^\beta)$ پیشنهاد شده است. کنترل کننده پیشنهادی در ساختار خود یک بهره، انتگرال گیر و مشتق گیر با مرتبه کسری است. کنترل کننده مدنظر دارای ساختاری با دو مرتبه کسری قابل تنظیم است و به سادگی طراحی می شود. این کنترل کننده، عمل پایداری را در زمان کوتاهی انجام می دهد. همچنین زمان پاسخ دهی می تواند با استفاده از تنظیم ضریب مقیاس زمانی α و β تغییر یابد که سبب می شود نسبت به کنترل کننده PID کلاسیک^۲، انعطاف پذیری و عملکرد بهتری داشته باشد. همچنین، در طراحی کنترل کننده پیشنهادی، تنظیم بهینه بهره های کنترل کننده و اعضای فازی به یک مسئله بهینه سازی تبدیل شده که با الگوریتم ترکیبی جدیدی مبتنی بر کلونی جستجوی ویروس (VCS^V) و کلونی زنبور عسل (ABC^E) با نام $(HVCS-ABC^E)$ براساس تابعی در حوزه زمان انجام شده است. در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، سعی شده است از نقاط قوت جستجوی محلی و نهایی آنها بهره گرفته شود تا امکان قرار گرفتن در نقاط محلی به صورت چشم گیری کاهش یابد. بررسی به ازای سناریوهای مختلف تغییرات بار، عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی را در مواجهه با اغتشاش بار از نقطه نظر ریشه میانگین مربعات، فراجش و فروجش، تعداد نوسانات و زمان نشست تغییرات فرکانس نشان می دهد.

واژه های کلیدی: الگوریتم ترکیبی هوشمند، بهینه سازی، کلونی جستجوی ویروس، کلونی زنبور عسل، کنترل کننده فازی

مرتبه کسری، نوسانات فرکانس کم.

۱- مقدمه

می یابیم که هر بخش بر بخش دیگری تأثیر می گذارد. در راستای این توسعه که با مزایا و نکات مفید مختلفی همراه است، در شاخه دینامیک سیستم های غیرخطی قدرت نیز مانند سایر شاخه ها مسائل جدیدی ارائه شده است؛ از جمله، پدیده نوسانات با فرکانس کم، تشدید زیر سنکرون و افت ولتاژ [۱-۳].

در این میان، پژوهشگران به ایجاد نوسانات با فرکانس کم توجه بیشتری داشته اند. سیستم غیرخطی در بحث پایداری دینامیکی مطالعه شده از اهمیت بسزایی برخوردار است. ایجاد چنین اتفاقات ناخواسته ای در شبکه، انحراف عملکرد سیستم از نقطه عملکرد پایداری را به همراه خواهد داشت. در چنین شرایطی، با فرض از دست نرفتن سنکرون بودن شبکه، سیستم مطالعه شده با نوسانات فرکانس

توسعه سیستم های امروزی و افزایش روزافزون مصرف کنندگان انرژی الکتریکی، سبب شده است توسعه سیستم ها و در نتیجه آنها ماهیت غیرخطی، به صورت گسترده ای توسعه یابد؛ به گونه ای که در سیستم های امروزی شاهد مدل های توسعه یافته به وسعت یک قاره ایم که با مدل سازی آنها به یک مدل یکپارچه و منسجم دست

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸

نام نویسنده مسئول: محمد اسلامی

نشانی نویسنده مسئول: : ایران - چابهار - منطقه آزاد تجاری -

دانشگاه آزاد اسلامی واحد چابهار - گروه برق

کم، توانایی حرکت به نقطه تعادل جدید را خواهد داشت. زمانی که یک ژنراتور الکتریکی به تنهایی کار می‌کند، نوسانات با فرکانس کم به دلیل میرایی ذاتی به شکل نسبتاً پذیرفتنی محیا خواهد بود؛ اما وجود برخی از عناصر مانند تحریک‌کننده‌های سریع، با اثر دینامیک قسمت‌های مختلف شبکه ممکن است باعث ایجاد میرایی منفی شده است؛ به گونه‌ای که نوسانات فرکانس کم شبکه به شکل مناسبی میرا نمی‌شود یا حتی از میرایی منفی برخوردار می‌شوند و در نهایت، سیستم مطالعه‌شده پایداری خود را از دست می‌دهد [۴-۵]. پایداری سیستم به وجود دو مؤلفه گشتاور سنکرون‌کننده^۶ و گشتاور میراکننده^۷ برای هر ماشین سنکرون بستگی دارد. کمبود گشتاور سنکرون‌کننده به ناپایداری از طریق رانش غیر نوسانی^۸ زاویه روتور منجر می‌شود. همچنین، کمبود گشتاور میراکننده هم به ناپایداری نوسانی منجر می‌شود [۶].

همراه با پیشرفت‌های چشمگیر در تئوری سیستم‌ها و کنترل، روش‌های جدید برای طراحی کنترل‌کننده‌ها ارائه شده است؛ برای نمونه، کنترل‌کننده‌های طرح‌شده براساس تئوری‌های کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم، شبکه‌های عصبی مصنوعی و کنترل فازی [۷-۹]. در همه این روش‌ها سعی شده است نقایص موجود در طراحی کلاسیک مرتفع شوند؛ به طوری که کنترل‌کننده به شکل مؤثرتری بر پایداری سیستم و بهبود میرایی نوسانات اثر گذارد. در همه این روش‌ها سعی شده است نقایص موجود در طراحی کلاسیک مرتفع شوند؛ به طوری که کنترل‌کننده به شکل مؤثرتری بر پایداری سیستم و بهبود میرایی نوسانات اثر گذارد.

در یک دسته‌بندی کلی، روش‌های ارائه‌شده به روش‌های کلاسیک و هوش بهینه‌سازی تقسیم‌بندی می‌شوند: در روش‌های کنترل‌کننده کلاسیک، سرعت و فرکانس به عنوان سیگنال کنترلی به تنهایی یا به صورت ترکیب‌های متعدد برای تولید گشتاور اضافی رتور برای میرا کردن نوسانات فرکانس پایین استفاده شده است. پایداری‌ساز پیش‌فاز - پس‌فاز کلاسیک در موارد متعددی به صورت فیزیکی تحقق یافته و به‌طور وسیع در صنعت برق استفاده شده است. اصول عملکرد این کنترل‌کننده مبتنی بر

مفاهیم گشتاور میرایی و سنکرونیزه در ژنراتور است [۱۰]. باید توجه داشت برای طراحی کنترل‌کننده‌های میراگر کلاسیک از مدل خطی شده حول نقطه کار معین استفاده می‌شود و فرض بر آن است که مدل دقیقی از سیستم در دسترس بوده و پارامترهای آن ثابت است. با توجه به اینکه ویژگی‌های برجسته سیستم مدنظر، ماهیت متغیر بارگذاری، تولید، مصرف و تغییر آرایش سیستم است، چنانچه نقطه کار سیستم تغییر کند، کنترل‌کننده‌های کلاسیک طراحی شده براساس پارامترهای ثابت، مدل عملکرد سیستم را مختل می‌کند و کارایی مناسبی نخواهند داشت [۱۱]. به عبارت دیگر، عیب عمده کنترل‌کننده‌های کلاسیک، بی‌توجهی به مسئله عدم قطعیت مدل و حساسیت به نقطه کار و در نتیجه، نبود عملکرد مقاوم است. همچنین کنترل‌کننده‌های تطبیقی و ساختار متغیر به دلیل پیچیدگی الگوریتم کنترلی و مسئله کلیدزنی و استفاده از متغیرهای حالت در کاربردهای عملی چندان رونق نیافته‌اند [۱۲].

استفاده از روش‌های هوشمند در کنترل سیستم‌های پیچیده و غیرخطی در سال‌های اخیر به‌صورت ویژه‌ای در زمینه‌های مختلف علوم و فن‌آوری به کار گرفته شده است. روش‌های بهینه‌سازی سنتی دربرگیرنده تکنیک‌های مبتنی بر مشتق‌گیری هستند. چنین روش‌هایی نیرومند بوده و کارایی آنها در حل انواع مختلف مسائل بهینه‌سازی به اثبات رسیده است [۱۳-۱۴].

در مرجع [۱۵] مقایسه‌ای بین کنترل‌کننده کلاسیک پایداری‌ساز سیستم قدرت و پایداری‌ساز فازی برای سیستم چند ماشینه به کمک الگوریتم اجتماع ذرات ارائه شده است. در روش پیشنهادی از ساختار خطی‌سازی بهره گرفته شده است. از الگوریتم پیشنهادی برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده کلاسیک و اعضای فازی استفاده شده است. در [۱۶] یک روش برای تنظیم بلادرنگ پارامترهای پایداری‌ساز سیستم قدرت سنتی با استفاده از شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی ارائه شده است 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. ورودی‌های نوروها از طریق دنریت‌ها وارد می‌شوند که به خروجی

نورون‌های دیگر از طریق سیناپس متصل‌اند. در مرجع [۱۷] از الگوریتم $QPSO^9$ استفاده شده است؛ این الگوریتم هم پارامتر کمتری نسبت به PSO^{10} دارد، هم قدرتمندتر از PSO است؛ همچنین در مقایسه با PSO نتایج بهتری را به دست داده است. برای اطمینان از اینکه این روش به اندازه کافی نیرومند است، در محدوده وسیعی از موقعیت بهره‌برداری و در پیکربندی‌های مختلف سیستم بررسی شده است. اثر کنترل‌کننده پیشنهادی در حوزه زمانی غیرخطی و بررسی شاخص‌های مختلف تحت اغتشاشات متفاوت و محدوده وسیعی از شرایط باری مختلف بررسی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند کنترل‌کننده $UPFC^{11}$ بر پایه $QPSO$ قابلیت میراسازی نوسانات فرکانس کوچک و بالابردن پایداری دینامیکی سیستم قدرت را به نحو احسن دارد و در مقایسه با PSO بسیار مناسب‌تر است. در مرجع [۱۸] از الگوریتم دیگری به نام COA^{12} به جای الگوریتم PSO استفاده شده است. از ویژگی‌های این الگوریتم، اجرای آسان، زمان اجرای کم، مکانیزم قوی در فرار از مقادیر بهینه محلی‌اند که برای کارهای مهندسی امیدبخش‌اند.

