



طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه برای کنترل تنظیم کننده ولتاژ خودکار به منظور تنظیم ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون با الگوریتم بهینه سازی فاخته

مجید مرادی زیرکوهی*

استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

چکیده

یکی از روش‌های کنترلی ساده و متداول برای استفاده در تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار، کنترل کننده PID است. از طرفی اخیراً حسابان کسری به عنوان ابزاری قوی در مدلسازی و کنترل سیستم‌های دینامیکی در مهندسی کنترل مطرح شده است که توانایی‌ها و کاربردهای این نظریه در متون علمی در حال بررسی است. در زمینه کنترل سیستم‌های دینامیکی نیز، کنترل مرتبه کسری با داشتن یک ساختار ساده می‌تواند کارایی و قابلیت‌های کنترلی سیستم را بهبود ببخشد. در این مقاله با رویکردی چند هدفه به طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه برای کنترل تنظیم کننده ولتاژ خودکار به منظور تنظیم ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته پرداخته می‌شود. تابع هزینه پیشنهادی شامل، زمان صعود، زمان نشست، خطای حالت ماندگار و فراجش است. نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد، کنترل کننده PID مرتبه کسری در مقایسه با کنترل کننده PID کلاسیک، دارای مقاومت بیشتر مقابل تغییرات پارامترهای سیستم و اغتشاش است.

کلمات کلیدی: حسابان کسری؛ کنترل کننده PID مرتبه کسری؛ سیستم AVR؛ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته.

Optimum Design of a Fractional Order PID Controller for AVR System to Tune the Terminal Voltage of a Synchronous Generator using Cuckoo Optimization Algorithm

M. Moradi Zirkohi¹

¹ Asst. Prof., Electrical. Eng., Behbahan Khatam Alanbia Univ. of Technology, Behbahan, Iran.

Abstract

One of the simplest and most commonly used control methods for using in automatic voltage regulators (AVR) is the PID controller. On the other hand, Fractional calculus has recently been proposed as a powerful tool in the modeling and control of dynamic systems in control engineering, whose abilities and applications of this theory are being studied in academic research. In the control of dynamic systems, fractional-order controllers can improve the performance and control capabilities of the system. In this paper, a multi-objective approach to designing an optimal fractional PID controller for regulating the output voltage of the synchronous generator is investigated using cuckoo optimization algorithm. The proposed cost function includes rise time, settling time, steady state error and overshoot. The comparative results obtained show that the fractional PID controller has a higher robustness to parametric uncertainties and disturbance than the classic PID controller.

Keywords: Fractional Calculus; Fractional PID Controller; Automatic Voltage Regulator System; Cuckoo Optimization Algorithm.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۰۱۵۸۸۶۵۶۷؛ فاکس: ۰۶۱۵۲۷۳۲۸۰۸

آدرس پست الکترونیک: moradi@bkatu.ac.ir

۱- مقدمه

مفاهیم انتگرال و دیفرانسیل کلاسیک (حسابان مرتبه صحیح) طی سه قرن گذشته نقش بسیار ارزنده‌ای در پیشرفت علم و فنون و تحلیل و فهم بهتر سیستم‌ها و پدیده‌های فیزیکی داشته است. حسابان کسری که به نوعی از تعاریف انتگرال و دیفرانسیل کلاسیک استخراج می‌شود، تعمیم انتگرال و دیفرانسیل مرتبه صحیح به مرتبه غیر صحیح یا کسری است. در این نظریه به دلیل آزادی عملی که روی مرتبه انتگرال گیر و دیفرانسیل گیر کسری وجود دارد، می‌توان سیستم‌های فیزیکی را با دقت بالایی مدل کرد. در زمینه کنترل سیستم‌های دینامیکی نیز، کنترل مرتبه کسری با داشتن یک ساختار ساده می‌تواند کارایی و قابلیت‌های کنترلی سیستم را بهبود ببخشد [۱].

بالا رفتن هزینه‌های انتقال و توزیع، به مولدهای تولید پراکنده^۱ این امکان را می‌دهد که برق تولیدی خود را به قیمت ارزانه‌تر در اختیار مصرف کننده قرار دهند. نیروی محرکه این نیروگاه‌ها که عمدتاً در توان‌های پایین مورد بهره برداری قرار می‌گیرند، از هر نوعی که باشند (دیزلی، خورشیدی، بادی و...)، در نهایت باید به صورتی کنترل و تثبیت شوند تا امکان بهره برداری از آن‌ها فراهم شود. یکی از قسمت‌های کامل کننده این نوع از سیستم‌های کنترلی، تحت عنوان کنترل کننده خودکار ولتاژ^۲ (AVR) شناخته می‌شوند. مهمترین پارامترهای خروجی مورد انتظار از چنین کنترل کننده‌هایی، سرعت عکس العمل (در نتیجه‌ی توان دریافتی از سمت بار) و تثبیت ولتاژ در خروجی است. در واقع امنیت و پایداری در سیستم‌های قدرت در درجه اول، به طراحی مناسب سیستم کنترل تحریک در ژنراتورها بستگی دارد. تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار، به عنوان یکی از اجزاء مهم سیستم در کنترل تحریک ژنراتورها استفاده می‌شود. مطمئناً یکی از اجزاء مهم هر نیروگاه نیز، ژنراتور آن بوده که وظیفه تولید انرژی الکتریکی را بر عهده دارد؛ بنابراین عملکرد صحیح کنترل کننده خودکار ولتاژ بر پایداری سیستم قدرت تاثیر دارد. یکی از روش‌های کنترلی ساده و متداول برای استفاده در تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار،

کنترل کننده PID است. یکی از روش‌های توسعه کنترل کننده‌های PID کلاسیک، استفاده از کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری بر اساس حسابان کسری می‌باشند. از لحاظ ساختاری کنترل کننده‌های PID کلاسیک دارای سه درجه آزادی، در صورتی که کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری دارای پنج درجه آزادی هستند. به خاطر آزادی عملی که روی مرتبه مشتق گیر و انتگرال گیر کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری وجود دارد، می‌توان سیستم‌های فیزیکی را با دقت بسیار بالایی مدل کرد. در زمینه کنترل سیستم‌ها نیز وضعیت به همین منوال است، یعنی می‌توان کنترل کننده‌هایی با کارایی بسیار بالا، چه برای سیستم‌های با مرتبه کسری و چه برای سیستم‌های با مرتبه صحیح طراحی کرد [۲]. در سال ۱۹۹۹ پولوینی تعمیمی از کنترل کننده‌های PID به نام PID مرتبه کسری را بیان کرد و اثر بخشی چنین کنترل کننده‌هایی را روی پاسخ محرک سیستم‌های مرتبه کسری نشان داد [۳]. در [۴] نشان داده شد که کنترل کننده‌های مرتبه کسری، عملکرد بهتری در دفع اغتشاش و همچنین حساسیت کمتری در مقابل تغییرات پارامترهای فرایند در مقایسه با کنترل کننده‌های قدیمی دارند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که کنترل کننده PID مرتبه کسری، هم پایداری و هم عملکرد سیستم کنترل را بهبود می‌بخشد. شایان ذکر است که یکی از مزیت‌های کنترل کننده PID مرتبه کسری، حساسیت کم نسبت به تغییرات پارامترهای سیستم است [۵]. در واقع این مزیت بخاطر انعطاف پذیری ساختار کنترل کننده بخاطر وجود پنج پارامتر طراحی است [۶، ۷].

