



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 13, No. 2, 2022
Research Paper

AVR System Controlling Using Fuzzy-PID Controller with Optimized Membership Functions

Saber Falahati Aliabadi^{1,2}, Seyed Abbas Taher^{3*}

¹ PhD, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

² Esfahan Regional Electric Company, Iran

³ Full Professor, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract:

The Automatic Voltage Regulator (AVR) system is one of the important systems in power grids. Proportional – Integral (PI) controller is usually used in industries to control the AVR system. However, to increase the flexibility or improving the performance of the PI controller, fractional order PID (FOPID) or combined PID and fuzzy controllers can be used. A new method for the control of AVR has been proposed in this paper. For this purpose, a Fuzzy-PID controller with optimized membership functions has been employed. Input membership functions along with gains of Fuzzy-PID controller have been optimized with imperialist competitive algorithm (ICA) to control the AVR system. Optimizations have been done with various fitness functions. To compare, simulations have been carried out by optimized fractional order PID (FOPID) controller, too. Results of simulations have illustrated that the proposed controller has better performance compared to the FOPID controller according to settling time, overshoot, fitness function and the maximum of control signal values in all cases in such a way that the minimum improvement of overshoot, settling time, the maximum value of control signal, and fitness function value have improved 59%, 33%, 65%, and 3%, respectively. Moreover, to verify the robustness of the proposed controller to system uncertainties, simulations have been carried out by changing the parameters of the system. Results of simulations have shown the perfect performance of the proposed controller.

Keywords: Fuzzy-PID controller, Optimized membership functions, FOPID controller, AVR system.



2252-083X/ © 2022 The Authors. Published by University of Isfahan
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.2021.127174.1450>

کنترل سیستم AVR با استفاده از کنترل کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده

صابر فلاحتی علی آبادی^۱، سید عباس طاهر^{۳*}

۱- دکتری، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

۲- شرکت برق منطقه‌ای اصفهان، ایران

s_falahati@yahoo.com

۳- استاد تمام، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان- ایران

sataher@kashanu.ac.ir

چکیده: سیستم تنظیم خودکار ولتاژ (AVR) یکی از سیستم‌های بااهمیت در سیستم‌های قدرت است. در صنعت، بیشتر از کنترل کننده تناسبی انتگرالی (PI) برای کنترل سیستم AVR استفاده می‌شود؛ با این حال، برای افزایش انعطاف‌پذیری یا بهبود عملکرد کنترل کننده PI می‌توان از کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری یا ترکیب آن با کنترل کننده فازی استفاده کرد. در این مقاله، روش جدیدی به منظور کنترل سیستم AVR ارائه شده است. در این روش، کنترل کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده برای انجام این امر به کار گرفته شده است. بدین منظور، در ابتدا توابع عضویت کنترل کننده مذکور، ایجاد و سپس توابع عضویت ورودی به همراه بهره‌های این کنترل کننده بهینه می‌شوند. برای بهینه‌سازی از الگوریتم رقابت استعماری استفاده می‌شود. بهینه‌سازی‌ها با توابع هدف مختلفی صورت می‌گیرد و به منظور مقایسه، شبیه‌سازی‌ها با کنترل کننده PID مرتبه کسری (FOPID) بهینه شده نیز انجام می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در همه موارد، عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی را نسبت به کنترل کننده FOPID بر حسب زمان نشست، فراجش، مقدار تابع هدف و حداکثر سیگنال کنترلی نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که فراجش حداقل به مقدار ۰.۵۹٪، زمان نشست حداقل به اندازه ۰.۳۳٪، سیگنال کنترلی حداقل به میزان ۰.۶۵٪ و مقدار تابع هدف حداقل به میزان ۰.۳٪ بهبود یافته‌اند. همچنین، به منظور بررسی میزان مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی نسبت به عدم قطعیت‌های موجود در سیستم، شبیه‌سازی‌ها با تغییر پارامترهای سیستم نیز انجام شده‌اند که نتایج حاصل از آن، عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: کنترل کننده Fuzzy-PID، توابع عضویت بهینه شده، سیستم AVR، کنترل کننده FOPID

۱- مقدمه

انحراف از این مقادیر نامی سبب کاهش کارایی و نیز طول عمر آنها می‌شود. در سیستم‌های تولید توان از سیستم تنظیم ولتاژ اتوماتیک (AVR^۱) به منظور حفظ ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون در یک سطح مشخص استفاده می‌شود [۱]. سیستم تنظیم ولتاژ اتوماتیک، توجه زیادی را در دهه اخیر به خود جلب کرده است [۲]. روش‌های کنترلی متعددی در مقالات برای کنترل سیستم AVR معرفی شده است. در مراجع متعددی از کنترل کننده PID به منظور کنترل سیستم AVR استفاده شده است [۳-۸]. در مرجع [۳] الگوریتم ترکیبی GA^۲ و BF^۳ برای تنظیم PID در یک سیستم AVR معرفی شده است. مرجع [۴] از یک نوع PSO^۴ برای

شبکه‌های توزیع قدرت بزرگ باید پروفیل ولتاژ را در طول زمان در بازه پذیرفته شده حفظ کنند؛ به‌ویژه تجهیزات در صنایع برای فرکانس و ولتاژ معینی طراحی شده‌اند و

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

نام نویسنده مسئول: سیدعباس طاهر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - کاشان - دانشگاه کاشان
- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

PID با کنترل کننده فازی است. در مراجع مختلفی از این نوع کنترل کننده برای کنترل سیستم AVR استفاده شده است [۱۴-۱۶].

