



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 12, No. 2, 2021
Research Paper

Designing an Optimal Robust Controller for an Automatic Voltage Regulator via Ant Colony Optimization for Continuous Domain

Abolfazl Ebrahimi, Alireza Safa *

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan,
Iran

Abstract:

Providing constancy of the nominal voltage level is a major concern in the planning of electric power systems. One of the effective methods to achieve a nominal voltage level is controlling the exciter voltage of the generator. This is done by using AVR. To ensure a better performance of the AVR system under whole operating conditions, the employing of a robust control strategy is essential. In this paper, the PID controller is adopted as a control strategy. Despite its simple structure, the setting of the PID controller parameters is difficult to obtain the robust closed-loop system. In general, there is no straightforward relation between the performance indexes and the controller parameters. To overcome this problem, the control design problem is transformed into an optimization one, and a new performance criterion function is introduced. This new function includes both time-domain and frequency-domain specifications. The Gain and phase margined are maximized in this function to ensure the robustness of the system despite uncertainties; meanwhile, the rise time and overshoot of the step response are minimized to achieve the best performance in the time domain. Ant colony optimization for the continuous domain is used for solving this multi-objective optimization problem. Detailed comparative simulations are carried out via the Monte-Carlo method to illustrate the effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: Ant colony optimization for continuous domain, automatic voltage regulator, multi-objective optimization, optimal robust controller, proportional-integral-derivative (PID) controller.



2252-083X/ © 2021 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.2020.119035.1275>

طراحی کنترل کننده بهینه مقاوم برای سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ

با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان پیوسته

ابوالفضل ابراهیمی بالاسی^۱، علیرضا صفا^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

abolfazl.ebrahimi.9712@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

a.safa@gu.ac.ir

چکیده: تأمین توان مورد نیاز مصرف کننده های الکتریکی با دامنه ولتاژ معین، وظیفه اصلی سیستم قدرت است. یکی از مؤثرترین رهیافت های موجود برای کنترل ولتاژ در سیستم های قدرت، کنترل ولتاژ سیم پیچ تحریک ژنراتورها است. این امر با استفاده از سیستمی به نام تنظیم کننده خودکار ولتاژ میسر می شود. برای عملکرد مطلوب این سیستم در تمام گستره بارها، لزوم استفاده از کنترل کننده مقاوم احساس می شود. رویکرد کنترلی اتخاذ شده در این مقاله، بهره گیری از کنترل کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی است. با وجود سادگی ساختاری این کنترل کننده، نحوه تنظیم پارامترهای آن برای به دست آوردن سیستم حلقه بسته مقاوم امر آسانی نیست. در حالت کلی، رابطه مستقیمی بین شاخص های کارایی و ضرایب کنترل کننده وجود ندارد. برای حل این چالش در مقاله حاضر، فرایند طراحی کنترل کننده به یک مسئله بهینه سازی تبدیل می شود و تابع هزینه جدیدی پیشنهاد می شود. تابع هزینه پیشنهادی، دربرگیرنده معیارهای شاخص های کارایی حوزه زمان و فرکانس است تا بیشینه کردن حدود بهره و فاز قوام سیستم در برابر نامعینی ها تضمین شود و با کاهش فراجش و زمان صعود و نشست از معیارهای کارایی مطلوبی در حوزه زمان برخوردار باشد. برای حل این مسئله بهینه سازی چندهدفه از الگوریتم مورچگان پیوسته استفاده شده است. با استفاده از روش مونت کارلو کارایی کنترل کننده پیشنهادی در شرایط مختلف ارزیابی شده است.

واژه های کلیدی: الگوریتم کلونی مورچگان پیوسته، بهینه سازی چندهدفه، تنظیم کننده خودکار ولتاژ، کنترل بهینه مقاوم، کنترل کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی

۱- مقدمه

یک محیط دائماً در حال تغییر کار می کند. با توجه به غیرخطی بودن این سیستم، عملکرد دینامیکی آن متأثر از تجهیزات تشکیل دهنده آن است که هر یک عکس العمل زمانی و مشخصه متفاوتی دارند؛ بنابراین، پایداری این سیستم را با دیدگاه های مختلف می توان مطالعه کرد [۲]. یکی از انواع حائز اهمیت پایداری سیستم های قدرت، پایداری ولتاژ است که به توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار پذیرفتنی در کل سیستم در شرایط عادی عملکرد و بعد از قرار گرفتن تحت اغتشاش اطلاق می شود [۲]. در صورتی که بروز پدیده هایی مانند افزایش تقاضای بار، اتصال کوتاه یک خط انتقال، از دست دادن خط ارتباطی

طراحی یک سیستم بزرگ به هم پیوسته قدرت به طوری که با حداقل هزینه بهره برداری، از پایداری آن اطمینان حاصل شود، مسئله پیچیده ای است [۱]. از منظر نظریه کنترل، سیستم قدرت فرایندی غیرخطی است که در