ایده استفاده از حسابان کسری در سیستم‌های کنترل جدید نمی‌باشد، بلکه پیش‌تر از این در قرن ۱۹ اتفاق افتاده است [۸]؛ اما ایده طراحی کنترل کننده مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بسیار جدید است. از جمله این تحقیقات، استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری برای یک سیستم چند متغیره است [۹]. از الگوریتم ازدحام زرات نیز برای بهینه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری استفاده شده است [۱۰، ۱۱]. در [۱۲] از الگوریتم ازدحام مورچه آشوبی (بی نظم) برای بهینه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری بمنظور کنترل تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار استفاده شده

¹ Distributed Generation² Automatic Voltage Regulator (AVR)

این الگوریتم دارای عملکرد بسیار خوبی در مقایسه با بقیه الگوریتم‌های تکاملی است. دلیل استفاده از الگوریتم فاخته در این مقاله، عملکرد بسیار کارا و سریع بخاطر کم بودن تعداد پارامترهای اولیه در مقایسه با بقیه الگوریتم‌ها از جمله پرندگان، رقابت استعماری، الگوریتم زنبور عسل، ازدحام مورچه آشوبی و ... است. از سوی دیگر با در نظر گرفتن این مهم که در عمل پارامترهای سیستم تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار دارای عدم قطعیت هستند، بررسی مقاوم بودن سیستم کنترل و مقایسه عملکرد آن با روش‌های بهینه‌سازی دیگر نیز صورت گرفته است.

در ادامه در بخش دوم کنترل کننده PID مرتبه کسری بیان می‌شود. سپس در بخش سوم به معرفی الگوریتم بهینه سازی فاخته پرداخته می‌شود. در بخش چهارم دینامیک تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار معرفی می‌شود. در بخش پنجم روش پیشنهادی و در بخش ششم نتایج ارائه می‌شود. نهایتاً در بخش هفتم نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- کنترل کننده PID مرتبه کسری

از دیدگاه کنترلی محققان نشان داده‌اند که کنترل کننده‌های که مشتق و انتگرال‌گیر با مرتبه کسری دارند، عملکرد و قوام بهتری نسبت به کنترل کننده‌های ساده (توان صحیح) دارند [۱۹]. بر این اساس، یکی از روش‌های توسعه کنترل کننده‌های PID کلاسیک، استفاده از کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری بر اساس حسابان کسری می‌باشد [۲۰، ۲۱]. کنترل کننده PID کلاسیک، سه درجه آزادی دارد، در صورتی که کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری، دارای پنج درجه آزادی هستند [۲۲]؛ لذا تنظیم این کنترل کننده‌ها به مراتب پیچیده‌تر است. ساختار یک کنترل کننده PID مرتبه کسری در (۱) آمده است [۱۷].

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (1)$$

در رابطه فوق K_p بهره تناسبی، K_I بهره انتگرالی، K_D بهره مشتقی هستند. علاوه بر این λ و μ بترتیب مرتبه انتگرال‌گیر و مرتبه مشتق‌گیر هستند. همانطور که مشخص است، فرق اساسی بین این کنترل کننده و یک کنترل کننده PID کلاسیک وجود همین پارامترهای λ و μ هستند. همانطور که مشاهده می‌شود، این کنترل کننده‌ها دارای پنج پارامتر در صورتی که کنترل کننده‌های PID کلاسیک دارای سه پارامتر

است. در این مقاله نشان داده شده است که الگوریتم ازدحام مورچه آشوبی از الگوریتم پرندگان عملکرد بهتری دارد. یکی از معایب این الگوریتم، تعداد پارامترهای اولیه زیاد وابستگی این الگوریتم به تنظیمات اولیه دارد. در [۱۳] از الگوریتم زنبور عسل برای تنظیم کنترل کننده تنظیم کننده ولتاژ خودکار استفاده شده است. در [۱۴، ۱۵] نیز از روش بهینه‌سازی چند هدفه آشوبی برای عسل برای تنظیم کنترل کننده تنظیم کننده ولتاژ خودکار استفاده شده است.

در [۱۶] از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری^۱ برای تنظیم ضرایب یک کنترل کننده PID بمنظور تنظیم سیستم تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار استفاده شده است. از الگوریتم رقابت استعماری^۲ نیز به این منظور استفاده شده است. در جدیدترین مقالات ارائه شده [۱۰، ۱۷] نیز، از کنترل کننده PID مرتبه کسری برای تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار استفاده شده است. در [۱۰] از الگوریتم پرندگان نیز به این منظور استفاده شده است. در این مقالات برای بهینه کردن ساختار کنترل کننده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده است که این نشان دهنده اهمیت کنترل سیستم تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار و جایگاه الگوریتم‌های بهینه‌سازی را دارد. تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری هنوز هم به عنوان یک چالش در متون علمی مطرح است.

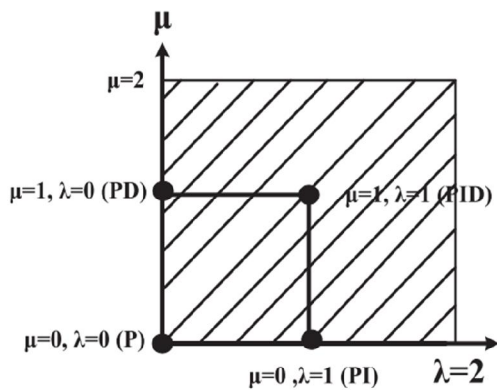
در این مقاله با گذر از کارهای انجام شده به تنظیم بهینه کنترل تنظیم کننده ولتاژ خودکار بمنظور تنظیم ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون پرداخته می‌شود. در واقع با رویکردی چند هدفه و با در نظر گرفتن یک تابع غیرخطی مشتمل بر فراجهدش، زمان صعود، زمان نشست و خطای حالت ماندگار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به بهینه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری به عنوان یک کنترل کننده برای کنترل تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار استفاده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته^۳ یکی از جدیدترین و بهترین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی است که تاکنون معرفی شده است. الگوریتم فاخته با الهام از روش زندگی پرنده‌ای بنام فاخته است [۱۸]. نشان داده شده که

¹ Teaching-Learning Based

² Imperialist Competitive Algorithm

³ Cuckoo

به نوعی زیرکی جهت پرورش جوجه‌های خود متوسل شدند. این پرندگان در اصطلاح "پارازیت‌های اولاد" نامیده می‌شوند که هرگز برای خود لانه نمی‌سازند و به جای آن تخم‌های خود را در لانه سایر انواع پرندگان قرار داده و صبر می‌کنند تا آنها در کنار تخم‌های خود به تخم‌های این پرندگان نیز رسیدگی نمایند.