در مرجع [۱۴] یک کنترل کننده Fuzzy-PID با استفاده از کنترل کننده‌های منطقی برنامه‌پذیر ($PLC^{(1)}$) و MATLAB پیاده‌سازی شده است. در مرجع [۱۵] یک روش جدید طراحی برای تعیین پارامترهای کنترل کننده PID یک سیستم AVR ارائه شده است. همچنین، نویسندگان این مقاله در کار قبلی خود از کنترل کننده Fuzzy-PID برای کنترل سیستم AVR استفاده کرده‌اند [۱۶].

در این مقاله، نویسندگان از کنترل کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده برای کنترل سیستم AVR استفاده کرده‌اند؛ ولی تفاوت این مطالعه با کار قبلی [۱۶] در این است که در اینجا علاوه بر بهره‌های کنترل کننده Fuzzy-PID، محل توابع عضویت ورودی نیز بهینه شده‌اند که با انجام این کار انعطاف‌پذیری کنترل کننده بالاتر می‌رود. به منظور مقایسه، شبیه‌سازی‌ها با کنترل کننده FOPID، بهینه و با توابع هدف مختلف انجام شده‌اند. ادامه مقاله بدین صورت سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم، سیستم تحت مطالعه آورده می‌شود. در بخش سوم، کنترل کننده پیشنهادی معرفی شده است. در بخش چهارم، شبیه‌سازی‌ها انجام می‌شوند و درباره نتایج آن بحث می‌شود و در نهایت در بخش پنجم، نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

۲- سیستم مطالعه شده

مدل مطالعه شده برای سیستم AVR در شکل (۱) آورده شده است. بخش‌های مختلف این سیستم عبارت‌اند از: سیستم تقویت کننده، سیستم تحریک، مدل ژنراتور و قسمت سنسور که در ادامه هر یک از آنها معرفی می‌شوند [۱۶]:

الف) مدل تقویت کننده

مدل تقویت کننده به صورت ذیل است:

$$\frac{V_R(s)}{V_C(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \quad (1)$$

ب) مدل سیستم تحریک

مدل سیستم تحریک به صورت رابطه (۲) بوده و مقادیر

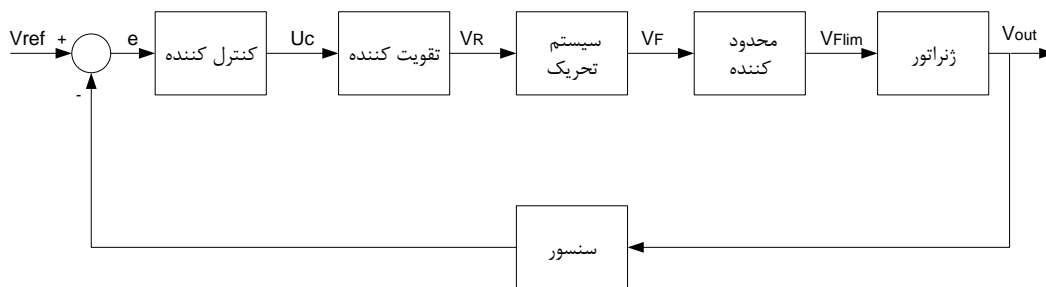
تنظیم پارامترهای PID در سیستم AVR استفاده کرده است. همچنین، استفاده از بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم مورچگان نامنظم (CAS^5) در مرجع [۵] برای تنظیم پارامترهای PID شایان توجه قرار گرفته است. مرجع [۶] از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA^6) برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌های PID و $PIDA^7$ در سیستم AVR استفاده کرده است. در مرجع [۷] به یک روش جدید تنظیم کنترل کننده PID در سیستم AVR با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته (CS^8) با یک معیار ارزیابی حوزه زمان جدید پرداخته شده است. در مرجع [۸] از ترکیب جدیدی از بهینه‌سازی کلونی مورچه ساده شده و روش Nelder-Mead برای طراحی بهینه کنترل کننده PID استفاده شده است. در تمام موارد فوق از کنترل کننده PID برای تنظیم سیستم AVR استفاده شده است؛ ولی با این حال، کنترل کننده PID مرتبه کسری ($FOPID^9$) که دارای انعطاف بیشتری نسبت به PID است، در مراجع مختلفی برای کنترل سیستم AVR معرفی شده است [۹-۱۳]. کنترل کننده PID دارای سه پارامتر تنظیمی است؛ ولی کنترل کننده FOPID دارای پنج پارامتر تنظیمی است؛ بنابراین، کنترل‌پذیری بیشتری نسبت به PID مرسوم فراهم می‌آورد.