در [۱۸] روشی کنترلی تناسبی - انتگرالی مشتقی مرتبه کسری برای کنترل بار - فرکانس ریزشبهک ارائه شده است که پارامترهای کنترل‌کننده با الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی و الگوریتم جستجوی الگو بهینه شده‌اند. ترکیب الگوریتم - که برای جستجوی کلی استفاده می‌شود و الگوریتم ترکیبی برای جستجوی محلی استفاده می‌شود - سبب افزایش سرعت همگرایی شده است. در مدل‌سازی ریزشبهک از مدلی غیرخطی - با در نظر گرفتن اثر پدیده‌هایی مانند اشباع، باند راکد، محدودیت تغییر نرخ توان استفاده شده است.

در [۱۹] از کنترل‌کننده PID مرتبه کسری ($FOPID^{13}$) به دلیل عملکرد مقاوم و ساختار ساده آن، برای کنترل فرکانس ریزشبهک جزیره‌ای استفاده شده است. با استفاده از سیستم فازی، ورودی کنترل‌کننده $FOPID$ ، تولید و عملکرد کنترل‌کننده بهبود یافته است. از الگوریتم رقابت استعماری برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده $FOPID$ فازی پیشنهادی بهره گرفته شده است. مقایسه طرح کنترلی پیشنهادی با

کنترل PID کلاسیک و $FOPID$ ، به‌ازای سناریوهای مختلف تغییرات بار، عملکرد بهتر کنترل‌کننده پیشنهادی را در مواجهه با اغتشاش بار از نقطه‌نظر ریشه میانگین مربعات، فرجهش و فروجهش، تعداد نوسانات و زمان نشست تغییرات فرکانس نشان می‌دهد. در [۲۰] با بهره‌گیری از سیستم‌های فازی و مرتبه کسری، کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی فازی مرتبه کسری برای هدایت سیستم کوادروتور به منظور بهبود سرعت پاسخ‌گویی، دقت ردیابی و مقاومت سیستم کنترل نسبت به کنترل‌کننده سنتی تناسبی - انتگرالی - مشتقی طراحی شده است. ساختار کنترل‌کننده زیرسیستم دینامیکی زیرتحرک کوادروتور براساس تئوری کنترل حلقه داخلی - بیرونی طراحی شده که در آن از تحلیل سینماتیک معکوس صریح و تحلیلی سیستم برای ارتباط حلقه‌های داخلی و بیرونی استفاده شده است. در [۲۱] پایدارساز مبتنی بر منطق فازی ارائه شده است. در [۲۲] کنترل‌کننده مبتنی بر فیدبک خروجی شمای غیرمتمرکز داشته و تنها نیازمند مدهای محلی در واحد تولیدی بوده که از حیث پیاده‌سازی آسان‌تر است. هرچند روش پیشنهادی کارایی مناسبی در میراسازی نوسانات از خود نشان می‌دهد، در اختلالات بزرگ‌تر نمی‌تواند مقاوم‌بودن خود را حفظ کند. این مشکل در اختلالات سیگنال ورودی برای کنترل‌کننده فازی ایجاد می‌شود.

به‌تازگی استفاده از کنترل‌کننده PID مرتبه کسری $FOPID^{14}$ به دلیل ساختار انعطاف‌پذیر و مقاوم برای کنترل سیستم‌های مختلف در مقالات متعددی، معرفی و در کنترل فرایندهای مختلف استفاده شده‌اند.

در [۲۳] از کنترلر تناسبی - انتگرالی - مشتق‌گیر مرتبه کسری بهینه‌شده با الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری - جستجوی الگو برای کنترل فرکانس هر یک از مناطق ریزشبهک و نیز کنترل توان بین مناطق متصل به هم استفاده شده است؛ به طوری که عدم قطعیت پارامترهای ریزشبهک‌ها در نظر گرفته شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی در حلقه ثانویه هر یک ریزشبهک‌ها قرار داده شده است. عملکرد مناسب و مقاوم در برابر عدم قطعیت پارامترهای ریزشبهک‌ها در شبیه‌سازها نشان داده شده است.

کنترل‌کننده $FOPID$ نسبت به کنترل‌کننده‌های مرتبه

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

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

که در آن، T_e گشتاور الکتریکی، δ زاویه روتور، T'_{do} ثابت زمانی مدار تحریک، ω سرعت روتور، K_A بهره رگولاتور، P_m توان ورودی مکانیکی، T_A ثابت زمانی رگولاتور، P_e توان خروجی الکتریکی، v_{ref} ولتاژ مرجع، E'_q ولتاژ داخلی ژنراتور، v ولتاژ ترمینال و E'_q ولتاژ داخلی ژنراتور است. با توجه به اینکه تولید در سیستم قدرت بر پایه ماشین‌های سنکرون (ژنراتورها) استوار است، شرط لازم برای عملکرد پذیرفتنی سیستم این است که همه ماشین‌های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون باقی بمانند. معادلات مکانیکی بر مبنای پریونیت چندماشینه به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_B (S_{mi} - S_{mi0}) = \omega_i - \omega_{i0} \quad (6)$$

$$2H_i \frac{dS_{mi}}{dt} = -D_i (S_{mi} - S_{mi0}) + T_{mi} - T_{ei} \quad (7)$$

که H_i ، T_{mi} و T_{ei} به ترتیب اینرسی و گشتاورهای مکانیکی و الکتریکی ماشین‌اند. معادلات استاتور بر حسب پریونیت بدون در نظر گرفتن توالی صفر و حالت گذرای استاتور به صورت زیرند:

$$-(1+S_{mi0})\psi_{qi} - R_{ai} i_{di} = v_{di} \quad (8)$$

$$(1+S_{mi0})\psi_{di} - R_{ai} i_{qi} = v_{qi} \quad (9)$$

اندیس i برای آمین ماشین، S_{mo} لغزش اولیه ماشین است که در بیشتر موارد صفر در نظر گرفته می‌شود. مقدار لغزش برای معادلات بالا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S_{mi0} = \frac{\omega_{i0} - \omega_B}{\omega_B} \quad (10)$$

اگر از حالات گذرای استاتور، صرف نظر و نیز $S_{mo}=0$ لحاظ شود، معادلات چندماشینه به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

صحیح PID دارای دو پارامتر بیشتر در ساختار خود است؛ یکی توان کسری انتگرال گیر و دیگری توان کسری مشتق گیر که سبب ایجاد دو درجه آزادی بیشتر در طراحی کنترل کننده و بهبود دینامیک سیستم می‌شود؛ از این رو، از این کنترل کننده در سال‌های اخیر برای کنترل فرکانس سیستم‌های مختلف استفاده شده است [۲۳].

در این مقاله به منظور دستیابی به کنترل کننده مقاوم که بتواند ویژگی‌های سیستم فازی و FOPID را حفظ کند، یک کنترل کننده فازی-FOPID با ساختار $(FP+FI^a+FD^b)$ پیشنهاد شده است. همچنین، تنظیم بهینه پارامترهای این کنترل کننده به یک مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر انتگرال مربعات حاصل ضرب زمان و تغییرات فرکانس تبدیل شده که در نهایت، با الگوریتم ترکیبی مبتنی بر کلونی جستجوی ویروس [۲۴] و کلونی زنبور عسل [۲۵] به حل آن پرداخته شده است. الگوریتم کلونی جستجوی ویروس [۲۴] و کلونی زنبور عسل [۲۵] دو روش موفق برای سال‌های اخیرند که براساس مطالعه انجام گرفته نشان داده شده است که ترکیب این دو می‌تواند به جستجوی محلی و نهایی بالاتری دست یابد.

۲- مدل سازی مسئله مطالعه شده

۲-۱- مدل سازی غیرخطی سیستم چندماشینه

مدل غیرخطی سیستم تک ماشین با مجموعه‌ای از معادلات جبری - دیفرانسیلی توصیف شده که ناشی از مدل‌های ژنراتورها، بارها و سایر ادوات همچون سیستم‌های کنترل است که از طریق معادلات جبری شبکه به هم اتصال داده می‌شوند. در این مقاله، ژنراتور سیستم با مدل دومحوری [۱] برای شبیه‌سازی در حوزه زمان استفاده می‌شود که معادلات آن به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\mathcal{E}_i = \omega_b (\omega_i - 1) \quad (1)$$

$$\mathcal{E}'_i = \frac{1}{M_i} (P_{mi} - P_{ei} - D_i (\omega_i - 1)) \quad (2)$$

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

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (14)$$

که در رابطه بالا $n-1 \leq \alpha < n$ و n یک عدد صحیح

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{(x-1)} dt, x > 0$$

و تابع گامای اوپلر است

که در حالت خاص $n=x$ برابر با $\Gamma(n) = (n-1)!$ است.