شکل ۱- ناحیه همگرایی کنترل کننده PID مرتبه کسری [۲۴، ۱۹]

فاخته مشهورترین پارازیت اولادی است که به نوعی یک متخصص در زمینه فریب بیرحمانه است. استراتژی این پرنده شامل، خفیه‌کاری، شگفت‌زده کردن و سرعت عمل است. فاخته مادر یکی از تخم‌های پرنده مادر میزبان را از بین می‌برد و تخم خود را لابلای تخم‌های دیگر موجود در لانه میزبان قرار می‌دهد و سریعاً از محل دور می‌شود. با این عمل، نگهداری از تخم را به عهده پرنده ماده میزبان می‌گذارد. کل این پروسه تقریباً ۱۰ ثانیه به طول می‌انجامد. فاخته‌ها لانه‌های انواع گونه‌های پرندگان را آلوده به تخم خود می‌کنند و این کار را به دقت و با تقلید از رنگ و الگوی تخم‌های موجود در هر لانه انجام می‌دهند تا تخم‌های جدید لانه شبیه تخم‌های قبلی و واقعی میزبان باشند. فاخته‌های پارازیت انداز به گروه‌هایی تقسیم می‌شوند و هر گروه روی پرنده میزبان خاصی تخصص می‌یابد. ثابت شده است که هر گروه از متخصصان از فاخته‌ها به صورت ژنتیکی با گروه دیگر اختلاف دارند. تخصص روی میزبان برای نیاز به تقلید از تخم‌های پرنده میزبان رفته رفته بهبود و تکامل می‌یابد. در این بین هستند، پرندگانی که تخم‌های فاخته‌ها را در لانه‌های خود

هستند. در صورت تنظیم صحیح، همین دو پارامتر اضافه باعث بهبود عملکرد این کنترل کننده‌ها می‌شود. تنظیم این کنترل کننده‌ها، یکی از چالش‌های استفاده از آنها در طراحی سیستم‌های کنترل است. در واقع انواع کنترل کننده‌های مشتق گرفته شده از PID کلاسیک زیر مجموعه کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری هستند. این موضوع بصورت گرافیکی در شکل ۱ نیز نشان داده شده است.

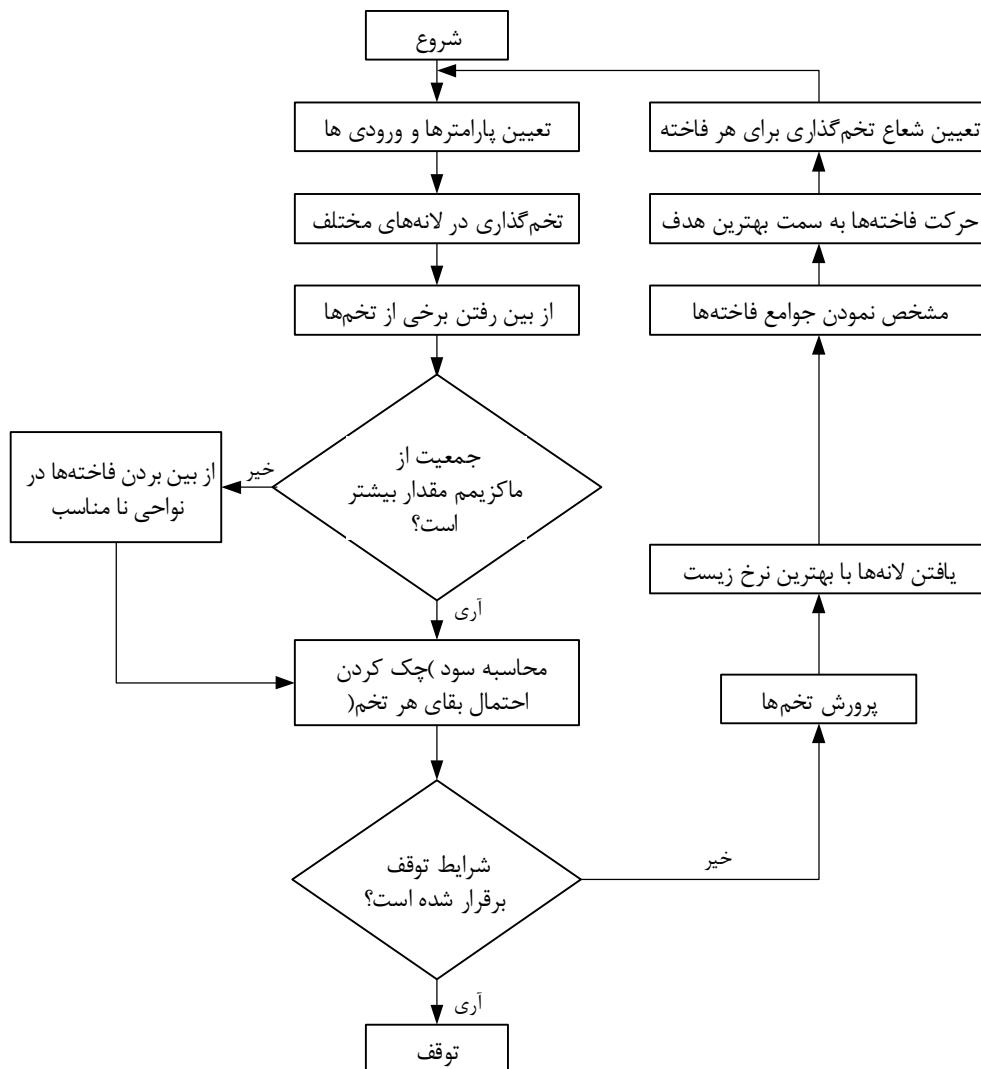
۳- الگوریتم بهینه سازی فاخته

پس از معرفی الگوریتم رقابت استعماری روش جدید دیگری به نام الگوریتم بهینه‌سازی فاخته شکل گرفت که توانایی بیشتری در پیدا کردن نقاط بهینه کلی دارد. این الگوریتم یکی از جدیدترین و قویترین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی است که تاکنون معرفی شده است. الگوریتم فاخته با الهام از روش زندگی پرنده‌ایی به نام فاخته است که در سال ۲۰۰۹ توسط شین او یانگ و دب ساوش توسعه یافته است [۲۳]. الگوریتم فاخته بر اساس زندگی گونه‌ای از فاخته است. الگوریتم فاخته بعدها در سال ۲۰۱۱ توسط رامین رجیبیون به طور کامل با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفت [۱۸].