مرجع [۱] از الگوریتم بهینه‌سازی شیر مورچه (ALO^{10}) برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده FOPID در سیستم AVR استفاده کرده است. در مرجع [۹] از کنترل کننده FOPID به همراه الگوریتم CAS برای کنترل سیستم AVR بهره گرفته شده است. مرجع [۱۰] از الگوریتم PSO برای طراحی کنترل کننده FOPID به منظور کنترل سیستم AVR استفاده کرده است. در مرجع [۱۱] کنترل کننده FOPID به همراه فیلتر کسری برای سیستم AVR ارائه شده است. این کنترل کننده دارای هفت پارامتر مستقل بوده و برای تنظیم آنها از الگوریتم سینوس - کسینوس استفاده شده است. مرجع [۱۲] از الگوریتم جستجوی فاخته برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده FOPID در یک سیستم AVR استفاده کرده است. در مرجع [۱۳] از الگوریتم بهینه‌سازی Jaya به منظور بهبود پایداری و پاسخ گذرای یک سیستم AVR مبتنی بر FOPID استفاده شده است. از دیگر روش‌های معرفی شده برای بهبود عملکرد کنترل کننده PID در مقالات، ترکیب

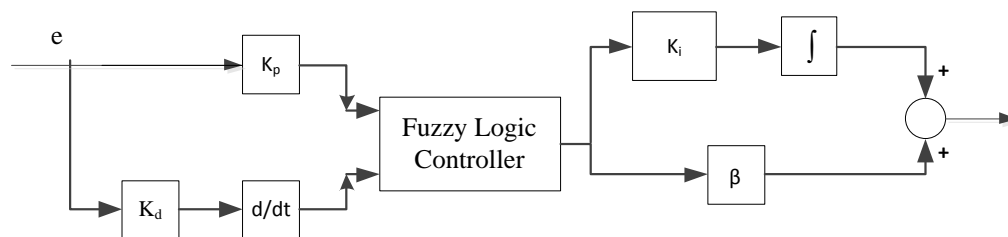
شماتیک کلی کنترل کننده Fuzzy-PID استفاده شده در این مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. ساختار ابتدایی این کنترل کننده از مرجع [۱۷] اخذ شده است؛ ولی برای بهبود عملکرد سیستم AVR، محل توابع عضویت ورودی آن بهینه شده‌اند. ورودی‌های کنترل کننده فازی خطا و مشتق خطا است. قوانین فازی به کاررفته در کنترل کننده در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. در شکل‌های (۳) تا (۵) توابع عضویت ورودی و خروجی نشان داده شده‌اند. نقاط A تا D در شکل (۳) و نقاط E تا H در شکل (۴) با بهینه‌سازی تعیین می‌شوند. علاوه بر نقاط مذکور، پارامترهای K_d, K_p, K_i و β با بهینه‌سازی به دست می‌آیند. محدوده مجاز برای بهینه‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\begin{aligned} -0.8 \leq A, E \leq -0.4 \\ -0.4 \leq B, F \leq 0 \\ 0 \leq C, G \leq 0.4 \\ 0.4 \leq D, H \leq 0.8 \\ -1 \leq K_p, K_d, K_i, \beta \leq 1 \end{aligned}$$

همان‌طور که قبلاً گفته شد به منظور مقایسه، شبیه‌سازی‌ها با کنترل کننده FOPID نیز صورت گرفته‌اند. کنترل کننده FOPID در مراجع مختلفی از جمله [۱۸] معرفی شده و در اینجا به منظور رعایت اختصار از آوردن توضیحات بیشتر خودداری شده است.



شکل (۱): شماتیک سیستم مطالعه شده



شکل (۲): ساختار کنترل کننده Fuzzy-PID به کاررفته در مقاله

K_E و τ_E معمولاً به ترتیب بین ۱۰ تا ۴۰۰ و ۰/۵ تا ۱ ثانیه‌اند.

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (۲)$$

ج) مدل ژنراتور

در این مطالعه، ژنراتور به صورت زیر مدلسازی شده است:

$$\frac{V_G(s)}{V_{F\lim}(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \quad (۳)$$

که در آن $0.7 < K_G < 1$ و $1 < \tau_G < 2$ هستند. این مقادیر به بار، بسیار وابسته‌اند.

د) مدل سنسور

مجموعه قسمت‌های سنسور به صورت رابطه (۴) مدل شده است:

$$\frac{V_S(s)}{V_{out}(s)} = \frac{K_S}{1 + \tau_S s} \quad (۴)$$

مقدار ثابت زمانی سنسور معمولاً بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۶ انتخاب می‌شود.

مقادیر پارامترهای به کاررفته در این مقاله در پیوست آورده شده‌اند.

۳- طراحی کنترل کننده پیشنهادی

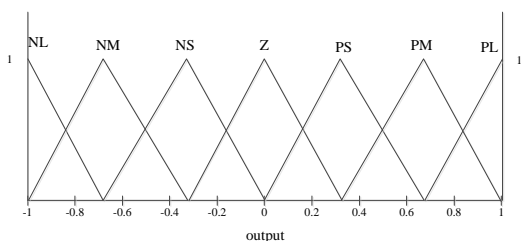
جدول (۱): قوانین فازی به کاررفته

e-de/dt	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	Z	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PL	PL
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z

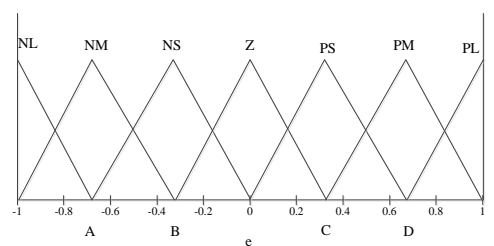
به عنوان مستعمره در نظر گرفته می شوند. امپریالیست ها بسته به قدرت خود، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود می کشند. به طور خلاصه، مراحل الگوریتم رقابت استعماری بدین صورت برشمرده می شوند:

- شکل دهی امپراطوری های اولیه؛
- سیاست جذب؛
- انقلاب؛ تغییرات ناگهانی در موقعیت یک کشور؛
- جابه جایی موقعیت مستعمره و امپریالیست؛
- رقابت استعماری؛
- سقوط امپراطوری های ضعیف.