معادله دیفرانسیل یک کنترل کننده $PI^\alpha D^\beta$ مرتبه کسری براساس تابع تبدیل به صورت زیر بیان می شود:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I D_t^{-\alpha} e(t) + K_D D_t^\beta \quad (15)$$

براساس تابع تبدیل لاپلاس، معادله تبدیل پیوسته به صورت زیر فرموله می شود:

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\alpha} + K_D s^\beta \quad (16)$$

برای کاربرد این عملگر مرتبه کسری در تحقیقات عملی باید یک تقریب از آن به وسیله توابع انتقال مرتبه صحیح به دست آید. در اینجا از تقریب Oustaloup بهره گرفته شده است [۲۶]:

$$s^\beta = I \prod_{i=-P}^P \frac{s + \omega_i'}{s + \omega_i} \quad (17)$$

$$\omega_i' = \omega_l \left(\frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{\frac{i+P+0.5(1-\beta)}{2P+1}}$$

$$\omega_i = \omega_l \left(\frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{\frac{i+P+0.5(1+\beta)}{2P+1}} \quad (18)$$

$$I = \left(\frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{\frac{\beta}{2}} \prod_{i=-P}^P \frac{\omega_i}{\omega_i'}$$

حال با تعریف مدل مرتبه کسری FOPID، استراتژی کنترل کننده فازی پیشنهادی بیان می شود. استراتژی کنترل کننده پیشنهادی به گونه ای است که ضرایب کنترل کننده فازی $PI^\alpha D^\beta$ در ساختار $FP+FI^\alpha+FD^\beta$ با منطق فازی تنظیم می شوند. الگوریتم ترکیبی کلونی جستجوی ویروس و کلونی زنبور عسل با عنوان HVCS-ABC برای بهبود عملکرد کنترل کننده مدنظر که دارای سرعت همگرایی و کارایی خوبی برای بهینه یابی توابع غیرخطی است، برای تنظیم بهینه پارامترهای آن شامل ضرایب، توابع عضویت، ضرایب وزنی FOPID و قواعد فازی در چند مرحله

$$v_{di} = -i_{di} R_{ai} - x_{qi} i_{qi} + E_{di} \quad (11)$$

$$v_{qi} = -i_{qi} R_{ai} + x_{di} i_{di} + E_{qi} \quad (12)$$

۲-۱- کنترل کننده فازی مرتبه کسری - FOPID

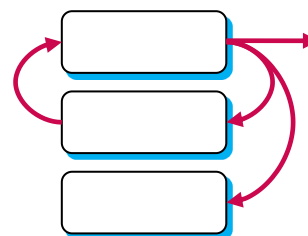
حسابان کسری^{۱۵} (مشتق و انتگرال گیر با مرتبه کسری) از مدت زمان بسیار طولانی شایان توجه ریاضیدان ها قرار گرفته است؛ ولی کاربرد آن در مسائل مهندسی، به ویژه در مسائل مدل سازی و کنترل، سابقه طولانی ندارد. به دلیل آزادی عملی که روی مرتبه مشتق گیر و انتگرال گیر وجود دارد، می توان سیستم های فیزیکی را با دقت بسیار زیادی مدل کرد. در زمینه کنترل سیستم ها نیز وضعیت به همین منوال است؛ یعنی می توان کنترل کننده هایی با کارایی بسیار بالا، چه برای سیستم های با مرتبه کسری و چه برای سیستم های با مرتبه صحیح طراحی کرد. در این بخش ایده کنترل کننده فازی FOPID پیشنهادی برای پایداری فرکانس کم ارائه شده است. قبل از بیان مدل فازی $(FP+FI^\alpha+FD^\beta)$ پیشنهادی، ابتدا مدل کنترل کننده مرتبه کسری $PI^\alpha D^\beta$ بیان می شود. کنترل کننده $PI^\alpha D^\beta$ مرتبه کسری یک ساختار مناسب با مرتبه کسری است که برای اهداف کنترلی به کار گرفته می شود. پودلانی در سال ۱۹۹۹ این کنترل کننده را نخستین بار معرفی کرد [۲۶]. یک کنترل کننده FOPID با پنج پارامتر، شامل بهره تناسبی، بهره انتگرالی، بهره مشتقی، مرتبه انتگرال گیری و مرتبه مشتق گیری مشخص می شود. عملگر کلی برای محاسبه مشتق و انتگرال و تناسبی به صورت زیر بیان می شود:

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha}, & \text{Re}(\alpha) > 0 \\ 1, & \text{Re}(\alpha) = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\alpha}, & \text{Re}(\alpha) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

با در نظر گرفتن تعریف مرتبه کسری و تعمیم مفهوم مشتق، $\frac{d^n y(t)}{dt^n}$ عدد صحیح n به مفهوم $\frac{d^\alpha y(t)}{dt^\alpha}$ با عدد غیر صحیح α بیان می شود. به صورت مشابه، این مفهوم برای انتگرال با مرتبه کسری β نیز بیان می شود. براساس مفهوم Caputo مرتبه کسری به صورت زیر تعریف می شود:

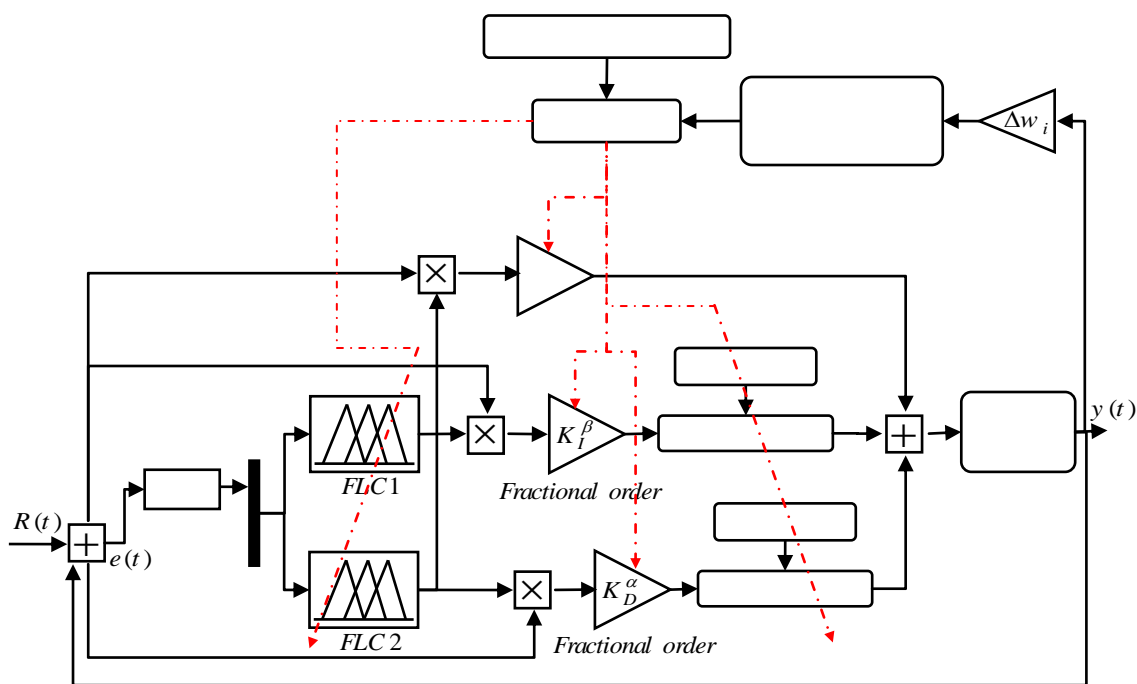
شکل ۲ نشان داده شده است. ایده این کنترل کننده از این دیدگاه ناشی می شود که کنترل کننده PD^{۱۶} فازی پاسخ سیستم را سریع تر می کند و مقدار حداکثر فرجهش را کاهش می دهد و کنترل کننده انتگرالی خطای حالت ماندگار را حذف می کند؛ بنابراین، با ترکیب دو نوع کنترل کننده مذکور با یک کلید فازی می توان ضمن بهبود عملکرد کنترل کننده، تمام خصوصیات کنترل کننده PD و انتگرالی را به دست آورد. همچنین کنترل کننده مدنظر دارای ساختاری ساده با دو پارامتر قابل تنظیم است و به سادگی طراحی می شود. این کنترل کننده، عمل پایداری را در زمان کوتاهی انجام می دهد. همچنین زمان پاسخ دهی می تواند با استفاده از تنظیم ضریب مقیاس زمانی α و β تغییر یابد.

استفاده می شود. شکل ۱ اصول طراحی کنترل کننده پیشنهادی را نشان می دهد که لایه اول کنترل کننده FOPID و لایه دوم منطق فازی است.