۳-۱- روش تخم گذاری فاخته

همه پرندگان موجود در دنیا روش یکسانی برای مادر شدن دارند: همه آنها تخم می‌گذارند. هیچ پرنده‌ای نوزاد خود را نمی‌زاید، بلکه تخم گذاشته و جوجه خود را در بیرون از بدنشان پرورش می‌دهند. هرچه تخم‌ها بزرگتر باشند، احتمال کمتری دارد که پرنده ماده بتواند به طور همزمان بیشتر از یک تخم در بدن خود داشته باشد، چرا که تخم‌های بزرگتر پرواز را سخت می‌کنند و نیاز به انرژی بیشتری برای پرواز خواهد بود.

از طرف دیگر چون تخم‌ها منبع سرشار پروتئین برای سایر شکارچی‌ها می‌باشد، لازم است تا پرندگان محل امنی جهت تخم‌گذاری و به دنیا آمدن جوجه‌ها انتخاب کنند. اکثر پرندگان لانه‌های خود را به صورت جداشده، نامعلوم و مستتر در پوشش گیاهی ایجاد می‌کنند تا از شناسایی توسط شکارچیان جلوگیری نمایند. در این بین برخی از پرندگان خود را از دردسر هرگونه لانه‌سازی و وظایف والدین رها کرده و



شکل ۲- فلوجارت الگوریتم بهینه سازی فاخته [۱۸]

بیرون می آیند و زودتر هم رشد می کنند. در اکثر موارد جوجهی فاخته تخمها و یا جوجه های پرنده میزبان را از لانه بیرون می اندازند. این مسئله کاملاً غریزی است.

۲-۳- جزئیات الگوریتم بهینه سازی فاخته

در شکل ۲ فلوجارت الگوریتم بهینه سازی فاخته رسم شده است. همانند سایر الگوریتم های تکاملی الگوریتم فاخته هم با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می کند. جمعیتی

تشخیص می دهند و حتی بعضاً تخم های فاخته را از لانه بیرون می اندازند. برخی هم لانه لو رفته را کلاً ترک کرده و یک لانه جدید برپا می کنند. در واقع فاخته ها به طور پیوسته تقلید خود را از تخم های لانه های هدف بهبود می بخشند و پرندگان میزبان هم روش های شناسایی تخم های بیگانه را یاد می گیرند. این تلاش و مبارزه برای بقا بین پرندگان مختلف و فاخته ها یک فرایند مداوم و پیوسته است. جوجه های فاخته زودتر از تخم های پرنده میزبان از تخم

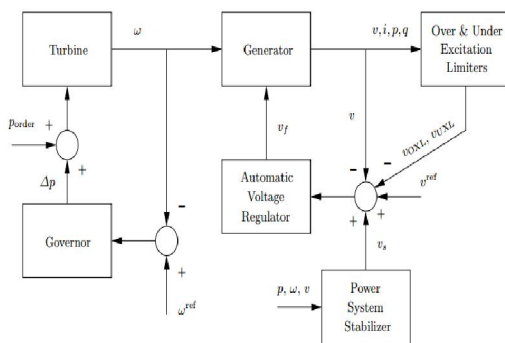
آلفا متغیری است که حداکثر مقدار دامنه تخم گذاری آن تنظیم می‌شود. فرمول عملگر مهاجرت در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به صورت رابطه ۴ است [۱۸]:

$$X_{next} = X_{current} + F(X_{goal} - X_{current}) \quad (۴)$$

که F پارامتری است که باعث انحراف می‌شود.

۴- معرفی سیستم AVR

همانطور که در بخش اول ذکر شد امنیت و پایداری در سیستم های قدرت در درجه اول به طراحی مناسب سیستم کنترل تحریک در ژنراتورها بستگی دارد. تنظیم کننده های ولتاژ خودکار، به عنوان یکی از اجزاء مهم سیستم در کنترل تحریک ژنراتورها استفاده می‌شود. مطمئناً یکی از اجزاء مهم هر نیروگاه نیز ژنراتور آن بوده که وظیفه تولید انرژی الکتریکی را بر عهده دارد؛ بنابراین عملکرد صحیح کنترل کننده خودکار ولتاژ بر پایداری سیستم قدرت تاثیر دارد. نمای کلی یک ژنراتور سنکرون به همراه تنظیم کننده های ولتاژ خودکار در شکل ۳ نشان داده شده است. معمولاً سیستم تنظیم کننده های ولتاژ خودکار شامل، چهار قسمت تقویت کننده^۳، تحریک کننده^۴، ژنراتور^۵ و سنسور^۶ است. بلوک دیاگرام تابع تبدیلی تنظیم کننده های ولتاژ خودکار، در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمای کلی یک ژنراتور سنکرون به همراه AVR

[۲۵]

متشکل از فاخته‌ها، این جمعیت از فاخته‌ها تعدادی تخم دارند که آنها را در لانه تعدادی پرنده‌ی میزبان خواهند گذاشت. تعدادی از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخم‌های پرنده میزبان دارند، شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت.

بنابراین موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم‌ها نجات یابند، پارامتری خواهد بود که الگوریتم فاخته قصد بهینه‌سازی آن را دارد. فاخته‌ها برای بیشینه کردن نجات تخم‌های خود به دنبال بهترین منطقه می‌گردند. تمام گروه‌ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می‌کنند. هر گروه در منطقه‌ای نزدیک بهترین موقعیت فعلی ساکن می‌شود.