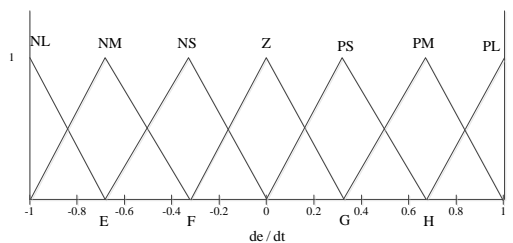
توضیحات بیشتر درباره الگوریتم رقابت استعماری در مرجع [۱۹] آورده شده که به منظور رعایت اختصار از آوردن توضیحات بیشتر خودداری شده است. فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری در شکل (۶) نشان داده شده است. برخی از پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری در پیوست آورده شده اند.



شکل (۵): تابع عضویت خروجی کنترل کننده



شکل (۳): تابع عضویت خطا



شکل (۴): تابع عضویت مشتق خطا

امروزه الگوریتم رقابت استعماری به دلیل سرعت و دقت زیاد آن در دستیابی به پاسخ های مسئله، محبوبیت زیادی یافته است [۱۶ و ۱۸-۱۹]. در ادامه با استفاده از مرجع [۲۰] به اختصار الگوریتم رقابت استعماری، معرفی و فلوجارت آن نشان داده می شود.

۴- الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری همانند دیگر الگوریتم های تکاملی با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی آغاز می شود که هر کدام از آنها یک «کشور» نامیده می شوند. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به عنوان امپریالیست و باقیمانده جمعیت نیز

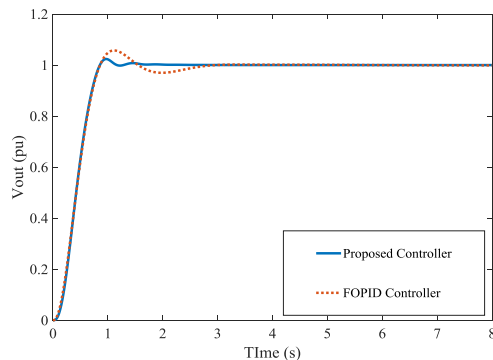
۵-۱- مطالعه موردی اول

در این مطالعه، معیار ITAE+ISCO به صورت ذیل به عنوان تابع هدف انتخاب شده است:

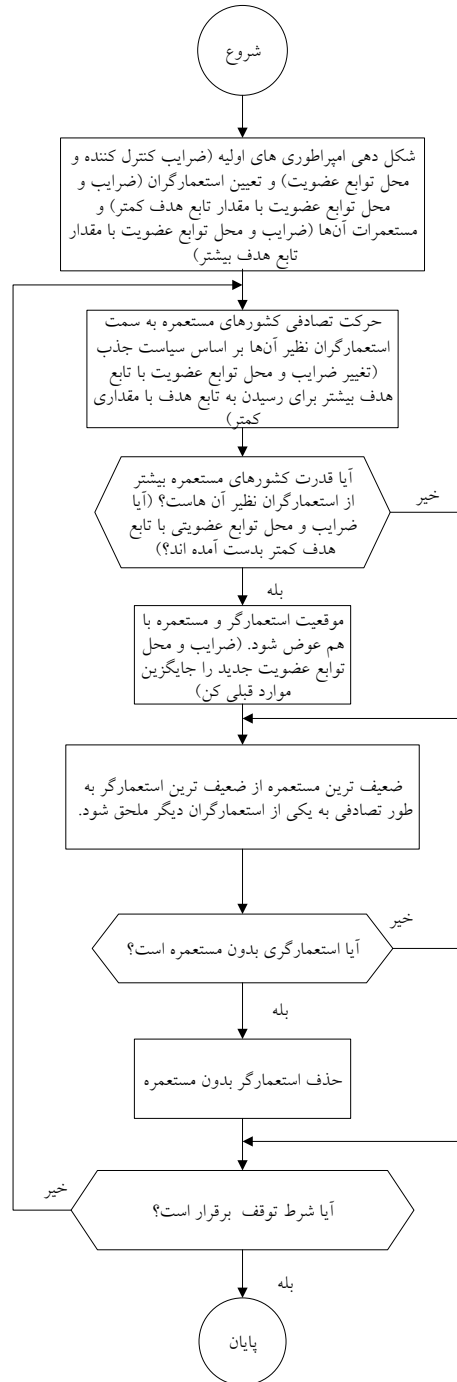
$$F1 = \int_0^T |e| dt + \int_0^T u^2 dt \quad (5)$$

که در آن u خروجی کنترل کننده بوده و e خطا است. مقدار خطا از اختلاف خروجی سیستم و ورودی مرجع حاصل می شود. ورودی مرجع در این مطالعات تابع پله است. شبیه سازی ها با کنترل کننده پیشنهادی و کنترل کننده FOPID بهینه شده صورت گرفته و نتایج در جدول (۲) آورده شده اند.

همان طور که مشاهده می شود با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی، مقدار تابع هدف کمتری به دست آمده است؛ به گونه ای که مقدار فراجشش و زمان نشست با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده FOPID بهینه شده به ترتیب به اندازه ۰.۵۹٪ و ۰.۵۶٪ کاهش یافته است. علاوه بر آن، مقدار حداکثر سیگنال کنترلی با استفاده از روش پیشنهادی تقریباً ۰/۷ بوده که نسبت به سیگنال کنترلی حاصل از کنترل کننده FOPID، یعنی ۵/۹۹۲۷، بسیار کمتر است. خروجی سیستم در شکل (۷) و سیگنال کنترلی کنترل کننده ها در شکل (۸) نشان داده شده است. همچنین، روند بهینه سازی الگوریتم رقابت استعماری برای پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی و کنترل کننده FOPID به ترتیب در شکل های (۹) و (۱۰) نشان داده شده اند. زمان همگرایی الگوریتم تقریباً بین ۲:۳۰ تا ۳ ساعت است.