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

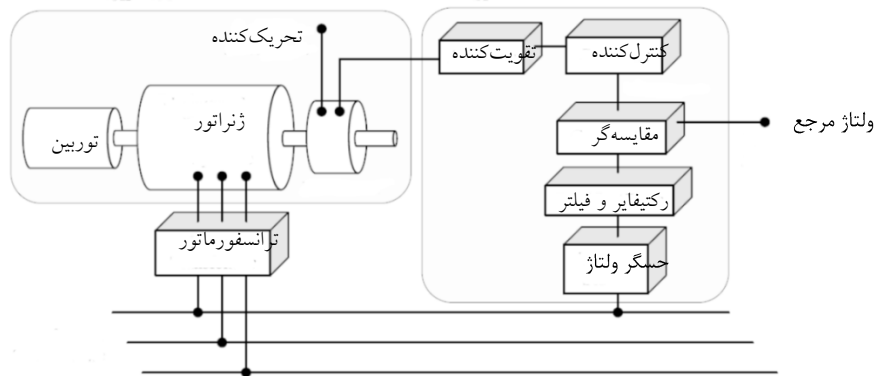
نام نویسنده مسئول: علیرضا صفا

نشانی نویسنده مسئول: ایران - گرگان - دانشگاه گلستان - دانشکده فنی و مهندسی

قدمت بالای این کنترل‌کننده، هنوز در حالت کلی راهکار تحلیلی برای به دست آمدن پارامترهای مناسب ارائه نشده است. راهکارهای موجود برای تنظیم پارامترهای این کنترل‌کننده را می‌توان به دو دسته کلاسیک و مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی و فرا ابتکاری دسته‌بندی کرد. روش‌های کلاسیک نظیر زیگلر - نیکولز^۸ و کهن - کون [۱]، [۲] هستند که سعی می‌کنند با استفاده از مدل خطی و تقریبی از سیستم پارامترهای مناسب پیشنهاد دهند. در الگوریتم‌های تکاملی و فرا ابتکاری نظیر الگوریتم‌های ژنتیک (GA) [۱۰]، سینوس - کسینوس [۱۱]، ازدحام ذرات^۶ (PSO) [۱۳]، شبیه‌ساز تبرید^۷ (SA) [۱۴]، رقابت استعماری^۸ (ICA) [۱۵]، تعلیم و یادگیری^۹ [۱۶] و بهینه‌سازی جستجوکننده^{۱۰} (SO) [۱۷] مسئله کنترل‌ی به مسئله بهینه‌سازی تحویل می‌یابد و با حل این مسئله، بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده حاصل می‌شود. در روش‌های تکاملی و فرا ابتکاری موجود در ادبیات بیشتر از مدل خطی سیستم بهره گرفته شده است و تابع هزینه براساس معیارهای کارایی حوزه زمان نظیر فراجش، زمان صعود و زمان نشست یا معیارهایی مبتنی بر خطا نظیر انتگرال مربعات خطا^{۱۱} (ISE)، انتگرال قدر مطلق خطا^{۱۲} (IAE) و انتگرال زمانی مربعات خطا^{۱۳} (ITAE) پیشنهاد می‌شود که کمینه‌سازی آن به کمک الگوریتم مربوطه ضرایب کنترل‌کننده بهینه PID را نتیجه می‌دهد. این کنترل‌کننده در شبیه‌سازی از عملکردی مطلوب برخوردار است؛ اما باید توجه داشت سیستم تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ ماهیت غیرخطی دارد. همچنین پارامترهای آن ممکن است دستخوش تغییر شوند؛ بنابراین، عدم قطعیت‌های پارامتری و ساختاری همواره در سیستم تنظیم‌کننده خودکار موجودند. این نامعینی‌ها عملکرد نامطلوب سیستم را در بر خواهد داشت.

بین دو سیستم، از دست دادن حالت سنکرونیزه و افزایش زاویه روتور ژنراتور باعث تغییرات فزاینده و کنترل‌ناپذیر در ولتاژ شود، سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می‌شود. دلیل اصلی ناپایداری را می‌توان به نداشتن توانایی سیستم قدرت در تأمین توان راکتیو مورد تقاضا نسبت داد [۱]. تقویت پایداری شبکه و کنترل مؤثر ولتاژ پایانه با استفاده از سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون مقدور می‌شود. سیستم‌های تحریک براساس منبع توان تحریک در سه دسته عمده (۱) سیستم‌های تحریک جریان مستقیم، (۲) سیستم‌های تحریک جریان متناوب و (۳) سیستم‌های تحریک استاتیکی تقسیم می‌شوند [۱]. در همه سیستم‌های تحریک، برای ثابت نگه داشتن ولتاژ پایانه از سیستمی با عنوان تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ^۱ (AVR) استفاده می‌شود [۱]. در حقیقت، تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ از طریق تنظیم ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون، ولتاژ پایانه را کنترل می‌کند.

برای به دست آوردن یک سیستم با پاسخ دینامیکی مطلوب، رویکردهای کنترلی پیشرفته‌ای نظیر کنترل‌کننده‌های تطبیقی [۳]، تنظیم‌کننده مربعی گاوسی^۲ (LQG) [۴]، فازی [۵]، شبکه عصبی [۶] و مرتبه کسری^۳ [۷-۹] برای سیستم تنظیم‌کننده خودکار پیشنهاد شده است؛ اما با وجود کارایی مناسب آنها در شبیه‌سازی، این کنترل‌کننده‌ها با پیچیدگی‌های محاسباتی و ساختاری همراه‌اند. همچنین برای نمونه کنترل‌کننده تطبیقی با تغییر در پارامترها باعث به وجود آمدن فراجش بزرگ در پاسخ‌ها می‌شود. کنترل‌کننده فازی تبحر طراح در تعیین قوانین فازی را می‌طلبد و شبکه عصبی نیازمند پیش آموزش است؛ اما به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر ساختاری ساده و سهولت پیاده‌سازی و تنها لزوم در دسترس بودن خروجی، به کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی^۴ (PID) توجه ویژه شده است و در بیش از ۹۰٪ فرایندهای کنترل صنعتی حضور دارد. با وجود



شکل ۱: ساختار سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ

تحریک کننده، اصلی ترین عضو سیستم تنظیم کننده ولتاژ است که به دلیل پدیده اشباع در مدار مغناطیسی، در حقیقت یک سیستم غیرخطی است؛ اما در مسائل عموماً از عوامل غیرخطی چشم پوشی شده است و آن را به صورت سیستم مرتبه اول مدل سازی می کنند:

$$G_E(s) = \frac{K_E}{\tau_E s + 1} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، بهره K_E و ثابت زمانی τ_E به ترتیب مقادیری در بازه 10 تا 400 و 0.5 تا 1.0 ثانیه اختیار می کنند.

مدل خطی ژنراتور سنکرون که ولتاژ میدان را به ولتاژ پایانه ژنراتور مرتبط می کند، به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$G_G(s) = \frac{K_G}{\tau_G s + 1} \quad (3)$$

در (۳)، بهره K_G و ثابت τ_G به بار وابسته اند و به ترتیب از 0.7 تا 1.0 و 1.0 تا 2.0 ثانیه از حالت بار کامل تا حالت بی باری تغییر می کنند.

در نهایت، فرایند نمونه گیری از ولتاژ و فرایند فیلتر کردن آن با تابع تبدیل زیر مدل سازی می شوند:

$$G_S(s) = \frac{K_S}{\tau_S s + 1} \quad (4)$$

بهره K_S ، مقادیر در بازه 10 تا 400 و ثابت زمانی τ_S ، مقادیری در بازه 0.001 تا 0.06 ثانیه اختیار می کنند.

نوآوری مقاله حاضر به دو دسته طبقه بندی می شود: (۱) ابتدا تابع هزینه پیشنهاد می شود که کمینه کردن آن باعث قوام سیستم در برابر نامعینی ها می شود. با دخیل کردن معیارهای حد بهره و حد فاز در فرایند طراحی کنترل کننده باعث به دست آمدن یک سیستم حلقه بسته مقاوم در برابر نامعینی ها می شود؛ (۲) برای نخستین بار از الگوریتم کلونی مورچگان پیوسته برای طراحی کنترل کننده PID، استفاده و کارایی آن ارزیابی می شود.

۲- سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ

در شکل ۱ نمایی از سیستم مدنظر نشان داده شده است. این سیستم از چهار جزء اصلی تشکیل شده است: (۱) تقویت کننده، (۲) تحریک کننده، (۳) ژنراتور و (۴) حسگر (مجموعه ای از ترانسفورماتورهای قدرت و رکتیفایر و فیلتر) [۱۵]. ولتاژ پایانه به طور مستمر با ترانسفورماتور اندازه گیری شده است و بعد از عبور از رکتیفایر و فیلتر شدن با ولتاژ مرجع مقایسه می شود. ولتاژ خطای تولید شده با تقویت کننده تقویت شده است و سپس این سیگنال به منظور کنترل ولتاژ سیم پیچ تحریک کننده استفاده می شود.

تقویت کننده عموماً با یک بهره K_A و یک ثابت زمانی τ_A مدل سازی می شود و تابع تبدیل آن به صورت زیر بیان خواهد شد:

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

که در آن K_A در محدوده 10 تا 400 و ثابت زمانی τ_A در محدوده 0.02 تا 0.1 ثانیه قرار دارد.