برای حل یک مسئله بهینه‌سازی لازم است تا مقادیر متغیرهای مسئله به فرم یک آرایه شکل گیرند. در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته این آرایه محل سکونت^۱ نام دارند. در یک مسئله بهینه‌سازی Nvar بعدی محل سکونت فاخته‌ها یک آرایه 1*Nvar خواهد بود که موقعیت فعلی زندگی فاخته‌ها را نشان می‌دهد. این آرایه به شکل رابطه ۲ تعریف می‌شود [۱۸].

$$habitat = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{Nvar}] \quad (۲)$$

میزان مناسب بودن (یا مقدار سود) با ارزیابی تابع سود (تابع هزینه) به دست می‌آید. در طبیعت هر فاخته بین ۵ تا ۲۰ تخم می‌گذارد. این اعداد به عنوان حد بالا و پایین تخصیص تخم به هر فاخته در تکرارهای مختلف استفاده می‌شود. دیگر عادت هر فاخته حقیقی این است که آنها در یک دامنه مشخص تخم‌های خود را می‌گذارند که با آن حداکثر دامنه تخم‌گذاری^۲ گفته می‌شود. در یک مسئله بهینه‌سازی هر متغیر دارای حد بالا var_{hi} و حد پایین var_{low} است که حداکثر دامنه تخم گذاری با استفاده از این حدود قابل تعریف خواهد بود. حداکثر دامنه تخم‌گذاری به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود [۱۸]:

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{Number of current cuckoo's eggs}}{\text{Total number of eggs}} \times (\text{var}_{hi} - \text{var}_{low}) \quad (۳)$$

³ Amplifier

⁴ Exciter

⁵ Generator

⁶ Sensor

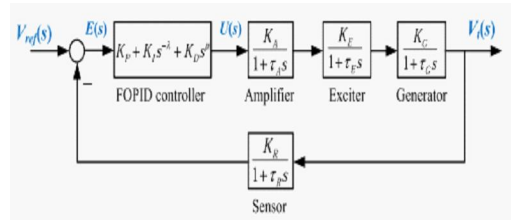
¹ Habitat

² ELR

با رویکرد چند هدفه به عنوان تابع هزینه به صورت رابطه ۵ در نظر گرفته می‌شود:

$$J_1 = w_1 \int_0^{10} |e(t)| dt + w_2 Mp + w_3 t_r + w_4 E_{SS} + w_5 t_s \quad (5)$$

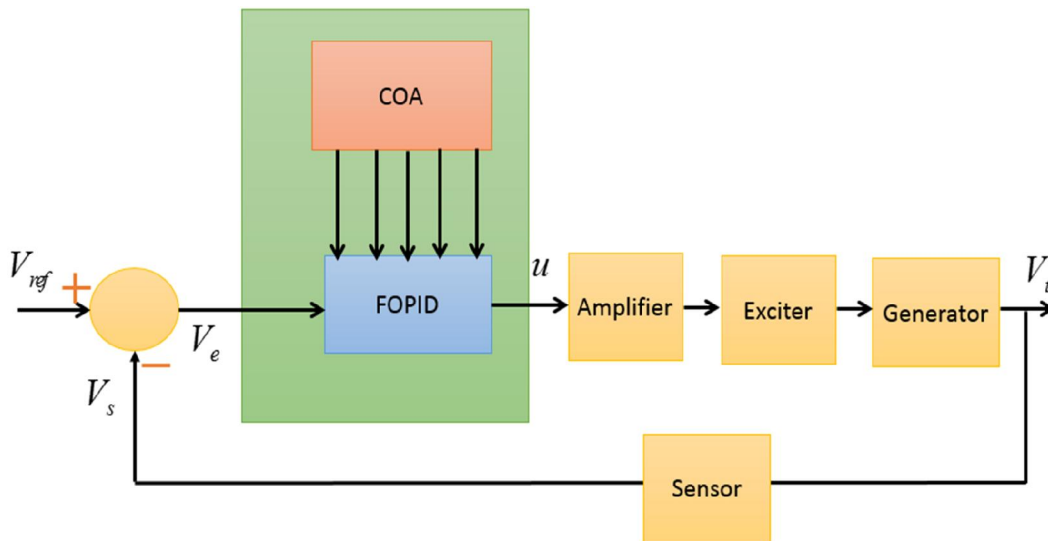
با توجه به انتظارات طراح از سیستم کنترل تنظیم می‌شوند. w_1 ، w_2 ، w_3 ، w_4 ، w_5 پارامترهای طراحی هستند که با زمان صعود، t_s زمان نشست، E_{SS} خطای حالت ماندگار و Mp فرآهش هستند. با هدف کمینه‌سازی و مقایسه نتایج توابع هزینه فوق استفاده شده است. هدف بهینه‌سازی پنج پارامتر سیستم کنترل است؛ بنابراین ابتدا محدوده (حد بالا و پایین) آنها را مطابق جدول ۲ تعریف می‌شود. برای اجرای الگوریتم جمعیت اولیه (تعداد اولیه فاخته‌ها) برابر با ۵ عدد، حداکثر تعداد تکرار برابر با ۵۰ در نظر گرفته شده است. میزان حداکثر تعداد فاخته‌ها در هر مرحله از اجرای الگوریتم نیز، برابر با ۱۰ عدد در نظر گرفته شده است (تعداد فاخته‌هایی که می‌توانند زنده بمانند). برای هر فاخته حداقل ۵ و حداکثر ۱۰ تخم در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این ضریب α در معادله (۳) و ضریب F در (۴) به ترتیب ۵ و ۹ در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۴- بلوک دیاگرام تابع تبدیلی [۱۷]

۵- روش پیشنهادی

با توجه به اینکه هدف مقاله تنظیم ضرایب کنترل کننده مرتبه کسری است، در این قسمت به تنظیم بهینه کنترل کننده PID مرتبه کسری جهت کنترل تنظیم کننده ولتاژ خودکار با رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه و بکارگیری الگوریتم بهینه سازی فاخته می‌پردازیم. برای شبیه‌سازی از نرم افزار متلب ۲۰۱۳ و محیط سیمولینک استفاده شده است. حل کننده ODE45 است. بلوک دیاگرام ساختار کنترل کننده در شکل ۵ داده شده است. ابتدا پارامترهای سیستم تنظیم کننده ولتاژ خودکار، مطابق جدول ۱ انتخاب می‌شوند [۲۶]. برای اعمال الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ابتدا یک معیار



شکل ۵- بلوک دیاگرام سیستم کنترل

جدول ۲- محدوده پارامترها					جدول ۱- پارامترهای سیستم AVR								
پارامتر	μ	λ	k_d	k_i	k_p	Amplifier	Exciter	Generator	Sensor				
						K_A	τ_A	K_E	τ_E	K_G	τ_G	K_S	τ_S
حد پایین	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰	۰	۱۰	۰/۱	۱	۰/۴	۱	۱	۱	۰/۰۱
حد بالا	۲	۲	۱	۱	۳								

جدول ۳- ضرایب بهینه کنترل کننده PID								
Criteria	Controller	k_p	k_i	k_d	t_r	t_s	Mp	E_{ss}
	COA+PID	۰/۶۸۷۹	۰/۵۲۵۱	۰/۲۸۷۶	۰/۳۴۰۰	۰/۴۰۰۰	۰/۰۰۸۱	۰
J_1	PSO+PID	۰/۶۵۷۰	۰/۵۳۹۰	۰/۲۴۵۸	۰/۳۸۰۰	۰/۴۵۰۰	۰/۰۱۱۶	۰
	TLBO+PID	۰/۵۳۰۲	۰/۴۰۰۱	۰/۱۷۸۷	۰/۵۳۰۰	۱/۳۹۰۰	۰/۰۰۶۴	۰