شکل (۱): طرح واره کلی سیستم کنترل پیشنهادی

در این مقاله نیز برای بهینه سازی رفتار کنترل کننده های فازی پیشنهادی از الگوریتم ترکیبی HVCS-ABC بهره گرفته شده است. عملکرد این روش در تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی به صورت طرح گونه در



شکل (۲): ساختار کنترل کننده فازی - PID تنظیم شده با الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی

الف) انتشار ویروس: الگوریتم پیاده روی، بیان کننده رفتار ویروس در یافتن سلول میزبان است. روش پیاده روی گوسی یک روش مناسب برای مدل کردن این رفتار و دوری گزیدن از جواب بهینه محلی است که با رابطه زیر فرموله می شود:

$$V_{pop_i} = \text{Gaussian}(G_{best}^g, \tau) + (r_1 G_{best}^g - r_2 V_{pop_i}) \quad (19)$$

که i شاخص انتخاب تصادفی از مجموعه $\{1, 2, \dots, N\}$

۳- الگوریتم ترکیبی HVCS-ABC

۳-۱- الگوریتم استاندارد کلونی جستجوی

ویروس

در این بخش، معادلات ریاضی الگوریتم استاندارد کلونی جستجوی ویروس بیان می شود. برای توضیحات بیشتر به مرجع [۲۴] رجوع شود.

$$X_{mean}^{g+1} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^{\gamma} \omega_i V_{pop_i^{best}} \mid \omega_i = \quad (22)$$

$$\ln(\gamma+1) / \left(\sum_{j=1}^{\gamma} (\ln(\gamma+1) - \ln(j)) \right)$$

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

$$P_{\sigma}^{g+1} = (1 - C_{\sigma}) P_{\sigma}^g + \sqrt{C_a (2 - C_{\sigma}) \gamma_{\omega}} \quad (23)$$

$$\frac{1}{\sigma^g} (C^g)^{-0.5} (X_{mean}^{g+1} - X_{mean}^g)$$

$$P_C^{g+1} = (1 - C_C) P_C^g + \quad (24)$$

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

که $\gamma_w^{-1} = \sum_{i=1}^{\gamma} w_i^2 \cdot (C^g)^{-0.5}$ متقارن، مثبت و برقرارکننده شرط $(C^g)^{-0.5} (C^g)^{-0.5} = (C^g)^{-1}$ 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 می‌شوند؛ 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:

$$\sigma^{g+1} = \sigma^g \times \exp\left(\frac{C_{\sigma}}{d_{\sigma}} \left(\frac{\|P_{\sigma}^{g+1}\|}{E\|N(0,1)\|} - 1\right)\right) \quad (25)$$

$$C^{g+1} = (1 - C_1 - C_{\gamma}) C^g + C_1 P_C^{g+1} (P_C^{g+1})^T + \quad (26)$$

$$C_{\gamma} \sum_{i=1}^{\gamma} w_i \frac{(V_{pop_i^{best}} - X_{mean}^g) (V_{pop_i^{best}} - X_{mean}^g)^T}{\sigma^g} \cdot \frac{(V_{pop_i^{best}} - X_{mean}^g) (V_{pop_i^{best}} - X_{mean}^g)^T}{\sigma^g}$$

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

$$C_1 = \frac{1}{\gamma_w} \left((1 - \frac{1}{\gamma_w}) \min\left\{1, \frac{2\gamma_w - 1}{(N + 2)^2 + \gamma_w}\right\} + \right. \quad (27)$$

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

و N تعداد کل جمعیت است. G_{best}^g بهترین جواب تولیدشده در تکرار g و r_1 و r_2 دو متغیر تصادفی بین ۰ و ۱ است. برای پارامتر گوسی، انحراف معیار τ با رابطه $\log(g) / g \cdot (V_{pop_i} - G_{best}^g)$ به دست می‌آید. در فرمول فوق جهت بردار $(r_1 \cdot G_{best}^g - r_2 \cdot V_{pop_i})$ برای دوری‌گزیدن از نقاط محلی است که V_{pop_i} بیان‌کننده 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 پایین‌تر سوق پیدا می‌کند و هدایت بهتری به سمت جواب بهینه نهایی ایجاد می‌کند. همچنین (G_{best}^g, τ) تضمین‌کننده تولید جواب‌های بهتر بر اساس هدایت جواب نهایی دارد که با بردار $(r_1 \cdot G_{best}^g - r_2 \cdot V_{pop_i})$ جهت‌گیری می‌کند.

ب- تأثیرپذیری سلول میزبان: تأثیرپذیری سلول میزبان با مدل CMA-ES مبتنی بر ماتریس کوواریانس با گام‌های زیر مدل می‌شود:

گام اول: به روزرسانی Hpop با رابطه:

$$H_{pop_i^g} = X_{mean}^g + \sigma_i^g \times N_i(0, C^g) \quad (20)$$

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

$$X_{mean}^0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{pop_i} \quad (21)$$

گام دوم: بهترین بردار γ از بخش قبلی، انتخاب و بردار والدین با مرکزیت زیر در نظر گرفته شود:

[۲۵] رجوع شود. نحوه کدگذاری این الگوریتم عبارت است از:

۱. مقداردهی اولیه به عنوان جواب های اولیه X_{ij} ؛
۲. محاسبه جواب های اولیه در تابع هدف؛
۳. تکرار اولیه $cycle=1$ ؛
۴. فراهم کردن جواب های جدید براساس یافتن منبع تغذیه جدید V_{ij} در همسایگی X_{ij} برای تولید جواب های جدید از فرمول زیر استفاده می شود:

$$V_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} (x_{ij} - x_{k,j}) \quad (31)$$

که در این فرمول k جواب به دست آمده در همسایگی از i و ϕ_{ij} یک عدد تصادفی بین $(-1, 1)$ است؛

۵. انتخاب بهترین منبع یا جواب بهتر بین X_{ij} و V_{ij} ؛
۶. محاسبه میزان احتمال برای جواب های X_{ij} براساس فرمول زیر:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \quad (32)$$

درحقیقت برای به دست آوردن شایستگی جواب ها از فرمول زیر استفاده می شود:

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1+fit_i} & f_i \geq 0 \\ 1+abs(f_i) & f_i < 0 \end{cases} \quad (33)$$

جواب های P_i بین $(-1, 1)$ است.

۱. تولید جواب های جدید (منابع جدید) V_i براساس زنبورهای تماشاگر از جواب های X_i و تعیین میزان احتمال آنها P_i ؛
۲. انتخاب بهترین جواب (پرخورترین زنبور) بین جواب های X_{ij} و V_{ij} ؛
۳. تعیین منابع فاسد و جایگزین منابع تصادفی با آن منابع تصادفی ایجاد شده توسط زنبور پیش آهنگ X_i با استفاده از فرمول زیر:

که $0 \leq C_r \leq 1$ نرخ به روزرسانی برای ماتریس کوواریانس C است.

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 مطالعه شده:

$$Pr_{rank(i)} = \frac{N - i + 1}{N} \quad (28)$$

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:

$$\begin{cases} V_{pop_{i,j}}^- = V_{pop_{k,j}} - rand \cdot (V_{pop_{h,j}} - V_{pop_{i,j}}) & \text{if } r > Pr_{rank(i)} \\ V_{pop_{i,j}}^- = V_{pop_{i,j}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

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

$$x_{ij} = low_{ij} + rand \times (up_{ij} - low_{ij}) \quad (30)$$

۳-۲- الگوریتم استاندارد کلونی زنبور عسل

الگوریتم های غیر مبتنی بر فرومن، عموماً برگرفته از رفتار زنبورهای عسل اند. الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی یک تکنیک برای حل مسائل بهینه سازی است که بر مبنای رفتار زنبورهای عسل در طبیعت است. روابط کلی آن در این بخش بیان می شود. برای مطالعه بیشتر به مرجع

ترکیب یا هیبرید شدن شامل ترکیب دو یا تعداد بیشتری از چیزهای مختلف است که سبب رسیدن به نتیجهٔ بهتری نسبت به حالت‌های مجزای آنها می‌شود. الگوریتم کلونی زنبورعسل و الگوریتم کلونی جستجوی ویروس دارای خصوصیات شبیه‌به‌هم‌اند. از جمله هر دو دارای جمعیت تصادفی اولیه و دارای مقدار شایستگی برای ارزیابی جمعیت‌اند؛ بنابراین، ترکیب این دو روش باعث ایجاد یک الگوریتم ترکیبی کارآمد می‌شود. شکل ۳ ساختار کلی روش پیشنهادی HVCS-ABC را نشان می‌دهد. الگوریتم ترکیبی VCS و ABC با یک جمعیت اولیه شروع می‌شود. هرگاه مسئله N بعدی باشد، الگوریتم ترکیبی $4N$ عضوی است که به صورت کاملاً تصادفی تولید می‌شود. $4N$ عضو براساس میزان شایستگی، مرتب و $2N$ عضو بالایی به‌عنوان جواب اولیه وارد VCS می‌شود و جمعیت جدید $2N$ عضوی با روابط ارتقای الگوریتم ABC ایجاد می‌شود. به $2N$ عضو پایینی به‌عنوان زنبورهای جستجوگر، سازوکار بهینه‌سازی الگوریتم ABC اعمال می‌شود. در اعمال سازوکار بهینه‌سازی از جمعیت جدید ایجاد شده با الگوریتم VCS به‌عنوان تنظیم‌کننده استفاده می‌شود. همچنین بهترین عضو این جمعیت جدید و هر عضو متناظر آن به‌عنوان یک همسایگی استفاده می‌شود. جمعیت حاصل از اعمال سازوکار جستجوی منبع شهد با جمعیت ایجاد شده از الگوریتم VCS ادغام می‌شود و $4N$ عضو جدید براساس شایستگی، مرتب‌سازی و روند قبلی تا حصول همگرایی تکرار می‌شود

$$x_{ij} = \min_j + rand(0,1) \times (\max_j - \min_j) \quad (34)$$

۴. ذخیره‌کردن بهترین جواب (منبع تغذیه با کیفیت) که تا این مرحله به دست آمده است.