۲-۱- بیان مسئله

هدف کنترلی طراحی‌کننده با ساختار

$$C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (5)$$

برای سیستم تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ است که ورودی خطای ولتاژ را گرفته است و سیگنال کنترلی را به‌نحوی تحویل تقویت‌کننده می‌کند که خطای ولتاژ حاصل از مقایسه ولتاژ مرجع و ولتاژ پایانه شبکه صفر شود؛ همچنین، توجه به اینکه رهیافت حل مسئله بر مبنای بهینه‌سازی گذاشته شده است، خواسته را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} \min_{K_P, K_I, K_D} J \\ s. t: \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \underline{K}_P \leq K_P \leq \bar{K}_P \\ \underline{K}_I \leq K_I \leq \bar{K}_I \\ \underline{K}_D \leq K_D \leq \bar{K}_D \end{aligned}$$

که در آن تابع هزینه J در ادامه معرفی می‌شود و منظور از \underline{x} و \bar{x} به ترتیب کران پایین و بالا برای متغیر تصمیم x است.

نکته: کنترل‌کننده پیشنهادی در (۵) به دلیل وجود عبارت $K_D s$ علی‌نیت نیست. راهکار ساده‌ای که برای رفع این نقیصه پیشنهاد شده است، اضافه کردن یک فیلتر پایین‌گذر به صورت $\frac{1}{\tau_{fs} s + 1}$ است که در آن، τ_{fs} مقادیری بین 0.001 تا 0.1 اختیار می‌کند [۱۸]. در این مقاله این مقدار برابر 0.01 در نظر گرفته شده است. با این تصحیح کنترل‌کننده به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \frac{s}{\tau_{fs} s + 1} \quad (7)$$

۳- طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر $ACO_{\mathbb{R}}$

کلونی مورچگان یا به‌طور کلی جوامع حشرات اجتماعی، سیستم‌های بسیار گسترده و پیچیده‌ای‌اند که باوجود سادگی، ساختاری کاملاً اجتماعی دارند. براساس همین سازمان‌دهی، کلونی مورچگان توانایی انجام وظایف پیچیده را دارند که به‌طور طبیعی فراتر از توانایی یک مورچه است. الگوریتم مورچگان که از رفتارهای واقعی

مورچگان الهام گرفته شده است، یکی از روش‌های محاسباتی مبتنی بر هوش ازدحامی است. دوریگو و همکاران، این الگوریتم را نخستین بار برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته یا ترکیباتی^{۱۴} ارائه کردند که از برهم‌کنش سه رویکرد (۱) جواب ساخته‌شده توسط مورچگان^{۱۵}، (۲) به هنگام کردن اثر فرومون^{۱۶} و (۳) اعمال خارق‌العاده^{۱۷} تشکیل شده است [۱۹]. مورچه‌ها هنگام جست‌وجوی غذا ماده‌ای فرار به نام فرومون در مسیر حرکت خود بر جای می‌گذارند. فاصله مسیر تا غذا را می‌توان با توجه به غلظت فرومون تشخیص داد. غلظت فرومون موجود در مسیر توسط مورچگان درک می‌شود و با توجه به آن مسیر را انتخاب می‌کنند؛ هرچند امکان انتخابی مسیر غیر از مسیر با غلظت بالای فرومون وجود دارد که منجر به کشف مسیرهای جدید می‌شود. در نهایت، در اثر همکاری مورچگان با هم کوتاه‌ترین مسیر از لانه تا غذا ساخته می‌شود.

نسخه نخستین این الگوریتم برای مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته ارائه شده بود. در مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته، هدف، یافتن یک شیء از میان تعداد متناهی از اعداد صحیح، جایگشت‌ها، گراف‌ها و ... است. بر مبنای همین الگوریتم کلونی مورچگان با متغیرهای گسسته، راهکارهایی برای طراحی کنترل‌کننده PID پیشنهاد شده است [۲۰-۲۲]؛ اما باید توجه داشت در طراحی کنترل‌کننده یافتن مجموعه‌ای از اعداد حقیقی غایت مسئله است و استفاده از الگوریتم‌های ترکیباتی بدون ایراد نخواهد بود.

بسطی از این الگوریتم برای حوزه پیوسته را ساشا و دیوریگو در [۲۳] ارائه کردند که این راهکار مبنای حل مسئله طراحی کنترل‌کننده در این پژوهش خواهد بود. نحوه استفاده از این الگوریتم در ادامه تشریح شده است.

۳-۱- ایجاد جمعیت اولیه

مشابه هر الگوریتم فرا ابتکاری در $ACO_{\mathbb{R}}$ پاسخ‌های اولیه با جواب‌های تصادفی پیشنهاد می‌شوند. با فرض آنکه تعداد جمعیت مورچگان برابر n باشد، نیاز به همین تعداد جواب تصادفی ایجاد می‌شود. در شکل ۲ این فرایند به

s^1	K_P^1	K_I^1	K_D^1	$J(s^1)$	ω_1
s^2	K_P^2	K_I^2	K_D^2	$J(s^2)$	ω_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
s^l	K_P^l	K_I^l	K_D^l	$J(s^l)$	ω_l
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
s^k	K_P^k	K_I^k	K_D^k	$J(s^k)$	ω_k

شکل ۳: بایگانی پاسخ در $ACO_{\mathbb{R}}$

هرچه q بزرگ‌تر باشد، احتمالات یکنواخت‌تر خواهند شد.

با عنایت به (۸)، بین وزن‌های اختصاص داده شده به پاسخ‌های موجود در بایگانی رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$\omega_1 > \omega_2 > \dots > \omega_k \quad (9)$$

احتمال انتخاب شدن پاسخ l -ام برابر با

$$p_l = \frac{\omega_l}{\sum_{i=1}^k \omega_i} \quad (10)$$

محاسبه می‌شود.

۳-۳- توليد مدل احتمالی متغیرها

با توجه به اینکه فضای متغیرهای تصمیم پیوسته است، باید توزیع فرمون به صورت پیوسته در فضای جستجو صورت گیرد. این خواسته با هسته گاوسی بیان خواهد شد که خود ترکیب خطی از توابع احتمال گاوسی‌اند. به این صورت که برای سه پارامتر تصمیم K_P ، K_I و K_D براساس بایگانی پاسخ توصیف احتمالی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$G^1(K_P) = \sum_{l=1}^k p_l g_l^1(K_P) \quad (11)$$

$$= \sum_{l=1}^k p_l \frac{1}{\sigma_l^1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K_P - \mu_l^1)^2}{2\sigma_l^1{}^2}}$$

$$G^2(K_I) = \sum_{l=1}^k p_l g_l^2(K_I) \quad (12)$$

$$= \sum_{l=1}^k p_l \frac{1}{\sigma_l^2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K_I - \mu_l^2)^2}{2\sigma_l^2{}^2}}$$

$$G^3(K_D) = \sum_{l=1}^k p_l g_l^3(K_D) \quad (13)$$

تصویر کشیده شده است. سپس هریک از این پاسخ‌ها ارزیابی خواهند شد.

۳-۲- بایگانی پاسخ

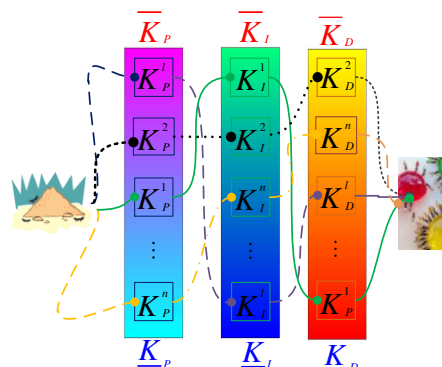
جواب‌ها در یک بایگانی پاسخ^{۱۸} نمایش داده شده در شکل ۳ به ترتیب صعودی تابع هزینه ذخیره می‌شوند. بایگانی پاسخ برای ساخت جواب‌های جدید به کار خواهد رفت.