ضرایب استفاده شده مقایسه می‌شوند. برای مقایسه بهتر همه نتایج در جدول ۳ آمده است. شکل ۷ پاسخ ردگیری را در نتیجه اعمال الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد. وجه مشترک همه الگوریتم‌ها خطای حالت ماندگار صفر است. از طرفی پاسخ حاصل از اعمال الگوریتم فاخته دارای زمان صعود و زمان نشست کمتری است، ولی از نقطه نظر فراجهش الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری دارای فراجهش کمتری است. لازم به ذکر است که با توجه به نمودار بود^۱ حاشیه فاز ۴/۶۹ است که نشان دهنده پایداری بسیار خوب سیستم کنترل دارد. روی هم رفته با مقایسه نتایج مشخص است که الگوریتم فاخته بهتر از بقیه الگوریتم‌ها عمل کرده است؛ بنابراین در ادامه فقط نتایج الگوریتم فاخته ارائه می‌شود.

۶-۲- طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه
در این قسمت با توجه به در نظر گرفتن تابع هزینه J_1 به طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه با استفاده از الگوریتم فاخته می‌پردازیم. ضرایب w_1, w_2, w_3 و w_4 مشابه قسمت قبل در نظر گرفته می‌شوند؛ در نتیجه اعمال الگوریتم

¹ Bode Diagram

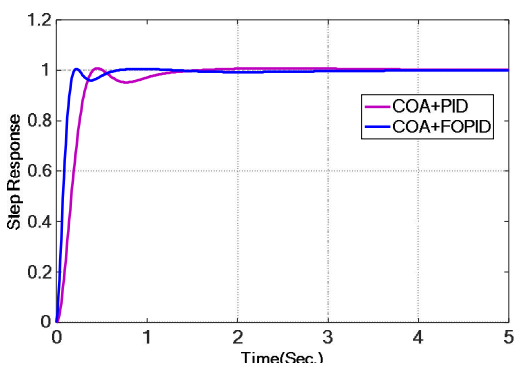
۶- ارایه نتایج

در ادامه نتایج شبیه‌سازی با اعمال کنترل کننده PID کلاسیک و مرتبه کسری با مقایسه آن‌ها در حضور عدم قطعیت پارامتری ارائه می‌شود.

۶-۱- طراحی کنترل کننده PID بهینه

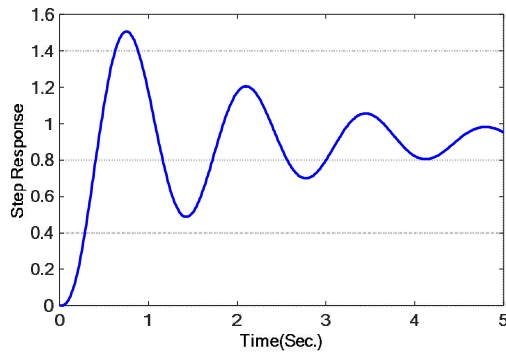
در این قسمت با توجه به در نظر گرفتن تابع هزینه J_1 به طراحی کنترل کننده PID بهینه با استفاده از الگوریتم فاخته پرداخته می‌شود. ضرایب w_1, w_2, w_3, w_4 و w_5 به ترتیب ۱، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۱ در نظر گرفته می‌شود. قبل از اعمال کنترل کننده پاسخ پله سیستم AVR در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پاسخ دارای فراجهش و خطای حالت ماندگار زیادی است؛ لذا وجود کنترل کننده برای بهبود پاسخ ضروری است؛ در نتیجه اعمال الگوریتم بهینه سازی فاخته بمنظور تنظیم ضرایب کنترل کننده PID پارامترهای سیستم کنترل در جدول ۳ آمده است. برای ارزیابی بهتر عملکرد کنترل کننده طراحی شده، نتایج بدست آمده با مرجع [۲۶] مقایسه می‌شوند. در این مرجع، نویسندگان از الگوریتم بهینه سازی پرندگان استفاده کرده‌اند؛ همچنین نتایج با مرجع [۱۶] نیز که در آن از الگوریتم جدیدتر مبتنی بر آموزش و یادگیری برای تنظیم

شکل ۹ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوریتم فاخته به خوبی همگرا شده و تقریباً بعد از ۴ تکرار به جوابی بهتر از قبل رسیده است. لازم به ذکر است که با توجه به نمودار بود حاشیه فاز حدود ۷۰ درجه است که نشان دهنده پایداری بسیار خوب سیستم کنترل دارد. حال به مقایسه عملکرد کنترل کننده PID مرتبه کسری طراحی شده با جدیدترین کار انجام شده در زمینه طراحی کنترل کننده برای سیستم تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار یعنی MOEO^۱ می‌پردازیم. نتایج گزارش شده در مرجع [۱۷]، در جدول ۵ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، از نقطه نظر زمان صعود و زمان نشست الگوریتم MOEO برتری دارد، ولی از نقطه نظر فراجهدش الگوریتم فاخته بهتر عمل کرده است. البته لازم به ذکر است که مقدار نهایی تابع هزینه در الگوریتم فاخته با توجه به شکل ۹ تقریباً ۱/۴۶ است، ولی در الگوریتم MOEO مقدار نهایی تابع هزینه ۱/۸۳ است؛ همچنین پاسخ پله کنترل کننده PID مرتبه کسری طراحی شده در این مقاله و مرجع [۱۷] در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای ارزیابی بهتر عملکرد کنترل کننده معیارهایی مانند IAE، ITAE، JSE، یا ITSE برای نشان دادن سطح زیر منحنی پاسخ سیستم حلقه بسته در نظر گرفته می‌شود. تعریف این معیارها در مرجع [۲۷] آمده است. نتایج در جدول ۶ آرایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در تمامی معیارها بجز ITAE کنترل کننده طراحی شده با الگوریتم فاخته بهتر عمل کرده است.