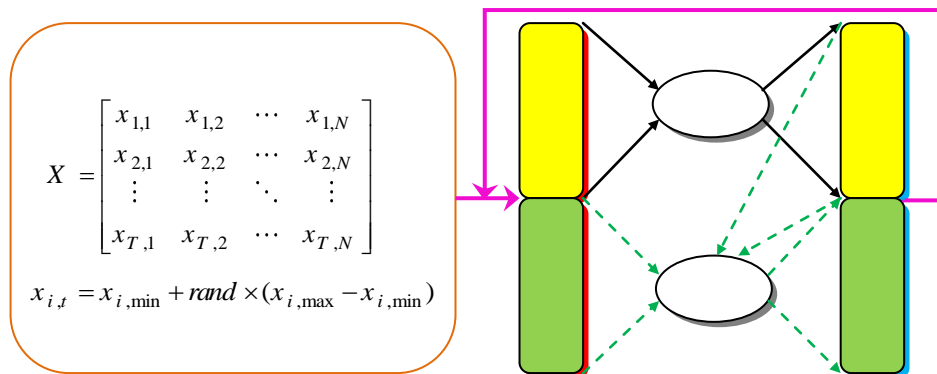
$$\text{Cycle} = \text{Cycle} + 1 \quad (24)$$

تکرار تمام مراحل قبلی تا رسیدن به شرط پایان برنامه.

۳-۳- الگوریتم ترکیبی پیشنهادی HVCS-ABC

الگوریتم کلونی زنبور، الهام گرفته از رفتار اجتماعی یک کلونی زنبورعسل در پیدا کردن شهد است. در این الگوریتم، تمام اعضا (زنبورها) دارای یک مقدار شایستگی بوده است که در تابع هدف تعیین می‌شوند. الگوریتم ABC با یک مقداردهی تصادفی اولیه شروع می‌شود. سپس این مقادیر با تولیدهای جدید (نسل‌های جدید) براساس میزان مقدار تابع هدف (شایستگی) آنها مرتب می‌شوند. دو مقدار بهینه در هر تکرار به دست می‌آید؛ یکی بهترین جواب در آن تکرار است و دیگری به‌عنوان بهترین جواب تا کنون هر زنبور در جمعیت به دست می‌آید.

ویروس‌ها در الگوریتم کلونی جستجوی ویروس برای حفظ بقا و تولید و تکثیر خود نیازمند سلول‌های میزبان‌اند؛ به این معنا که حرکت تکاملی آنها زمانی رخ می‌دهد که بتوانند به‌اندازهٔ کافی تکثیر و با تغییرات محیط جدید تطبیق یابند. استراتژی کلونی ویروس‌ها برای بقا شامل تکثیر و آلوده کردن سلول میزبان و عملکرد سیستم دفاعی است.



شکل (۳): ترکیب الگوریتم جستجوی کلونی ویروس (→) و کلونی زنبورعسل (→)

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 شده است. گام های زیر برای طراحی مدنظر پیگیری می شوند:

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

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، مقدار $dimit$ فراخوانی اطلاعات سیستم مطالعه شده و قراردادن محدودیت های وارده بر سیستم.

گام سوم: استفاده از الگوریتم ترکیبی 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:

$$OBJ = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=2}^{N_g} \int_0^{t_{sim}} t^2 (\Delta \omega_{ij})^2 dt \quad (35)$$

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. در طراحی کنترل کننده پیشنهادی، محدوده پارامترها به صورت زیر است:

Minimize J Subject to

$$\begin{aligned} K_i^{P, \min} &\leq K_i^P \leq K_i^{P, \max} \\ K_i^{D, \min} &\leq K_i^D \leq K_i^{D, \max} \\ K_i^{I, \min} &\leq K_i^I \leq K_i^{I, \max} \\ \alpha_i^{\min} &\leq \alpha_i \leq \alpha_i^{\max} \\ \beta_i^{\min} &\leq \beta_i \leq \beta_i^{\max} \end{aligned} \quad (36)$$

درخور ذکر است در صورتی که جمعیت تولید شده الگوریتم از محدوده خارج شود، مقدار ماکزیمم و مینیمم جایگزین آن جمعیت می شود. همچنین در سیستم واقعی موجود، ویژگی های غیر خطی سیستم سبب عملکرد نامناسب کنترل کننده فازی می شود؛ به همین دلیل، در این مقاله، ساختار FOPID به سیستم فازی مطالعه شده اضافه شده است. علاوه بر اعضای فازی برای سیستم فوق، پارامترهای FOPID به عنوان متغیرهای بهینه سازی به کمک الگوریتم ترکیبی پیشنهادی به دست می آیند.

گام پنجم: انتخاب بهترین جواب و ذخیره سازی آن در حافظه به منظور ارتقای 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 ششم: استفاده از تابع هدف معرفی شده در رابطه (۳۵) و محاسبه برازندگی جواب های فعلی و انتخاب بهترین پاسخ.

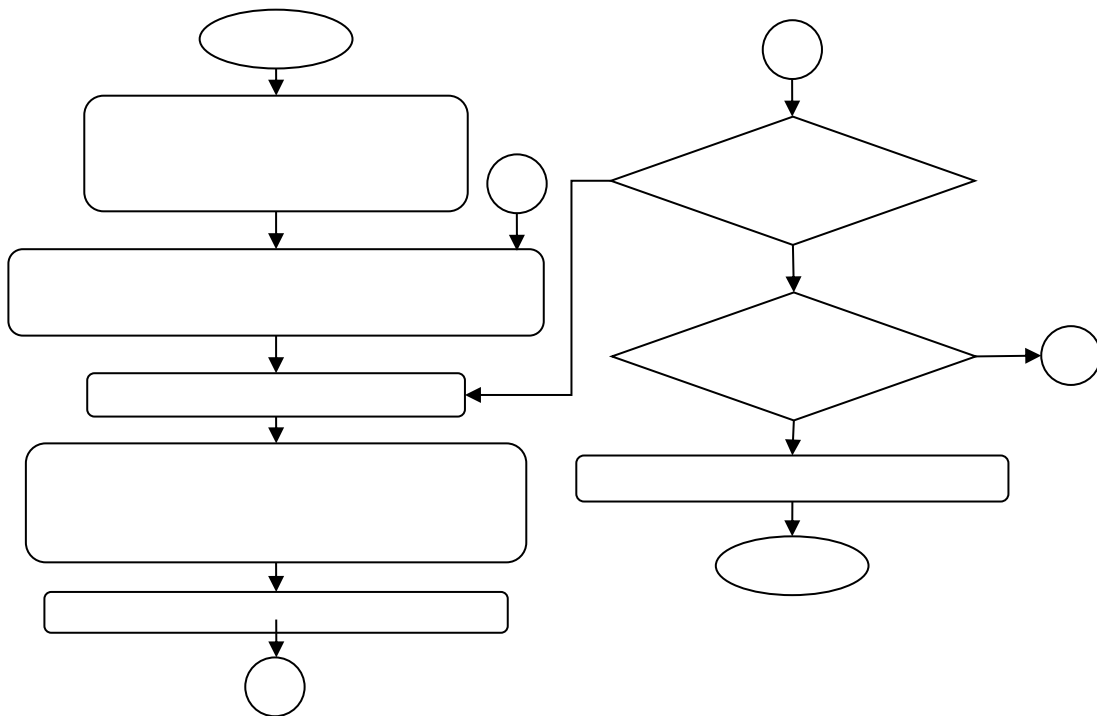
گام هفتم: مقایسه بهترین پاسخ با پاسخ ذخیره شده در حافظه. اگر این پاسخ از پاسخ موجود در حافظه بهتر باشد، جایگزین آن می شود؛ در غیر این صورت، همان مقدار قبلی در حافظه ذخیره می شود.

گام هشتم: ارتقای پاسخ ها براساس شکل ۴ و انجام عملیات مشابه با گام چهارم.

گام نهم: جایگزین کردن بدترین مجموعه پاسخ به دست آمده با پاسخ های تصادفی جدید و استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی برای یافتن بهترین پاسخ در هر فضای جستجوی محلی.

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

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است.



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

است. درخور ذکر است شبیه سازی در نرم افزار MATLAB انجام شده است.

به منظور طراحی کنترل کننده فازی FOPID- 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 است. شرایط بهره برداری زیر در نظر گرفته شده است.

الف) بار نامی؛

ب) افزایش بار به اندازه ۲۵٪ به عنوان بار سنگین؛

ج) کاهش بار به اندازه ۲۵٪ به عنوان بار سبک؛

سایر شرایط کاری براساس توان اکتیو و راکتیو به تفکیک ژنراتورها در شکل ۶ آمده اند.