شکل (۷): خروجی سیستم در مطالعه موردی اول



شکل (۶): فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری

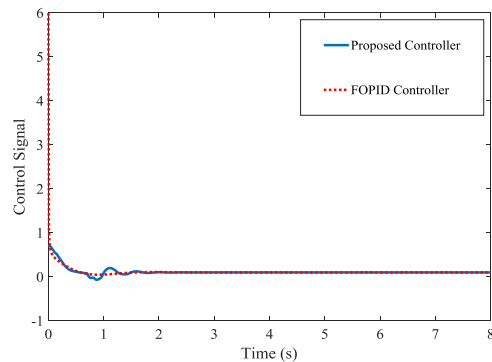
۵- نتایج شبیه سازی

به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، شبیه سازی ها در پنج مطالعه موردی صورت گرفته اند که در ادامه بیان می شوند.

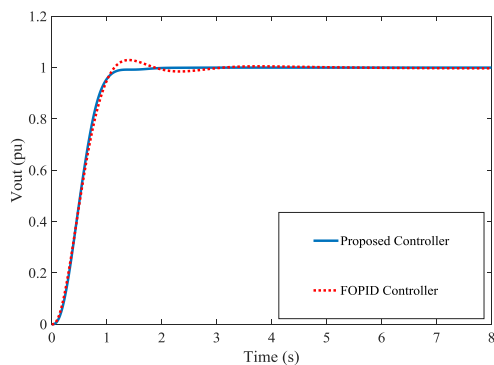
کنترل سیستم AVR با استفاده از کنترل کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده

$$F2 = \int_0^T t^2 e^2 dt + \int_0^T u^2 dt \quad (6)$$

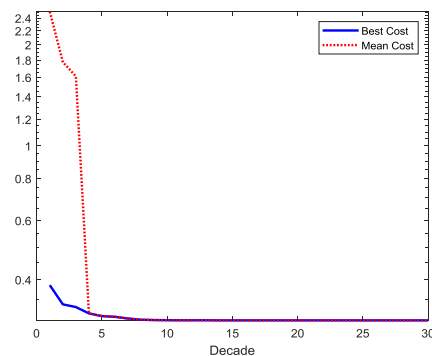
نتایج حاصل از شبیه سازی ها برای این مطالعه در جدول (۳) و شکل های (۱۱) تا (۱۲) آورده شده اند. همان طور که مشاهده می شود کنترل کننده پیشنهادی عملکرد بهتری داشته و توانسته است زمان نشست و میزان فرافشش را به ترتیب به اندازه ۳۳٪ و ۱۰۰٪ کاهش دهد. درخور ذکر است در این مطالعه، میزان حداکثر سیگنال کنترلی با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی به اندازه ۷۸٪ کاهش یافته است.



شکل (۸): سیگنال های کنترلی در مطالعه موردی اول

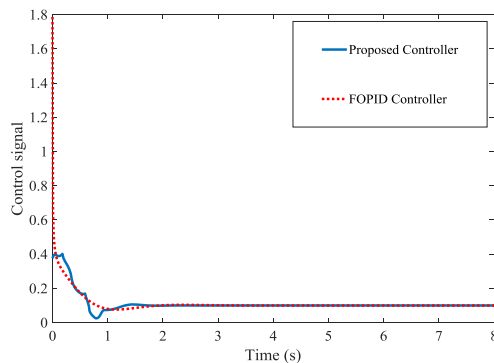


شکل (۱۱): خروجی سیستم در مطالعه موردی دوم

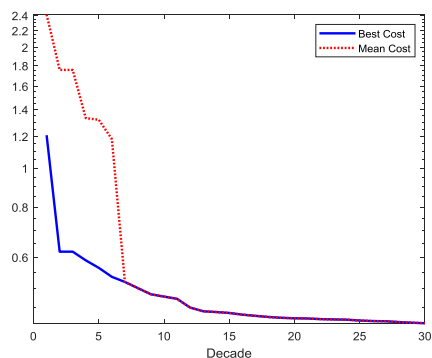


شکل (۹): روند بهینه سازی الگوریتم رقابت استعماری برای

بهینه سازی کنترل کننده پیشنهادی در مطالعه موردی اول



شکل (۱۲): سیگنال های کنترلی در مطالعه موردی دوم



شکل (۱۰): روند بهینه سازی الگوریتم رقابت استعماری برای

بهینه سازی کنترل کننده FOPID در مطالعه موردی اول

۳-۵ مطالعه موردی سوم

معیار ISTES+ISCO به عنوان تابع هدف و به شکل زیر برای مطالعه موردی سوم در نظر گرفته شده است:

$$F3 = \int_0^T (t^2 e)^2 dt + \int_0^T u^2 dt \quad (7)$$

در این مطالعه نیز کنترل کننده پیشنهادی عملکرد بهتری

۲-۵ مطالعه موردی دوم

در این مطالعه، تابع هدف به صورت ISTSE+ISCO و به شکل ذیل در نظر گرفته شده است:

استفاده از کنترل کننده پیشنهادی به اندازه ۶۵٪ کاهش نشان می‌دهد.