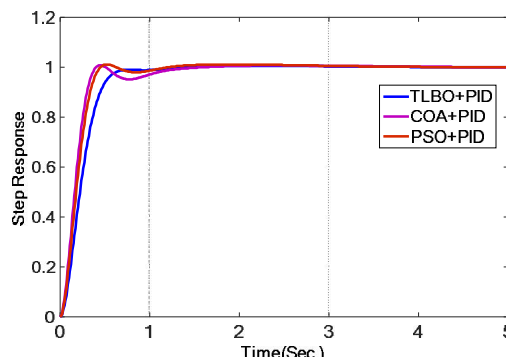


شکل ۸- عملکرد ردگیری کنترل کننده PID و FOPID

¹ Improved Multi-Objective Extremal Optimization (MOEO)



شکل ۶- پاسخ پله سیستم AVR بدون کنترل کننده



شکل ۷- پاسخ پله سیستم AVR با کنترل کننده PID

بهینه سازی فاخته پارامترهای بهینه شده سیستم کنترل در جدول ۴ آمده است. برای مقایسه بهتر، نتایج قسمت قبل نیز در جدول ۴ آورده شده است. علاوه بر این پاسخ سیستم کنترل با استفاده از هر دو کنترل کننده PID و FOPID در شکل ۸ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به شکل ۸ و جدول ۴ کنترل کننده PID مرتبه کسری به مراتب بهتر عمل کرده است. این کنترل کننده دارای زمان صعود و نشست کمتر است. این نتیجه دور از انتظار نبود؛ زیرا همانطور که قبلاً بیان شد، کنترل کننده PID مرتبه کسری دارای دو درجه آزادی بیشتر از کنترل کننده PID کلاسیک است و این آزادی عمل باعث افزایش توانایی الگوریتم بهینه سازی فاخته در پیدا کردن جواب بهینه می‌شود. تابع هزینه الگوریتم فاخته در فرآیند بهینه‌سازی ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری در شکل ۹ نشان داده شده است.

برای مقایسه بهتر تابع هزینه الگوریتم فاخته در فرآیند بهینه سازی ضرایب کنترل کننده PID کلاسیک نیز در

جدول ۴- ضرایب بهینه کنترل کننده FOPID

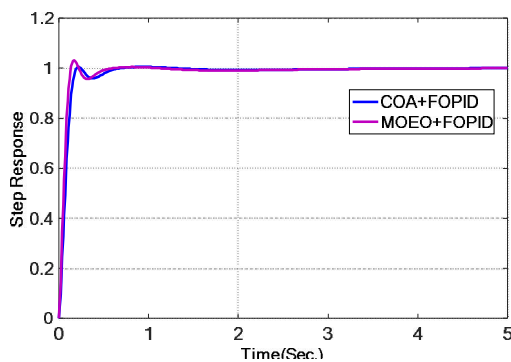
Criteria	Controller	k_p	k_i	k_d	λ	μ	t_s	t_r	Mp	E_{ss}
J_1	COA+PID	۰/۶۸۷۹	۰/۵۲۵۱	۰/۲۸۷۶	--	--	۰/۳۴۰۰	۰/۴۰۰۰	۰/۰۰۸۱	۰
	COA+FOPID	۲/۱۲۳۸	۰/۸۴۱۹	۰/۴۳۷۲	۱/۰۸۴۵	۱/۲۹۸۹	۰/۱۶	۰/۲	۰/۰۰۵۳	۰

جدول ۵- ضرایب بهینه کنترل کننده FOPID [۱۷]

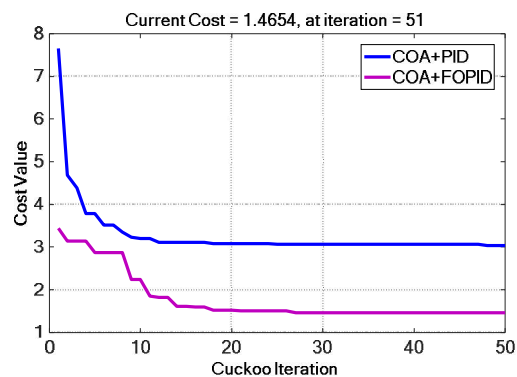
Criteria	Controller	k_p	k_i	k_d	λ	μ	t_s	t_r	Mp	E_{ss}
J_1	MOEO + FOPID	۲/۹۷۳۷	۰/۹۰۸۹	۰/۵۳۸۳	۱/۱۴۴۶	۱/۳۴۶۲	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۰۳۲۱	۰
	COA+FOPID	۲/۱۲۳۸	۰/۸۴۱۹	۰/۴۳۷۲	۱/۰۸۴۵	۱/۲۹۸۹	۰/۱۶	۰/۲	۰/۰۰۵۳	۰

جدول ۶- مقایسه کنترل کننده FOPID با معیارهای مختلف

Criteria	Controller	IAE	$ITAE$	ISE	$ITSE$
J_1	COA + FOPID	۹/۹۷۱۸	۳/۹۸۱۱	۵/۱۱۸۴	۰/۲۰۶۹
	MOEO + FOPID	۸/۴۹۱۴	۴/۴۴۶۷	۳/۹۲	۰/۱۲۶۳



شکل ۱۰- ردگیری کنترل کننده پیشنهادی در [۱۷]



شکل ۹- تابع هزینه الگوریتم فاخته در بهینه سازی کنترل کننده PID و FOPID

۶-۳- بررسی مقاوم بودن سیستم کنترل

با توجه به اینکه پارامترهای سیستم قدرت ثابت نیستند، لذا با تغییر بار نقطه کاری سیستم قدرت تغییر می‌کند [۱۶]. از این رو آنالیز مقاوم بودن سیستم کنترل ضروری بنظر می‌رسد. برای این کار ثابت زمانی بلوک‌های مختلف سیستم تنظیم کننده‌های ولتاژ خودکار بصورت $\pm 2.5\%$ و $\pm 5.0\%$ مقادیر نامی آنها تغییر می‌کنند. برای بررسی بیشتر درصد تغییرات فراجش، زمان صعود و زمان نشست به ازای

تغییرات ثابت زمانی بلوک‌های مختلف سیستم تنظیم کننده-های ولتاژ خودکار در جدول ۷ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، به ازای تغییرات پارامترها نرخ تغییرات قابل ملاحظه نمی‌باشد. از این رو کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم فاخته، دارای قوام خوبی در مواجهه با عدم قطعیت پارامتری در سیستم است.