اهمیت هرکدام از راه‌حل‌ها در بایگانی پاسخ را می‌توان با یک ضرایب وزنی تعیین کرد. با توجه به اینکه نخستین پاسخ در بایگانی، عملکرد بهتری دارد، باید بیشترین ضریب وزنی و آخرین عضو این بایگانی، کمترین اهمیت را داشته باشد؛ بنابراین، هر تابع نزولی برحسب موقعیت پاسخ‌ها این خواسته را برآورده می‌کند.

در این پژوهش این تابع وزنی برای پاسخ با موقعیت l -ام به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\omega_l = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(-l-1)^2}{2q^2k^2}} \quad (8)$$

که در آن k اندازه بایگانی پاسخ و پارامتر مثبت q فشار انتخاب^{۱۹} است به این مفهوم که تفاوت وزنی بین پاسخ‌ها را مشخص می‌کند. با اختیار مقادیر کوچک q ، بهترین راه‌حل‌ها به شدت ترجیح داده می‌شوند و در پیشنهاد پاسخ‌های جدید اولویت دارند و



شکل ۲: توليد جواب‌های اولیه: با اختیار مقادیر تصادفی در

بازه مشخص شده یک مسیر مانند $s^l = (K_P^l, K_I^l, K_D^l)$

ساخته می‌شود. n نشان‌دهنده تعداد جمعیت مورچگان است.

طراحی کنترل‌کننده بهینه مقاوم برای سیستم تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ با استفاده از الگوریتم

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد در $ACO_{\mathbb{R}}$ اطلاعات مرتبط با فرومون در بایگانی پاسخ ذخیره می‌شوند. این بدان معناست که به‌روزرسانی بایگانی پاسخ معادل به‌روزرسانی فرومون خواهد بود. برای به‌روزرسانی از هسته‌های گاوسی $G^l, l = 1, 2, 3$ و چرخه رولت بهره گرفته می‌شود تا به تعداد جمعیت مورچه‌ها پاسخ جدید تولید شود. فرایند نمونه‌برداری و استفاده از توابع هسته‌های گاوسی را می‌توان این‌گونه تشریح کرد؛ ابتدا سه عدد تصادفی مانند $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ و ω_3 تولید می‌شود و برای سه متغیر تصمیم موجود نخستین دسته جوابی انتخاب خواهند شد که در روابط $\omega_1 < p_i, \omega_2 < p_j$ و $\omega_3 < p_k$ صدق کنند. دقت شود که p_i, p_j و p_k در (۱۰) تعریف شده‌اند. پاسخ جدید با استفاده از توزیع‌های موجود به‌صورت زیر است:

$$s^{new} = (K_p^{new}, K_I^{new}, K_D^{new}) \quad (15)$$

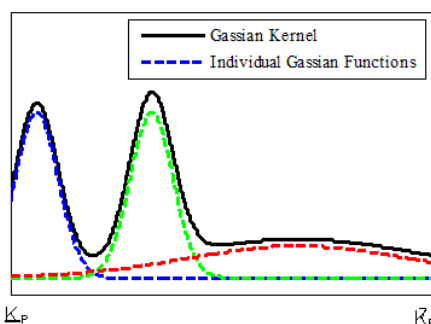
متغیرهای تصمیم جدید K_p^{new}, K_I^{new} و K_D^{new} از توزیع نرمال زیر به دست آمده‌اند:

$$K_p^{new} = g_1^1(K_p) \quad (16)$$

$$K_I^{new} = g_j^2(K_I) \quad (17)$$

$$K_D^{new} = g_j^3(K_D) \quad (18)$$

در روابط بالا g_l^i ها در (۱۱)–(۱۳) تعریف شده‌اند. راه‌حل‌های جدید با بایگانی پاسخ ادغام شده‌اند و با انتخاب k تا از بهترین راه‌حل‌ها، بایگانی پاسخ به‌روزرسانی می‌شود.



شکل ۴: مثالی از سه تابع چگالی گاوسی و هسته گاوسی

$$= \sum_{l=1}^k p_l \frac{1}{\sigma_l^3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K_D - \mu_l^3)^2}{2\sigma_l^2}}$$

هریک از این توابع چگالی گاوسی $g_l^1(K_p)$ با دو

پارامتر $\mu_l^1 = K_p^l$ و $\sigma_l^1 = \xi \sum_{\theta=1}^k \frac{|K_p^{\theta} - K_p^l|}{k-1}$ تابع چگالی

گاوسی $g_l^2(K_I)$ با دو پارامتر $\mu_l^2 = K_I^l$ و

$\sigma_l^2 = \xi \sum_{\theta=1}^k \frac{|K_I^{\theta} - K_I^l|}{k-1}$ تابع چگالی گاوسی $g_l^3(K_D)$ با

دو پارامتر $\mu_l^3 = K_D^l$ و $\sigma_l^3 = \xi \sum_{\theta=1}^k \frac{|K_D^{\theta} - K_D^l|}{k-1}$ معلوم

خواهند بود. در روابط ذکر شده ξ تأثیری مشابه با تبخیر فرومون را ایفا می‌کند.

برای تبیین بهتر نحوه عملکرد این هسته‌های گاوسی

فرض کنید اندازه بایگانی پاسخ برابر سه در نظر گرفته شده

باشد و K_p^1, K_p^2, K_p^3 پیشنهادهایی برای پارامتر تناسبی

کنترل‌کننده باشند. از آنجایی که فضای جستجو متغیر پیوسته

است، لزومی بر استفاده از یک توزیع پیوسته است که تمرکز

آن حول این پاسخ‌ها باشد. این خواسته را می‌توان با تابع

چگالی گاوسی برآورده کرد و میانگین آن را برابر

راه‌حل‌های موجود قرار داد. حال باید میزان جستجو حول

همسایگی‌های راه‌حل یا همان واریانس تابع چگالی گاوسی

تعیین شود. یک انتخاب هوشمندانه برای اینکه هر جواب

بتواند فضای پیرامون خویش را پوشش دهد، به‌صورت زیر

تعیین می‌شود:

$$\sigma_l^1 = \xi \sum_{\theta=1}^3 \frac{|K_p^{\theta} - K_p^l|}{k-1}, l = 1, 2, 3 \quad (14)$$

در شکل ۴ این مفاهیم به تصویر کشیده شده‌اند. بر طبق

(۱۴)، واریانس متناسب با متوسط فاصله راه‌حل پیشنهادی با

بقیه پاسخ‌های موجود در بایگانی است. اگر تمرکز جواب‌ها

در یک ناحیه زیاد باشد، واریانس کوچکی به آن راه‌حل

اختصاص می‌یابد و برعکس، در صورت فاصله زیاد راه‌حل

نسبت به بقیه پاسخ‌ها، واریانس مقدار بزرگی خواهد بود تا

تمام فضایی که راه‌حلی احتمالی در آن موجود نیست را

پوشش دهد.