۵-۴- مطالعه موردی چهارم

در این مطالعه، تابع هدف به صورت ITSE+ISCO و به فرم زیر در نظر گرفته شده است:

$$F3 = \int_0^T te^2 dt + \int_0^T u^2 dt \quad (۸)$$

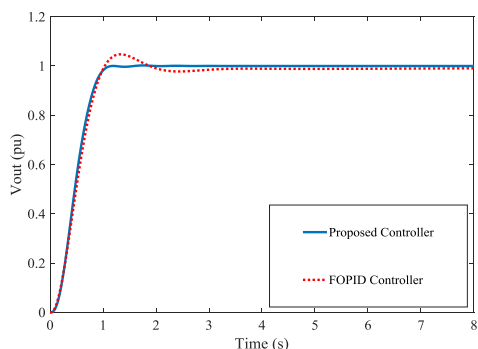
داشته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول (۴) و خروجی سیستم و سیگنال‌های کنترلی به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده‌اند. مقدار تابع هدف در این مطالعه با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی برابر با ۰/۱۳۳۱ به دست آمد که نسبت به کنترل کننده FOPID که برابر با ۰/۱۷۱۵ بود، به اندازه ۲۲٪ کاهش نشان می‌دهد. علاوه بر این، مقدار فراجش و زمان نشست با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی به ترتیب به اندازه تقریباً ۱۰۰٪ و ۵۳٪ کاهش یافته است. مقدار حداکثر سیگنال کنترلی نیز با

جدول (۲): نتایج حاصل از مطالعه موردی اول

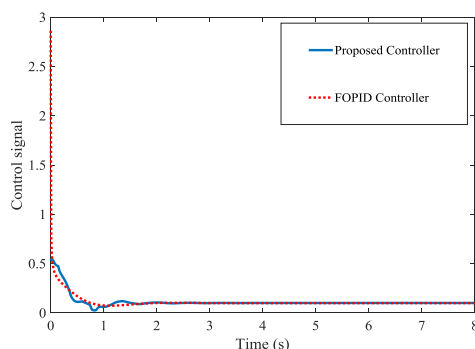
Parameters	Proposed Controller	FOPID
A	-0.6355	—
B	-0.1901	—
C	0.0844	—
D	0.5855	—
E	-0.8000	—
F	-0.2619	—
G	0.1547	—
H	0.4636	—
K_p	0.7396	0.2347
K_d	0.3149	0.1197
δ	—	0.0845
K_i	1.0000	0.2452
λ	—	-0.9731
β	1.0000	—
Overshoot	2.37	5.73
Settling time	1.0225	2.3078
Fitness function value	0.2911	0.4109
Max of control signal	0.7001	5.9927

جدول (۳): نتایج حاصل از مطالعه موردی دوم

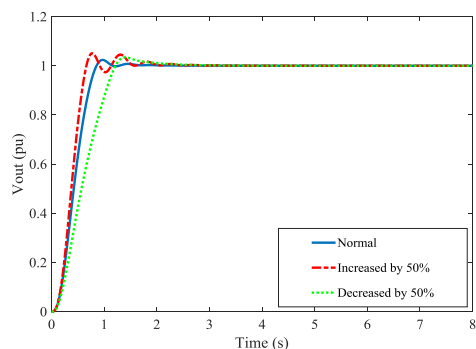
Parameters	Proposed Controller	FOPID
A	-0.5488	—
B	-0.0436	—
C	0.3008	—
D	0.4000	—
E	-0.8000	—
F	-0.4000	—
G	0.1445	—
H	0.7712	—
K_p	1.0000	0.1025
K_d	0.5907	0.1445
δ	—	0.3554
K_i	1.0000	0.2106
λ	—	-0.9490
β	0.4194	—
Overshoot	0	2.95
Settling time	1.1162	1.6537
Fitness function value	0.1643	0.1699
Max of control signal	0.4015	1.7859



شکل (۱۵): خروجی سیستم در مطالعه موردی چهارم

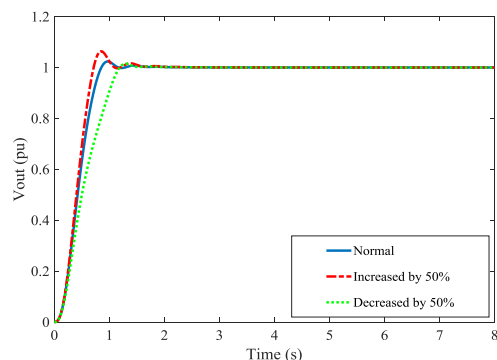


شکل (۱۶): سیگنال‌های کنترلی در مطالعه موردی چهارم



شکل (۱۷): عملکرد کنترل کننده پیشنهادی به ازای ۵۰٪

تغییر در پارامترهای تقویت کننده



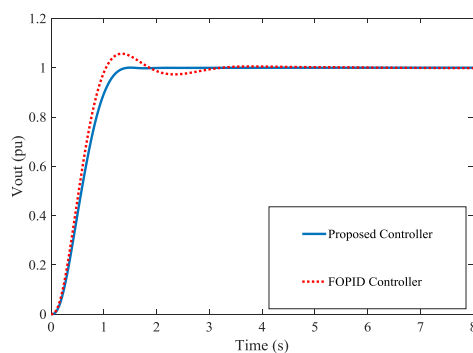
شکل (۱۸): عملکرد کنترل کننده پیشنهادی به ازای ۵۰٪ تغییر در