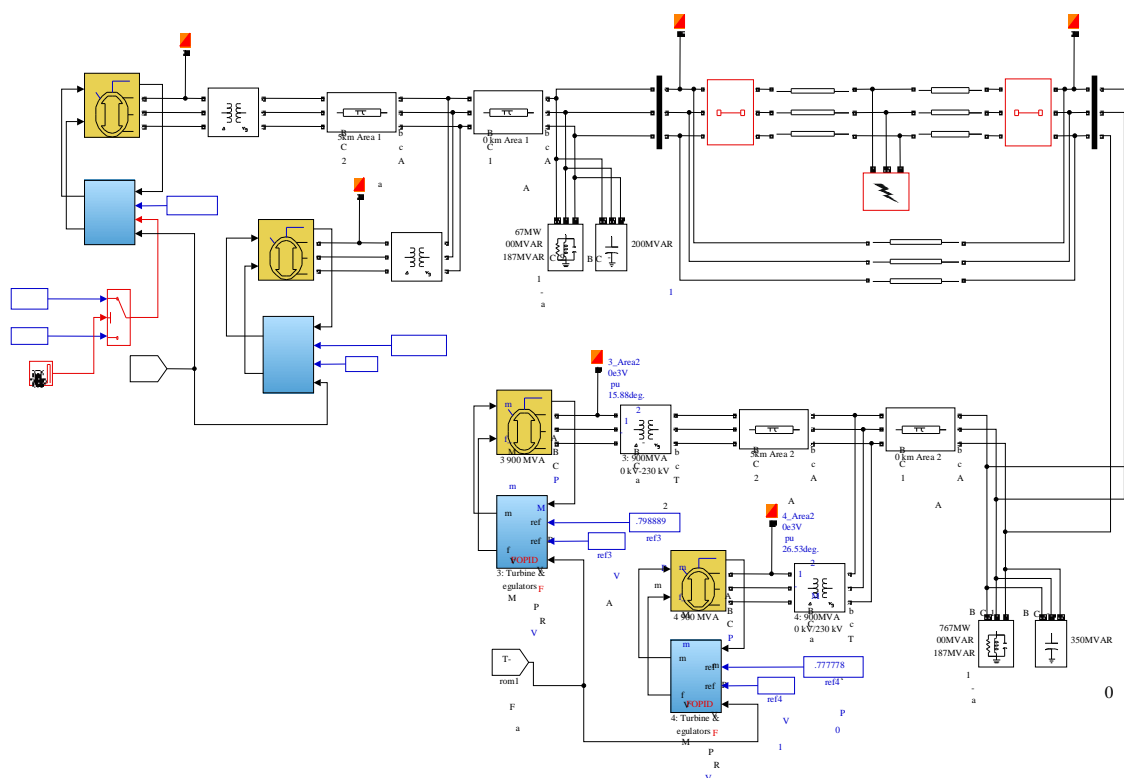
جدول ۱ پارامترهای بهینه به دست آمده را برای کنترل کننده فازی FOPID پیشنهادی نشان می دهد.

۵- نتایج شبیه سازی

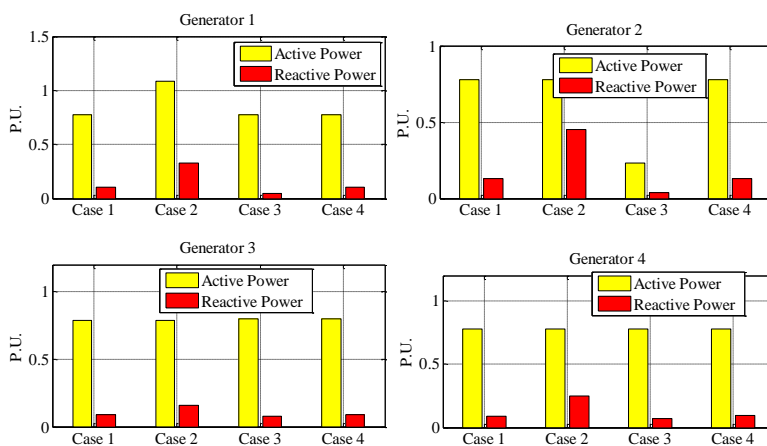
۵-۱- بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در

سیستم غیر خطی پیشنهادی

در این بخش، عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای طراحی بهینه کنترل کننده پیشنهادی بررسی شده است. عملکرد روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن شرایط کاری متفاوت بررسی شده است. در این مقاله، سیستم ۴- ماشین ۲- ناحیه، سیستم مطالعه شده 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 تحقیقات امروزی روی این نوسانات متمرکز شده اند. سیستم مطالعه شده با دو خط ۲۲۰ کیلوولت آمپر به یکدیگر متصل شده اند. همچنین دو ژنراتور ۹۰۰ مگاوات آمپر و ۲۰ کیلوولت در هر ناحیه قرار گرفته اند. سیستم مطالعه شده در شکل ۵ نشان داده شده



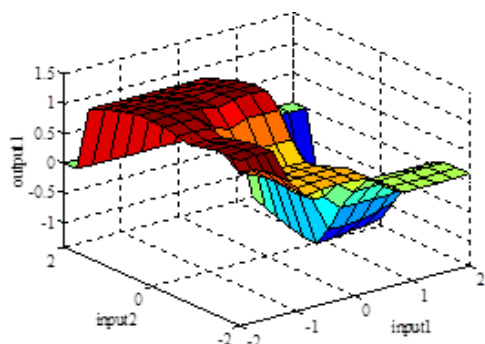
شکل (۵): سیستم چهارماشینیه دو ناحیه مطالعه شده



شکل (۶): شرایط کاری به کار گرفته شده برای ژنراتورها

الی ۱۱ نشان داده شده است.

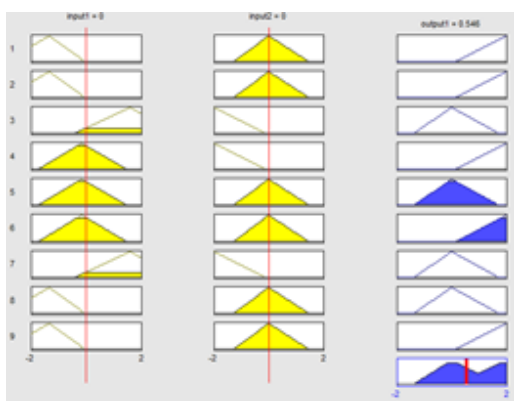
جدول (۱): نتایج به دست آمده برای کنترل کننده پیشنهادی



No-Gen	K_p	K_I	K_D	α	β
G_1	31.65	7.32	0.3139	1.091	0.887
G_2	34.12	7.23	0.2291	1.293	0.974
G_3	29.21	8.29	0.3112	1.102	0.987
G_4	33.87	8.23	0.4185	1.392	0.865

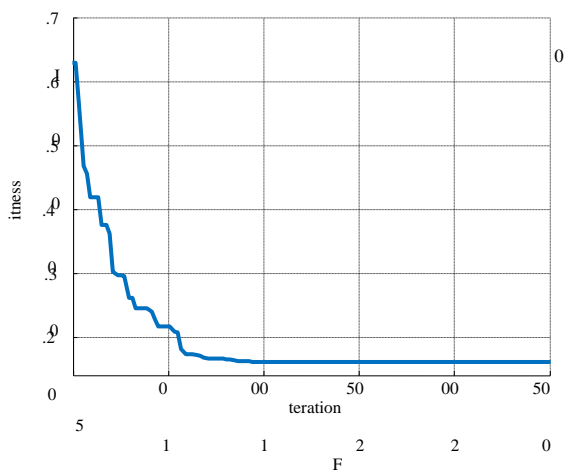
براساس بهینه سازی انجام شده با تغییر پارامترهای گفته شده، سطح فازی به همراه اعضای فازی برای دو منطق فازی به کار گرفته شده در شکل ۲، به ترتیب در شکل های ۷

۱۲، روش پیشنهادی قابلیت مناسبی در کاهش زمان نشست دارد و مقدار بالازدگی و پایین‌زدگی هم به صورت فراوانی کاهش یافته است. شکل ۱۳ نمایشی از مقادیر حقیقی و موهمی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است روش پیشنهادی به صورت موفق‌تری توانسته است به سمت چپ خط سبز پرننگ انتقال داده شود.



شکل (۱۰): نتیجه نهایی برای استنتاج فازی برای خروجی

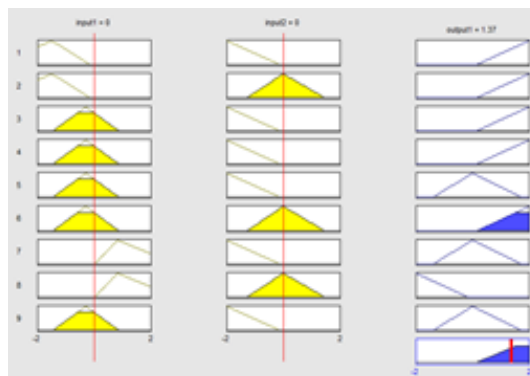
۲ شکل در FLC2



شکل (۱۱): منحنی همگرایی برای تابع هدف مطالعه‌شده

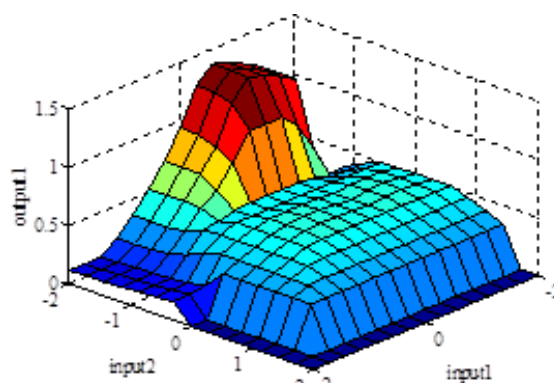
شکل (۷): سطح سه‌بعدی قواعد فازی بهینه‌شده برای خروجی

۲ شکل در FLC1



شکل (۸): نتیجه نهایی برای استنتاج فازی برای خروجی

۲ شکل در FLC1



شکل (۹): سطح سه‌بعدی قواعد فازی بهینه‌شده برای خروجی

۲ شکل در FLC2

نحوه همگرایی برای الگوریتم در شکل ۱۱ به‌ازای ۲۵۰ تکرار نشان داده شده است. با توجه به شکل همگرایی، روش پیشنهادی از سرعت بالای برخوردار است.