۳-۵- تابع هزینه

می‌شود که سیستم حلقه‌بسته با استفاده از آن کنترل‌کننده، حدود بهره و فاز بالایی دارد، اما هزینه آن کاهش سرعت پاسخ سیستم است.

در این مقاله برای تضمین پایداری سیستم در حضور نامعینی‌ها، از حد بهره و حد فاز برای تعریف تابع هزینه بهره گرفته شده است. تابع هزینه در نظر گرفته شده در این پژوهش به صورت

$$J = \begin{cases} (1 - e^{-\alpha}) \left[\frac{1}{G_M} + \frac{1}{\Phi_M} \right] + e^{-\alpha} ITAE, & \text{پایدار} \\ 2000 ITAE, & \text{ناپایدار} \end{cases}$$

تعریف می‌شود که در آن، منظور از G_M و Φ_M به ترتیب حد بهره و حد فازند و $ITAE$ انتگرال وزن‌دار قدر مطلق خطا با تعریف زیر است:

$$ITAE = \int_0^t \eta |e(\eta)| d\eta \quad (19)$$

با توجه به اینکه هدف به دست آوردن بیشترین مقدار برای حدود بهره و فاز است، این توابع به صورت وارون در تابع هزینه ظاهر شده‌اند. همچنین در صورتی که سیستم ناپایدار باشد، جواب پیشنهادی با ضابطه $2000 ITAE$ جریمه می‌شود؛ به عبارت دیگر، در صورتی که سیستم حلقه‌بسته ناپایدار باشد، هزینه تعلق گرفته به کنترل‌کننده پیشنهادی، با توجه به اینکه پاسخ سیستم حلقه‌بسته چقدر از مطلوب دورتر باشد، بزرگ‌تر خواهد بود. به این ترتیب، امکان فرارگیری پاسخ‌های نامطلوب‌تر در جمعیت کمتر می‌شود. حال اگر سیستم حلقه‌بسته پایدار باشد، هدف بهبود هم‌زمان معیارهای کارایی حوزه زمان و حوزه فرکانس خواهد بود؛ به این معنا که تمایل داریم حدود بهره و فاز افزایش پیدا کنند تا سیستم حلقه‌بسته مقاومی حاصل شود. همچنین، هدف بهبود شاخص‌های کارایی معیارهای حوزه زمان است. بدیهی است هر چقدر معیار $ITAE$ یک سیستم کنترلی کوچک‌تر باشد، از خطای حالت ماندگار و رفتار حالت گذرای مطلوبی برخوردار است؛ باید در نظر داشت بین خواسته‌های حوزه زمان و فرکانس یک تضاد وجود دارد؛ یعنی اگر سیستم حدود بهره و فاز بزرگی داشته باشد، پاسخ این سیستم کند خواهد بود و برعکس. بنابراین، با تنظیم پارامتر α در این تابع هزینه می‌توان مشخص کرد کدام شاخص برای ما در درجه بالاتری است؛ به طوری که اگر α مقدار کوچکی اختیار کند، ضرایب کنترل‌کننده حاصل

۳-۶- تکرار الگوریتم و خاتمه

تا فراهم شدن شرط تکرار الگوریتم، فرایند از زیربخش ۳-۳ مجدد تکرار خواهد شد. شروط تکرار متفاوتی برای توقف الگوریتم می‌توان متصور شد. در این مقاله، شرط خاتمه الگوریتم بر تعداد تکرار بنا نهاده شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

کارایی کنترل‌کننده به دست آمده از $ACO_{\mathbb{R}}$ با استفاده از شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب با روش رانگ - کوتا مرتبه چهار با فرکانس نمونه‌برداری 100 هرتز ارزیابی شد. پارامترهای سیستم AVR مطالعه شده در جدول ۱ آمده است. حدود پارامترهای تصمیم، ضرایب کنترل‌کننده، برابر با

$$\bar{K}_I = 2.0, \quad \bar{K}_J = 0.1, \quad \bar{K}_P = 2, \quad \bar{K}_D = 0.1, \quad \bar{K}_D = 0.05$$

در نظر گرفته شده است.

در الگوریتم $ACO_{\mathbb{R}}$ ، تعداد جمعیت مورچگان برابر 350، اندازه بایگانی پاسخ برابر 200، پارامتر فشار انتخاب $q = 0.5$ و ضریب تبخیر $\xi = 0.98$ در نظر گرفته شد.

جدول ۱: پارامترهای سیستم AVR [۱۵]

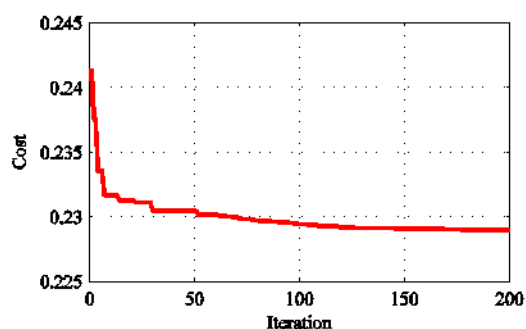
پارامتر	زیرسیستم
$\tau_A = 0.1$	تقویت‌کننده $K_A = 10$
$\tau_E = 0.4$	تحریک‌کننده $K_E = 1.0$
$\tau_G = 1.0$	ژنراتور $K_G = 1.0$
$\tau_S = 0.01$	حسگر $K_S = 1.0$

تابع هزینه به ازای سه پارامتر α برابر 0.1، 1.0 و 10 ارزیابی شده است. رفتار تابع هزینه و پاسخ پله با کنترل‌کننده بهینه حاصل از الگوریتم $ACO_{\mathbb{R}}$ به ازای سه مقدار متفاوت α به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ بازتاب داده شده‌اند. کنترل‌کننده‌های مقاوم حاصل از الگوریتم $ACO_{\mathbb{R}}$ با توجه به مقدار α اختیار شده به صورت $ACO-PID_{0.1}$ برای

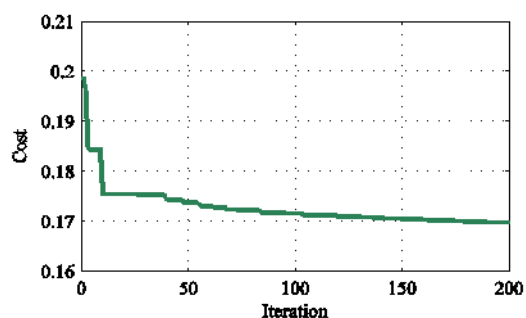
۴-۱- عملکرد سیستم با وجود نامعینی‌ها

۴-۱-۱- تغییر بار

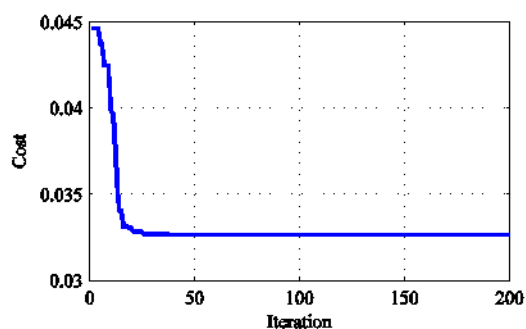
برای تبیین نحوه تأثیر تغییر بار بر عملکرد سیستم تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ، رفتار آن از بی‌باری تا بار کامل مطالعه شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تأثیر تغییرات بار در پارامترهای ژنراتور نمود پیدا می‌کند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵: رفتار تابع هزینه به ازای (الف) $\alpha = 0.1$ ، (ب)

$\alpha = 1.0$ و (ج) $\alpha = 10$

ACO-PID₁₀ برای $\alpha = 1.0$ و ACO-PID₁، $\alpha = 0.1$ برای $\alpha = 10$ نام‌گذاری شده‌اند.