پارامترهای تحریک کننده

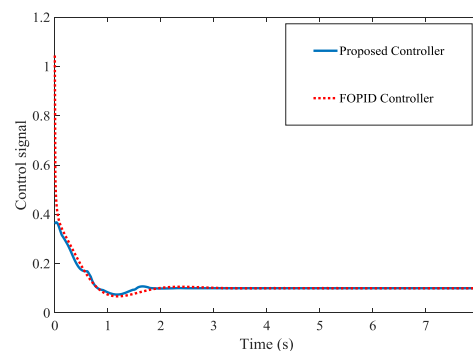
نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های این مطالعه در جدول (۵) و شکل‌های (۱۵) و (۱۶) آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با استفاده از روش پیشنهادی، مقادیر تابع هدف، فرآجهش، زمان نشست و حداکثر سیگنال کنترلی به ترتیب به اندازه ۰.۶٪، ۰.۹۵٪، ۰.۴۴٪ و ۰.۸۱٪ نسبت به کنترل کننده FOPID کاهش یافته‌اند. نکته دیگر در شکل (۱۳) این است که کنترل کننده FOPID دارای خطای حالت ماندگار است؛ در حالی که کنترل کننده پیشنهادی اینگونه نیست.

۵-۵- مطالعه موردی پنجم

در این مطالعه، میزان مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی در برابر عدم قطعیت‌های سیستم بررسی می‌شود. بدین منظور، پارامترهای تقویت کننده، تحریک کننده و ژنراتور دچار تغییرات ۵۰٪ افزایش و ۵۰٪ کاهش و با شرایط عادی مقایسه می‌شوند. نتایج این شبیه‌سازی‌ها به ترتیب در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) نشان داده شده‌اند که بیان کننده عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی است.



شکل (۱۹): خروجی سیستم در مطالعه موردی سوم



شکل (۲۰): سیگنال‌های کنترلی در مطالعه موردی سوم

جدول (۴): نتایج حاصل از مطالعه موردی سوم

Parameters	Proposed Controller	FOPID
A	-0.6269	—
B	-0.0429	—
C	0.2537	—
D	0.7832	—
E	-0.6195	—
F	-0.2900	—
G	0.1284	—
H	0.7259	—
K_p	0.6461	0.0226
K_d	0.2186	0.2289
δ	—	0.2166
K_i	0.6032	0.2157
λ	—	-0.9544
β	0.6365	—
Overshoot	0.03	5.68
Settling time	1.2388	2.6113
Fitness function value	0.1331	0.1715
Max of control signal	0.3676	1.0446

جدول (۵): نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطالعه موردی چهارم

Parameters	Proposed Controller	FOPID
A	-0.7745	—
B	-0.1179	—
C	0.1661	—
D	0.6657	—
E	-0.4933	—
F	-0.1830	—
G	0.2338	—
H	0.7578	—
K_p	1.0000	0.1208
K_d	0.2968	0.1349
δ	—	0.4360
K_i	0.9972	0.2424
λ	—	-0.8727
β	0.5928	—
Overshoot	0.23	4.74
Settling time	0.9916	1.7736
Fitness function value	0.2219	0.2350
Max of control signal	0.5445	2.8621

۶- نتیجه‌گیری

همه موارد عملکرد بهتر کنترل‌کننده پیشنهادی را از نظر تابع هدف، فراجش، زمان نشست و حداکثر سیگنال کنترلی نشان دادند؛ به گونه‌ای که فراجش حداقل به مقدار ۰/۵۹٪، زمان نشست حداقل به اندازه ۰/۳۳٪، سیگنال کنترلی حداقل به میزان ۶۵٪ و مقدار تابع هدف حداقل به میزان ۳٪ بهبود یافته‌اند. همچنین، میزان مقاوم‌بودن کنترل‌کننده پیشنهادی به ازای تغییرات پارامترهای مختلف بررسی شد و مقاومت مطلوب کنترل‌کننده پیشنهادی در برابر عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده به دست آمد.

در این مقاله، روش جدیدی برای کنترل سیستم AVR ارائه شد. بدین منظور از کنترل‌کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه‌شده استفاده شد. الگوریتم رقابت استعماری برای بهینه‌سازی، به کار گرفته و محل توابع عضویت ورودی به همراه بهره‌های کنترل‌کننده Fuzzy-PID بهینه شد. به منظور بررسی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، توابع هدف مختلفی در نظر گرفته و شبیه‌سازی‌ها با کنترل‌کننده FOPID بهینه‌شده نیز مقایسه شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها در

Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 31, No. 7-8, pp. 323-33, 2009.

[5] H. Zhu, L. Li, Y. Zhao, Y. Guo, Y. Yang, "CAS Algorithm-Based Optimum Design of PID Controller in AVR System", Chaos Solitons & Fractals, Vol. 42, No. 2, pp. 792-800. 2009.

[6] A.M. Mosaada, M.A. Attia, A.Y. Abdelazizb, " Whale Optimization Algorithm to Tune PID and PIDA Controllers on AVR System", Ain Shams Engineering Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 755-767, December 2019.

[7] Z. Bingula, O. Karahan, " A Novel Performance Criterion Approach to Optimum Design of PID Controller Using Cuckoo Search Algorithm for AVR System", Journal of the Franklin Institute, Vol. 355, Issue 13, pp. 5534-5559, September 2018.