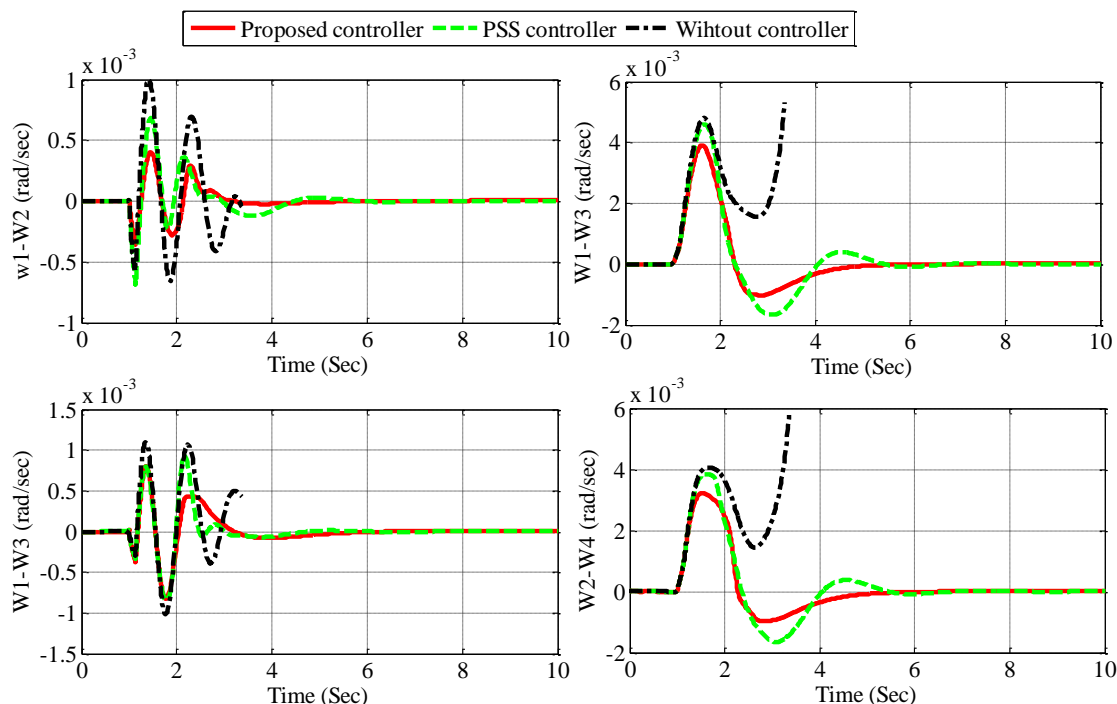
به‌منظور مقایسه عملکرد روش پیشنهادی، سه جنبه کنترل‌کننده مطابق با توضیحات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

الف) بدون وجود کنترل‌کننده؛

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

ج) کنترل‌کننده پیشنهادی.

شکل ۱۲ نتیجه تغییرات فرکانس هر ماشین را با در نظر گرفتن سه کنترل‌کننده فوق نشان می‌دهد. با توجه به شکل



شکل (۱۲): تغییرات سرعت خروجی ژنراتورها بدون خروج خط از شبکه و اعمال خطای سه فاز در شرایط بارگذاری نرمال، روش

پیشنهادی (خط پیوسته)، classic controller (خط چین) و without controller (نقطه چین)

به دست آمده با الگوریتم ABC و VCS مقایسه شده است.

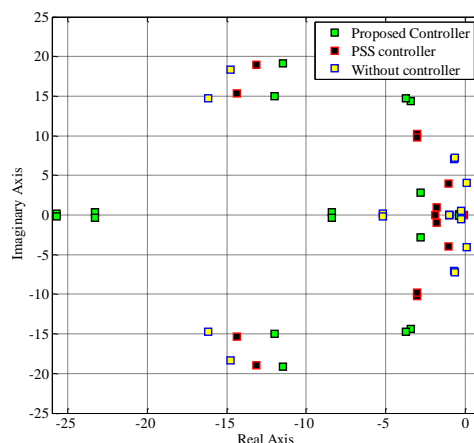
نتایج برای بار نرمال در شکل ۱۴ نشان داده شده اند.

با توجه به شکل نشان ۱۴، کنترل کننده پیشنهادی مبتنی بر HVCS-ABC عملکرد بهتری در مقایسه با سایر روش ها از خود نشان داده است. به منظور مقایسه عددی بین روش پیشنهادی و سایر الگوریتم ها، از دو معیار زیر استفاده می شود:

$$ITAE = \sum_{i=1}^{N_G} \int_0^{t_{sim}} t \cdot (|\Delta\omega_i|) dt \quad (37)$$

$$FD = \frac{\sum_{i=1}^{N_G} ((a_1 \times OS_i)^2 + (a_2 \times US_i)^2 + a_3 T_{s,i}^2)}{N_G} \quad (38)$$

به طوری که حداکثر فراجش (O_S)، حداکثر زیر جش (U_N) و زمان نشست (T_S) انحراف زاویه روتور ماشین G_i برای ارزیابی FD در نظر گرفته شده است. همچنین ضرایب a_1 الی a_3 ضرایب هم وزن سازی برای اورشوت و اندرشوت است. شکل ۱۵ نتیجه مقایسه بین این

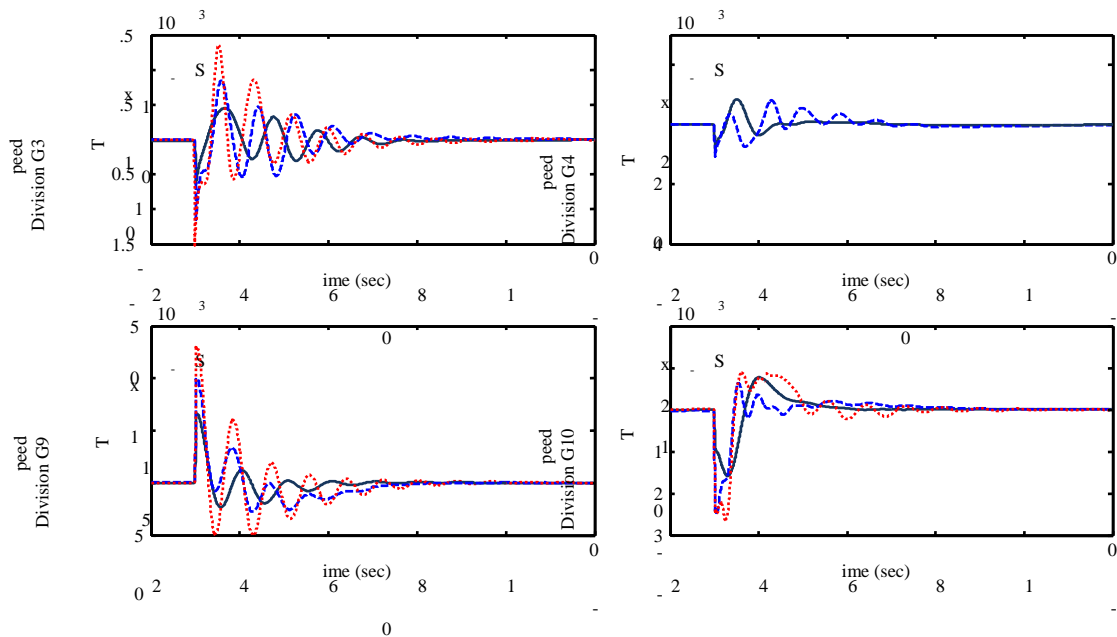


شکل (۱۳): توزیع مقادیر ویژه در صفحه مختلط به کمک روش پیشنهادی و کنترل کننده کلاسیک و بدون کنترل کننده

۲-۵- سیستم ۱۰ ماشینه

سیستم مطالعه شده، ۱۰ ماشینه ۳۹ باسه است. کلیه اطلاعات این سیستم در مرجع [۱] داده شده است. در این سناریو، خطای سه فاز در باس ۲۹ در خط ۲۹ و ۲۶ در زمان ۱ ثانیه به مدت ۰/۱ ثانیه اعمال می شود و نتایج

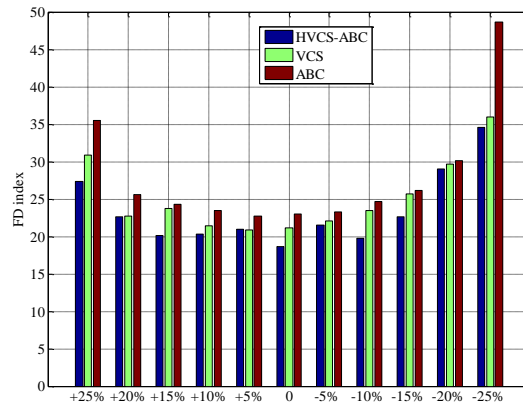
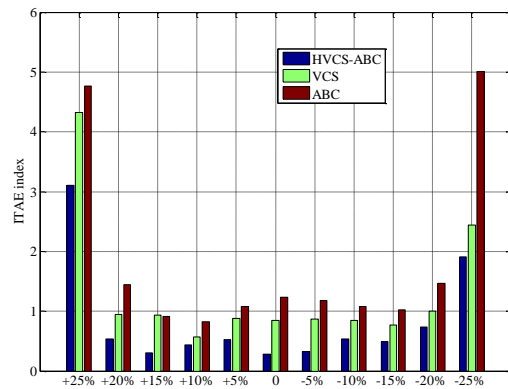
الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد. به منظور بررسی جامع‌تر، بار مورد تقاضا از ۲۵٪ الی ۲۵-٪ تغییر کرده است.