برای روشن شدن بهتر کارایی راهکار کنترلی پیشنهادی با کنترل‌کننده‌های حاصل از الگوریتم‌های زیگلر - نیکولز، ازدحام ذرات و رقابت استعماری مقایسه شده‌اند [۱۵]. این سه کنترل‌کننده برای سهولت کار به ترتیب GA-ZN-PID، PID و ICA-PID نام‌گذاری شده‌اند. پاسخ پله سیستم با استفاده از این سه کنترل‌کننده در شکل ۷ ترسیم شده‌اند. ضرایب سه کنترل‌کننده ACO_{IR} به همراه سه کنترل‌کننده دیگر در جدول ۲ آورده شده است. مقایسه از شاخص‌های عملکردی حوزه زمان و حوزه فرکانس در جدول ۳ بازتاب داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت در کنترل‌کننده‌های ACO_{IR} با افزایش مقدار α حد بهره و حد فاز افزایش می‌یابند؛ اما هزینه آن کاهش می‌یابد که باید یک مصالحه بین حدود بهره و فاز و زمان نشست صورت گیرد؛ بنابراین در ادامه، برای بررسی کارایی رهیافت ACO_{IR} از کنترل‌کننده ACO-PID₁ بهره گرفته می‌شود که توازنی بین شاخص‌های حوزه زمان و حوزه فرکانس دارد. از جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت بهترین مقادیر شاخص‌های کارایی در اختیار کنترل‌کننده‌های ACO_{IR} است. به‌طوری‌که کنترل‌کننده ACO-PID₁ در قیاس با سه کنترل‌کننده ZN-PID، PID، GA-PID و ICA-PID در مدت زمان نشست پاسخ پله، میزان خطای حالت ماندگار و حدود بهره و فاز بر آنها برتری دارد و پاسخ کنترل‌کننده ZN-PID با وجود برخورداری از خطای حالت ماندگار خوب با فراجاهش نسبتاً بزرگ همراه است.

جدول ۲: پارامتر کنترل‌کننده‌ها

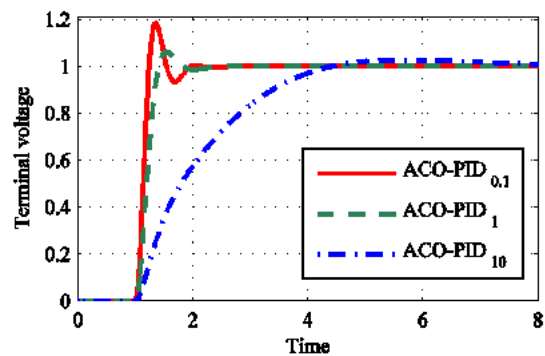
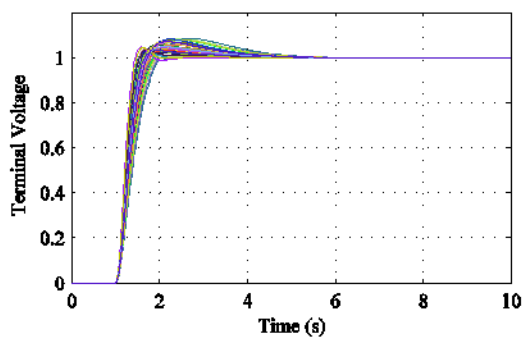
کنترل‌کننده	K_p	K_I	K_D
ACO-PID _{0.1}	1.1285	0.7719	0.3889
ACO-PID ₁	0.7006	0.4919	0.2139
ACO-PID ₁₀	0.1080	0.1000	0.0500
ZN-PID	1.0210	1.8743	0.1390
GA-PID	0.8220	0.6068	0.3838
ICA-PIDs	0.6830	0.6709	0.3048

جدول ۳: مقایسه شاخص‌های کارایی حوزه زمان و حوزه فرکانس کنترل‌کننده‌ها

شاخص کارایی						کنترل‌کننده
Φ_M	G_M	E_{SS}	T_s	OV	T_r	
48.1414	5.8973	1.4637×10^{-7}	1.6750	18.2076	0.1576	ACO-PID _{0.1}
61.5653	10.2799	9.3231×10^{-7}	1.7355	6.0710	0.2638	ACO-PID ₁
80.5273	49.6999	8.3366×10^{-5}	6.7677	2.7028	2.2122	ACO-PID ₁₀
25.8849	8.8505	4.6981×10^{-6}	3.9852	53.0421	0.2275	ZN-PID
54.7926	6.4862	2.5903×10^{-5}	2.0122	9.2645	0.1727	GA-PID
60.1240	8.0835	3.3739×10^{-5}	3.2854	4.3140	0.2143	ICA-PID

پاسخ سیستم حلقه‌بسته به‌ازای 50 مقدار تصادفی K_G و τ_G حاصل از کنترل‌کننده‌های ACO-PID₁، ZN-PIS، GA-PID و ICA-PID در شکل ۸ بازتاب داده شده‌اند. برای مقایسه عملکرد نمودار جعبه‌ای زمان نشست، فرآجهش و خطای حالت ماندگار برای هر یک از کنترل‌کننده‌ها برای 50 بار آزمایش به‌ترتیب در شکل‌های ۹-۱۱ به نمایش درآمده است. دقت شود در منحنی‌های جعبه‌ای فرآجهش و خطای حالت ماندگار، برای اینکه داده‌ها تمیز داده شوند، داده‌های مربوط به کنترل‌کننده ZN-PID با مقیاس 0.1 نمایش داده شده‌اند.

برای چهار کنترل‌کننده ACO-PID₁، ZN-PID، GA-PID و ICA-PID بیشینه مقدار ثبت‌شده برای زمان نشست در این آزمایش‌ها به‌ترتیب برابر 4.42، 4.81، 4.24 و 8.24 ثانیه، بیشینه مقدار فرآجهش برابر 8.66، 60.94، 8.01 و 11.01 و بیشینه مقدار خطای حالت ماندگار 2.28×10^{-5} ، 7.07×10^{-4} ، 2.02×10^{-4} و 1.02×10^{-3} گزارش می‌شود.