جدول ۷- نتایج آنالیز سیستم AVR به ازای عدم قطعیت پارامتری

ثابت زمانی	نرخ تغییرات	Mp	t_s	t_r
τ_g	-۰.۵۰	۰.۰۹۲۱	۰.۳۶۰۰	۰.۱۹۰۰
	-۰.۲۵	۰.۰۳۹۹	۰.۳۹۰۰	۰.۱۴۰۰
	۰	۰.۰۰۵۳	۰.۱۹۰۰	۰.۱۶۰۰
	+۰.۲۵	۰.۰۱۶۹	۰.۲۱۰۰	۰.۵۶۰۰
	+۰.۵۰	۰.۰۲۸۵	۰.۲۷۰۰	۰.۵۳۰۰
τ_e	-۰.۵۰	۰.۰۳۹۶	۰.۴۳۰۰	۰.۱۷۰۰
	-۰.۲۵	۰.۰۱۷۹	۰.۴۲۰۰	۰.۱۵۰۰
	۰	۰.۰۰۵۳	۰.۱۶۰۰	۰.۱۹۰۰
	+۰.۲۵	۰.۰۱۶۹	۰.۲۰۰۰	۰.۲۴۰۰
	+۰.۵۰	۰.۰۳۰۴	۰.۲۳۰۰	۰.۲۸۰۰
τ_a	-۰.۵۰	۰.۰۰۳۱	۰.۴۰۰۰	۰.۱۶۸۰۰
	-۰.۲۵	۰.۰۰۴۱	۰.۳۹۰۰	۰.۱۶۴۰۰
	۰	۰.۰۰۵۳	۰.۱۶۰۰	۰.۱۹۰۰
	+۰.۲۵	۰.۰۳۲۰	۰.۲۲۰۰	۰.۲۰۰۰
	+۰.۵۰	۰.۰۵۴۷	۰.۳۱۰۰	۰.۴۱۰۰
τ_r	-۰.۵۰	۰.۰۰۵۲	۰.۱۸۰۰	۰.۱۶۱۰۰
	-۰.۲۵	۰.۰۰۵۲	۰.۱۷۰۰	۰.۲۱۰۰
	۰	۰.۰۰۵۳	۰.۱۶۰۰	۰.۱۹۰۰
	+۰.۲۵	۰.۰۱۶۱	۰.۱۶۰۰	۰.۱۸۰۰
	+۰.۵۰	۰.۰۲۸۸	۰.۱۵۰۰	۰.۱۷۰۰

- system. International Journal of Research and Reviews in Artificial intelligence 1(4).
- [9] Axtell M, Bise ME (1990) Fractional calculus application in control systems. Paper presented at the Aerospace and Electronics Conference, 1990. NAECON 1990, Proceedings of the IEEE 1990 National.
- [10] Zamani M, Karimi-Ghartemani M, Sadati N, Parniani M (2009) Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization. Control Eng Pract 17(12): 1380-1387.
- [11] Ramezani H, Balochian S, Zare A (2013) Design of optimal fractional-order PID controllers using particle swarm optimization algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. Journal of Control, Automation and Electrical Systems 24(5): 601-611.
- [12] Tang Y, Cui M, Hua C, Li L, Yang Y (2012) Optimum design of fractional order PID controller for AVR system using chaotic ant swarm. Expert Syst Appl 39(8): 6887-6896.
- [13] Gozde H, Taplamacioglu MC (2011) Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. J Franklin I 348(8): 1927-1946.
- [14] Pan I, Das S (2012) Chaotic multi-objective optimization based design of fractional order PID controller in AVR system. Int J Elec Power 43(1): 393-407.
- [15] Pan I, Das S (2013) Frequency domain design of fractional order PID controller for AVR system using chaotic multi-objective optimization. Int J Elec Power 51: 106-118.
- [16] Chatterjee S, Mukherjee V (2016) PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique. Int J Elec Power 77(1): 418-429.
- [17] Zeng G-Q, Chen J, Dai Y-X, Li L-M, Zheng C-W, Chen M-R (2015) Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization. Neurocomputing 160: 173-184.
- [18] Rajabioun R (2011) Cuckoo optimization algorithm. Appl Soft Comput 11(8): 5508-5518.
- [19] Cao J-Y, Cao B-G Design of fractional order controllers based on particle swarm optimization. In: Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on, 2006. IEEE, pp 1-6.
- [20] Zhao C, Xue D, Chen Y (2005) A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order plants. Paper presented at the IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه برای کنترل تنظیم کننده ولتاژ خودکار به منظور تنظیم ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون با الگوریتم بهینه سازی فاخته پرداخته شد. نتایج نشان داد، در صورتی که این کنترل کننده به درستی تنظیم شود، دارای عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده PID کلاسیک است. در این مقاله برای تنظیم دقیق کنترل کننده PID مرتبه کسری از الگوریتم جدید بهینه سازی فاخته استفاده شد. نتایج نشان داد که این الگوریتم دارای همگرایی بسیار خوبی است؛ همچنین عملکرد کنترل کننده PID مرتبه کسری به ازای تغییر پارامترهای سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، کنترل کننده PID مرتبه کسری دارای پاسخ مقاوم و خوبی در مقابل تغییرات داده شده است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، یکی از مزیت‌های کنترل کننده PID مرتبه کسری نسبت به کنترل کننده PID کلاسیک، مقاومت بیشترش در مقابل تغییرات پارامترهای سیستم است.

۸- مراجع

- [1] Das S (2008) Functional fractional calculus for system identification and controls. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [2] Das S (2011) Functional fractional calculus. Springer Science & Business Media.
- [3] Podlubny I (1999) Fractional-order systems and PI/sup/spl lambda/D/sup/spl mu/-controllers. IEEE T Automat Contr 44(1): 208-214.
- [4] Tavazoei MS, Haeri M (2008) Chaos control via a simple fractional-order controller. Phys Lett A 372 (6): 798-807.
- [5] Maione G, Lino P (2007) New tuning rules for fractional PI α controllers. Nonlinear Dynam 49(1-2): 251-257.
- [6] Lazarević MP, Batalov SA, Latinović TS (2013) Fractional PID Controller Tuned by Genetic Algorithms for a Three DOF's Robot System Driven by DC motors. IFAC Proceedings Volumes 46(1): 385-390.
- [7] Yumuk E, Güzelkaya M, Eksin İ (2019) Analytical fractional PID controller design based on Bode's ideal transfer function plus time delay. ISA T 91: 196-206.
- [8] Mellouli E, Sefriti S, Boumhidi I (2011) Direct adaptive fuzzy control for an uncertain three-tank-

- with an improved differential evolution. Eng Appl Artif Intel 22(2): 343-350.
- [25] Keljik J (2013) Electricity 3: Power generation and delivery. Nelson Education.
- [26] Gaing Z-L (2004) A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. IEEE T Energy Conver 19(2): 384-391.
- [27] Pradhan R, Pradhan S, Pati BB (2019) Design and Performance Evaluation of Fractional Order PID Controller for Heat Flow System Using Particle Swarm Optimization. In: Computational Intelligence in Data Mining. Springer, pp 261-271.
- [21] Milos S, Martin C (2006) The fractional order PID controller outperforms the classical one. Paper presented at the Proc. 7th Int. Sci. & Tech. Conf.-Process Control.
- [22] Padula F, Visioli A (2011) Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers. J Process Contr 21(1): 69-81.
- [23] Yang X-S, Deb S (2009) Cuckoo search via Lévy flights. Paper presented at the World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing.
- [24] Biswas A, Das S, Abraham A, Dasgupta S (2009) Design of fractional-order PI λ D μ controllers