[8] M.J. Blondin, J. Sanchis, P. Sicard J.M. Herrero, "New Optimal Controller Tuning Method for an AVR System Using a Simplified Ant Colony Optimization with a New Constrained Nelder-Mead Algorithm", Applied Soft Computing, Vol. 62, pp. 216-229, 2018.

[9] Y. Tang, M. Cui, C. Hua, L. Li, Y. Yang, "Optimum Design of Fractional Order $PI^{\delta}D^{\delta}$ Controller for AVR System Using Chaotic Ant Swarm", Expert Systems with Applications, Vol. 39, No. 8, pp. 6887-96, 2012.

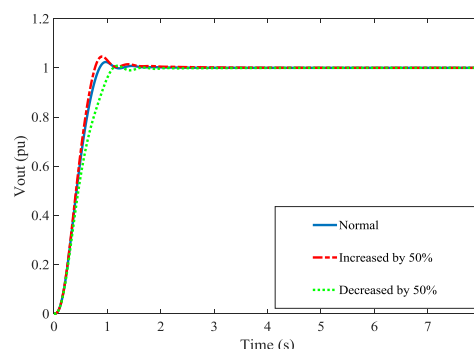
[10] M. Zamani, M. Karimi-Ghartemani, N. Sadati, M. Parniani, "Design of a Fractional Order PID Controller for an AVR Using Particle Swarm Optimization", Control Engineering Practice Vol. 17, No. 12, pp. 1380-1387, 2009.

[11] M.S. Ayas, E. Sahin, "FOPID Controller with Fractional Filter for an Automatic Voltage Regulator", Computers & Electrical Engineering, Article in press.

[12] A. Sikander, P.Thakur, R.C.Bansal, S. Rajasekar, " A Novel Technique to Design Cuckoo Search Based FOPID Controller for AVR in Power Systems", Computers & Electrical Engineering, Vol. 70, pp. 261-274, August 2018.

[13] T. A. Jumani, M. W. Mustafa, Z. Hussain, M. Md. Rasid, M. S. Saeed, M. M. Memon, I. Khan, K. S. Nisar, "Jaya Optimization Algorithm for Transient Response and Stability Enhancement of a Fractional-Order PID Based Automatic Voltage Regulator System", Alexandria Engineering Journal, Vol. 59, No. 4, pp. 2429-2440, 2020.

[14] A.J.H. AlGizi, M.W. Mustafa, K. M.A. Al Zaidi, M.K.J. Al-Zaidi " Integrated PLC-



شکل (۱۹): عملکرد کنترل کننده پیشنهادی به ازای ۵۰٪ تغییر در پارامترهای ژنراتور

ضمایم

AVR system	
K_A	10
τ_A	0.1 s
K_E	1
τ_E	0.5 s
K_G	1
$G\tau$	1 s
K_S	1
$s\tau$	0.01 s
ICA	
Number of population	30
Maximum of decades	30
β	2
Probability of Revolution	0.1
ζ	0.1
Number of empires	2

مراجع

[1] B. Bourouba, S. Ladaci, H. Schulte " Optimal Design of Fractional Order $PI^{\delta}D^{\delta}$ Controller for an AVR System Using Ant Lion Optimizer", IFAC-Papers OnLine, Vol. 52, No. 13, pp. 200-205 2019.

[2] M.J. Blondin, P. Sicard P.M. Pardalos, " Controller Tuning Approach with Robustness, Stability and Dynamic Criteria for the Original AVR System", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 163, pp. 168-182, September 2019.

[3] DH. Kim, "Hybrid GA-BF Based Intelligent PID Controller Tuning for AVR system", Applied Soft Computing, Vol. 11, No. 1, pp. 11-22, 2011.

[4] A. Chatterjee, V. Mukherjee, S. Ghoshal, "Velocity Relaxed and Crazyness-Based Swarm Optimized Intelligent PID and PSS controlled AVR System", International

- [18] S. Falahati Aliabadi, S.A. Taher, "Design of Fuzzy-FOPID Controller Optimized by ICA for Control of AVR", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 27-35, 2017.
- [19] S. Falahati Aliabadi, A. Ketabi, M. Haji Akbari Fini, "Boost Converter Control by Using of FOPID Optimized by ICA", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 39-48, Summer 2015.
- [20] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, "Imperialist Competitive Algorithm: an Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 4661-4667, 2007.
- Fuzzy PID Simulink Implemented AVR Ssystem", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 69, pp. 313-326, July 2015.
- [15] A. J.H. Al Gizi, M.W. Mustafa, N. A. Algeelani, M. A. Alsaedi, " Sugeno Fuzzy PID Tuning, by Genetic-Neutral for AVR in Eelectrical Power Generation", *Applied Soft Computing*, Vol. 28, pp. 226-236, March 2015.
- [16] S. Falahati¹, S. A. Taher, M. Hajiakbari. "Design of Fuzzy-PID Controller Optimized by Imperialist Competitive Algorithm to Control of AVR System", *Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)*, Vol. 5, No. 4, pp. 66-76, 2017.
- [17] Z. Woo, H. Chung, J.A. Lin, "A PID Type Fuzzy Controller with Self-Tuning Scaling Factors", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 115, pp. 321-326, 2000.

¹ Automatic Voltage Regulator

² Genetic Algorithm

³ Bacterial Foraging

⁴ Particle Swarm Optimization

⁵ Chaotic Ant Swarm

⁶ Whale Optimization Algorithm

⁷ Proportional-Integral-Derivative-Acceleration

⁸ Cuckoo Search

⁹ Fractional Order PID

¹⁰ Ant Lion Optimizer

¹¹ Programmable Logic Controller