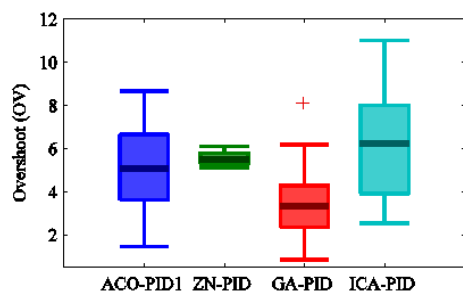
شکل ۶: پاسخ پله به‌ازای کنترل‌کننده‌های به‌دست آمده از ACO_α به‌ازای سه مقدار متفاوت α

شکل ۷: پاسخ پله سیستم با استفاده از سه کنترل‌کننده زیگلر-نیکولز، ازدحام ذرات و رقابت استعماری

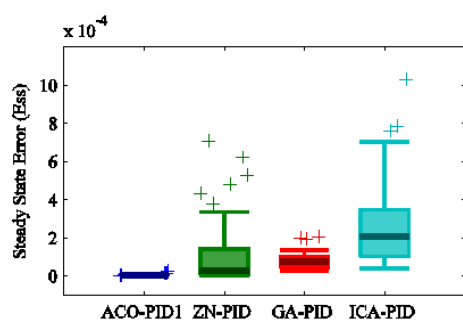
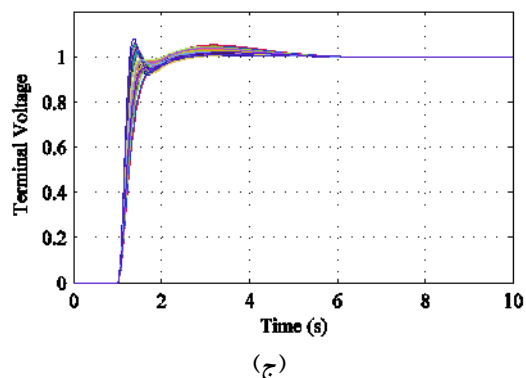
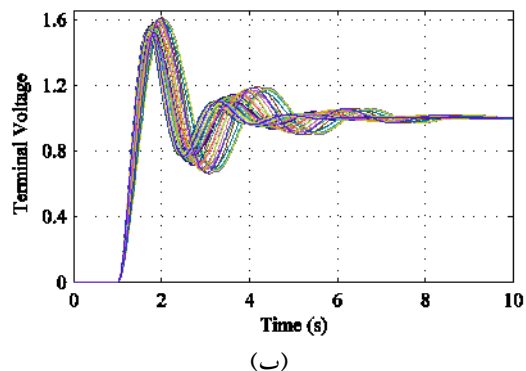
برای مدل‌سازی این سناریو فرض شد که در مدل ژنراتور (۳)، K_G و τ_G به‌ترتیب از 0.7 تا 1.0 و 1.0 تا 2.0 ثانیه تغییر کند. از روش مونت کارلو با 50 شبیه‌سازی به‌منظور بررسی عملکرد سیستم در بارهای مختلف بهره گرفته شد.

(الف)

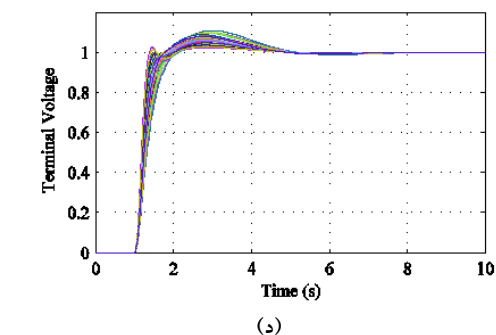
طراحی کنترل‌کننده بهینه مقاوم برای سیستم تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ با استفاده از الگوریتم



شکل ۱۰: نمودار جعبه‌ای فراجهش برای آزمایش تغییر بار برای چهار کنترل‌کننده. داده‌های مربوط به کنترل‌کننده ZN-PID با مقیاس 0.1 نمایش داده شده است.



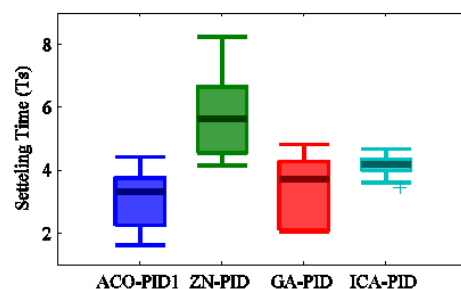
شکل ۱۱: نمودار جعبه‌ای مربوط به خطای حالت ماندگار برای آزمایش تغییر بار برای چهار کنترل‌کننده. داده‌های مربوط به کنترل‌کننده ZN-PID با مقیاس 0.1 نمایش داده شده است.



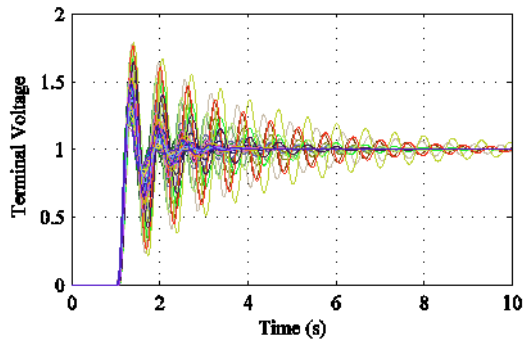
۴-۱-۲- نامعینی‌های تقویت‌کننده و حضور تأخیر زمانی در سیستم

تأخیر زمانی امری اجتناب‌ناپذیر در سیستم‌های کنترلی است که این پدیده ممکن است به دلیل حضور فیلترها، زمان لازم برای پردازش داده‌ها و تولید سیگنال کنترلی در سیستم ظاهر شود. برای مطالعه رفتار سیستم کنترل‌کننده ولتاژ در حضور این پدیده فرض شد که یک تأخیر زمانی به اندازه 10 تا 80 میلی‌ثانیه در سیستم حلقه‌بسته حضور داشته باشد. همچنین فرض شد پارامترهای تقویت‌کننده دارای نامعینی‌اند. برای مدل‌سازی این نامعینی‌ها، حدود تغییر بهره K_A در بازه 10 تا 14 و بازه تغییر ثابت زمانی τ_A در محدوده 0.6 تا 1.0 در نظر گرفته شد. مشابه آزمون قبلی از روش مونت کارلو با 50 شبیه‌سازی بر مطالعه رفتار سیستم با وجود تأخیر و نامعینی‌های تقویت‌کننده بهره گرفته شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۱۲ بازتاب داده شده است.

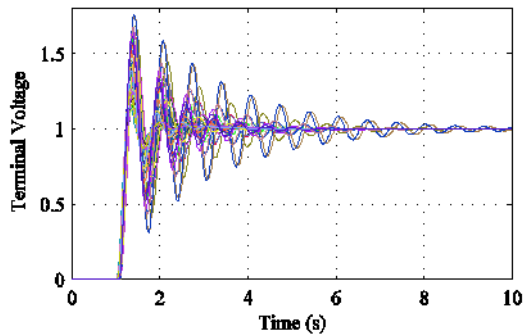
شکل ۸: نتایج آزمایش مونت کارلو برای کنترل‌کننده‌ها به ازای بارهای مختلف: (الف) ACO-PID₁، (ب) ZN-PID، (ج) ICA-PID و (د) GN-PID



شکل ۹: نمودار جعبه‌ای زمان نشست برای آزمایش تغییر بار برای چهار کنترل‌کننده

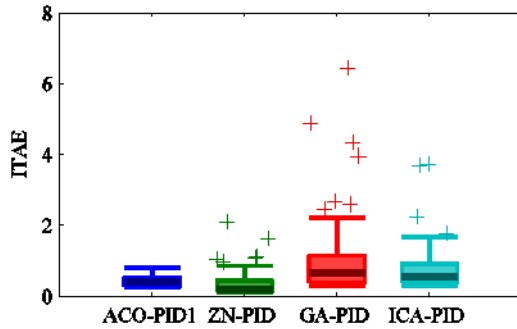


(ج)



(د)