شکل ۱۴- خط پیوسته (HVCS-ABC)، خط چین (VCS) و نقطه چین (ABC)

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک کنترل‌کننده جدید مبتنی بر تئوری توابع کسری و فازی و کنترل‌کننده PID برای کنترل سیستم غیرخطی با در نظر گرفتن شرایط کاری مختلف پیشنهاد شده است. به عبارت دیگر، روش پیشنهادی از یک کنترل‌کننده فازی-PID مرتبه کسری $(FP+FI^\alpha+FD^\beta)$ بهینه‌شده با الگوریتم ترکیبی کلونی ویروس و الگوریتم کلونی زنبورعسل برای کاهش فرآیندش، زمان نشست و زمان اضافه ولتاژ خروجی سیستم مطالعه‌شده تشکیل شده است. کنترل‌کننده فازی پیشنهادی دارای کارایی بهتری برای میرا کردن اغتشاشات سیستم در شرایط سخت کاری است. یکی از نکات مهم در به‌کارگیری هم‌زمان پایدارساز فازی در غالب کنترل‌کننده FOPID، طراحی هماهنگ بین این دو نوع کنترل‌کننده است؛ به طوری که در صورت ناهماهنگی مناسب بین این دو نوع کنترل‌کننده، ناپایداری سیستم را به همراه خواهد داشت. برای این منظور، از الگوریتم ترکیبی جدید پیشنهادی استفاده شده است. از ویژگی‌های بارز این الگوریتم، قابلیت جستجوی محلی و نهایی قوی در مقایسه با سایر روش‌ها است. روش کنترل‌



شکل (۱۴) نتیجه مقایسه معیارهای عددی

- [1] P. Kundr, "Power System Stability and Control," New York, NY, USA:McGraw-Hill, 1994.
- [2] K. Peddakapu, M. R. Mohamed, M. H. Sulaiman, P. Srinivasarao, S. R. Reddy, "Design and simulation of resistive type SFCL in multi-area power system for enhancing the transient stability," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 1353643, 2020.
- [3] D. Raisz, D. Deepak, F. Ponci, A. Monti, "Linear and uniform swing dynamics in multimachine converter-based power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 125, 106475, 2020.
- [4] S. Asvapoositkul, R. Preece. "Impact of HVDC dynamic modelling on power system small signal stability assessment," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 123, 106327, 2020.
- [5] A. Sedaghati, L. M. Fernández-Ramírez, "Transient stability study of power systems with high-order models based on hybridizing loop solving and vector computation," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 105, 102165, 2020.
- [6] R. Devarapalli, B. Bhattacharyya, N. K. Sinha, B. Dey, "Amended GWO approach based multi-machine power system stability enhancement. *ISA Transactions*, in press, 2020.
- [7] Z. Bouchama, N. Essounbouli, M.N. Harmas, A. Hamzaoui, K. Saoudi, "Reaching phase free adaptive fuzzy synergetic power system stabilizer," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 77, pp. 43-49, 2016.
- [8] M. Farahani, S. Ganjefar, "Intelligent power system stabilizer design using adaptive fuzzy sliding mode controller," *Neurocomputing*, Vol. 226, pp. 135-144, 2017.
- [9] N. N. Islam, M.A. Hannan, H. Shareef, A. Mohamed, "An application of backtracking search algorithm in designing power system stabilizers for large multi-machine system," *Neurocomputing*, Vol. 237, pp. 175-184, 2017.
- [10] K. Saoudi, M.N. Harmas, "Enhanced design of an indirect adaptive fuzzy sliding mode power system stabilizer for multi-machine powersystems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, pp. 425-431, 2014.
- [11] K. Ellithy, S. Said, O. Kahlout, "Design of power system stabilizers based on μ -controller for power system stability enhancement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 63, pp. 933-939, 2014.
- [12] M. Shafiullah, M. J. Rana, M. S. 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.
- [13] 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.
- [14] A. WA, R. Kumari, R. Rengaraj, "Economic and

پیشنهادی روی سیستم چهارماشینۀ دو ناحیه اعمال شده است. کارایی روش پیشنهادی با شبیه‌سازی‌های مختلف در مقایسه با سایر ادوات کنترلی بررسی شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده، روش پیشنهادی به‌خوبی توانسته است به پایداری سیستم غیرخطی مطالعه‌شده بپردازد.

ضمایم

فهرست علائم و واژگان

δ_i	the power angle of the i^{th} generator, in rad
ω_i	the relative speed of the i^{th} generator, in rad/s
P_{mi}	the mechanical input power, in p.u.
P_{ei}	the electrical power, in p.u.
ω_0	the synchronous machine speed, in rad/s
D_i	the per unit damping constant
H_i	the inertia constant, in s
E'_{qi}	the transient EMF in the quadrature axis, in p.u.
E_{qi}	the EMF in the quadrature axis, in p.u.
E_{fi}	the equivalent EMF in the excitation coil, in p.u.
T'_{doi}	the direct axis transient short-circuit time constant, in s
x_{di}	the direct axis reactance, in p.u.
x'_{di}	the direct axis transient reactance, in p.u.
B_{ij}	the i^{th} row and j^{th} column element of nodal susceptance matrix at the internal nodes after eliminating all physical buses, in p.u.
Q_{ei}	the reactive power, in p.u.
I_{fi}	the excitation current, in p.u.
I_{di}	the direct axis current, in p.u.
I_{qi}	the quadrature axis current, in p.u.
k_{ci}	the gain of the excitation amplifier, in p.u.
u_{fi}	the input of the SCR amplifier, in p.u.
x_{adi}	the mutual reactance between the excitation coil and the stator coil, in p.u.
x_{Ti}	the transformer reactance, in p.u.
x_{ij}	the transmission line reactance between the i^{th} generator and the j^{th} generator, in p.u.
V_{ti}	the terminal voltage of the i^{th} generator, in p.u.
X_{ei}	the steam valve opening of the i^{th} generator, in p.u.
P_{ci}	the power control input of the i^{th} generator, in p.u.
T_{mi}	the time constant of the i^{th} machine's turbine, in s
K_{mi}	the gain of the i^{th} machine's turbine
T_{ei}	the time constant of the i^{th} machine's speed governor, in s
K_{ei}	the gain of the i^{th} machine's speed governor
R_i	the regulation constant of the i^{th} machine, in p.u.

مراجع

- Fuzzy PID Controller in the Presence of Wind Disturbance,” *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 8, pp. 45-54, 2018.
- [21] H. K. Abdulkhader, J. Jacob, A. T. Mathew, “Robust type-2 fuzzy fractional order PID controller for dynamic stability enhancement of power system having RES based microgrid penetration,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 110, pp. 357-371, 2019.
- [22] P. Mani, Y. H. Joo, “Fuzzy logic-based integral sliding mode control of multi-area power systems integrated with wind farms,” *Information Sciences*, 545, 153-169, 2021.
- [23] D. Guha, P. K. Roy, S. Banerjee, “Load frequency control of large scale power system using quasi-oppositional grey wolf optimization algorithm,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 19, No. 4, pp. 1693-1713, 2016.
- [24] 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.
- [25] D. C. Secui, “A new modified artificial bee colony algorithm for the economic dispatch problem,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 89, pp. 43-62, 2015.
- [26] I. Podlubny, “Fractional-order systems and $PI^{\delta}D^{\delta}$ Controllers”, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 44, No. 1, pp. 208-214, 1999.
- various emission dispatch using differential evolution algorithm,” In: *Proceedings of the IEEE International conference on electrical energy systems*; pp. 74-78, 2016.
- [15] 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, pp. 2097-2106, 2009.
- [16] 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, pp. 473-479, 2005.
- [17] 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.
- [18] F. Amiri, A. Hatami, “Nonlinear Load frequency control of isolated microgrid using fractional order PID based on hybrid craziness-based particle swarm optimization and pattern search,” *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. Vol. 17, No. 2, pp. 135-148, 2020.
- [19] F. jamshidi, M. Ghanbarian, “Robust Frequency Control of Islanded Microgrids: ICA-Based FFOPID Control Approach,” *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 51-62, 2017.
- [20] F. Parivash, A. ghasemi, “Trajectory Tracking Control of Quadrotor using Fractional-Order

¹ FuzzyProportional+FuzzyIntegral +FuzzyDerivative

² proportional–integral–derivative

³ Virus Colony Search

⁴ Artificial bee colony

⁵ Hybrid VCS-ABC

⁶ Synchronizing Torque

⁷ Damping Torque

⁸ Aperiodic Drift

⁹ quantum particle swarm optimizer

¹⁰ particle swarm optimizer

¹¹ unified power flow controller

¹² Cuckoo optimization algorithm

¹³ Fractional order PID

¹⁴ Fractional Order PID (FOPID)

¹⁵ Fractional Calculus

¹⁶ proportional–derivative

¹⁷ Fuzzy logic controller