شکل ۱۲: نتایج آزمایش مونت کارلو برای کنترل کننده‌ها در حضور تأخیر زمانی و نامعینی‌های تقویت کننده: (الف) ACO-PID₁, (ب) ZN-PID, (ج) GN-PID و (د) ICA-PID

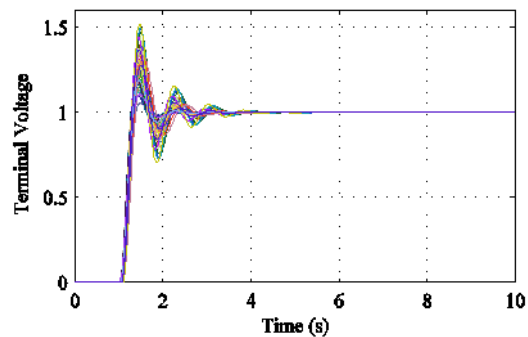


شکل ۱۳: نحوه تغییر معیار ITAE در شبیه‌سازی مونت کارلو برای کنترل کننده‌ها در حضور تأخیر زمانی و نامعینی‌های تقویت کننده. داده‌های مربوط به کنترل کننده ZN-PID با مقیاس 0.1 نمایش داده شده است.

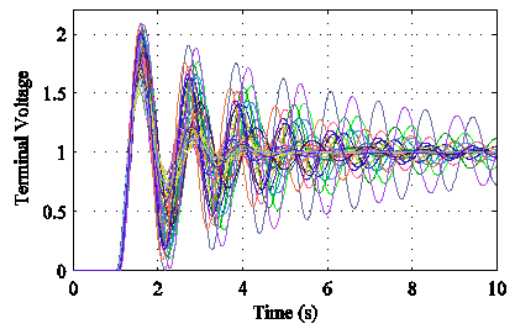
۴-۱-۳- نامعینی‌های تحریک کننده و نویز اندازه‌گیری

در این سناریو به منظور ارزیابی قوام سیستم در برابر تغییر پارامترهای سیستم تحریک، فرض شد هر یک از

کنترل کننده بهینه پیشنهادی، عملکردی مطلوب نسبت به بقیه کنترل کننده‌ها دارد؛ درحالی که نوسان‌های پاسخ‌های پله با کنترل کننده ACO-PID₁ در کمتر از پنج ثانیه میرا شده‌اند، اما بقیه کنترل کننده‌ها نیاز به زمان بیشتری برای میرا کردن نوسانات دارند. دلیل این امر را می‌توان به حد بهره و حد فاز بزرگ‌تر کنترل کننده ACO-PID₁ نسبت داد. برای مقایسه کمی این پاسخ‌ها نمودار جعبه‌ای مربوط به شاخص $ITAE = \int_0^{T_f} t|e(t)|dt$ که در آن $T_f = 10$ مدت زمان شبیه‌سازی است، در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. مشابه شبیه‌سازی قبل کمترین مقدار ITAE به کنترل کننده ACO-PID₁ تعلق دارد؛ به طوری که بیشینه مقدار این سنجه با این کنترل کننده برابر 0.7974 و برای سه کنترل کننده ZN-PID، GN-PID و ICA-PID به ترتیب مقادیر برابر با 20.80، 6.4160 و 3.7291 گزارش شد. این شبیه‌سازی نیز نشان‌دهنده مقاومت کنترل کننده پیشنهادی در برابر نامعینی‌های ساختاری و پارامتری است.



(الف)



(ب)

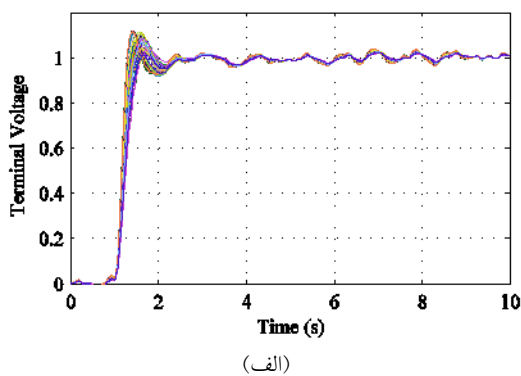
طراحی کنترل کننده بهینه مقاوم برای سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ با استفاده از الگوریتم

فراجهش با استفاده از این کنترل کننده در شرایط نامی برابر 1.44، خطای حالت ماندگار 2.5×10^{-6} و زمان های خیز و نشست به ترتیب 0.34 و 2.22 ثانیه به دست می آیند که از کنترل کننده $ACO-PID_1$ پاسخی کندتر و خطای ماندگار بالاتری دارند.

پاسخ های پله سیستم با استفاده از کنترل کننده $ACO-PID_1$ و کنترل کننده LQG به ازای ۵۰ مقدار تصادفی از پارامترهای زیرسیستم تحریک کننده و نویز محیطی در شکل ۱۴ بازتاب داده شده اند. در قیاس با کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله، کنترل کننده LQG حساسیت بیشتری در برابر نویز دارد. نمودار جعبه ای شاخص $ITAE$ برای سیستم با دو کنترل کننده در شکل ۱۵ ترسیم شده است. این شبیه سازی نیز نشان دهنده برتری کنترل کننده $ACO-PID_1$ نسبت به جبران ساز بهینه LQG است.

۵- جمع بندی

در این مقاله طراحی کنترل کننده بهینه برای یک سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ مطالعه شد. رویکرد کنترلی سیستم بر استفاده از کنترل کننده PID بنا نهاده شد. با توجه به وجود نامعینی های پارامتری سیستم و اینکه از مدل خطی برای طراحی کنترل کننده استفاده شده است، لزوم بهره گیری از رهیافت کنترلی مقاوم احساس می شود. برای حل این مسئله در مقاله حاضر، فرایند طراحی کنترل کننده به یک مسئله بهینه سازی تبدیل شد.



پارامترهای K_E و τ_E دارای ۳۰٪ نامعینی اند و خروجی اندازه گیری شده آمیخته به نویز است. قدرت نویز اندازه گیری برابر 0.1 اختیار شد. با توجه به اینکه برتری کنترل کننده $ACO-PID_1$ نسبت به سایر کنترل کننده های PID در سناریوهای پیشین به اثبات رسیده است، در این زیربخش برای مقایسه بهتر عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با ساختار متفاوت از کنترل کننده PID ، از کنترل کننده LQG [۴] استفاده شد. این جبران ساز بهینه ادغامی از کنترل کننده حالت LQR و رویت کننده کالمن است.

برای به دست آمدن این کنترل کننده، ابتدا یک تحقق فضای حالت برای سیستم به صورت زیر به دست می آید که x حالت سیستم و u سیگنال کنترلی است.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -100 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1.25 & 0 \\ 0 & 0 & -2.5 & 25 \\ 0 & 0 & 0 & -10 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 8 \end{bmatrix} u$$

$$y = [12.5 \quad 0 \quad 0 \quad 0]x$$

در کنترل کننده LQG سعی می شود ورودی کنترلی

به گونه ای تعیین شود که تابع هزینه زیر کمینه شود:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + e^2 + r u^2) dt \quad (20)$$

که در آن $e = r - y$ خطای تعقیب، $Q \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$

ماتریس مثبت نیمه معین و r ثابت مثبت پارامترهای طراحی اند. با اختیار $r = 1$ و $Q = 10I_4$ کنترل کننده LQG به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$u = C_c x_c$$

جایی که:

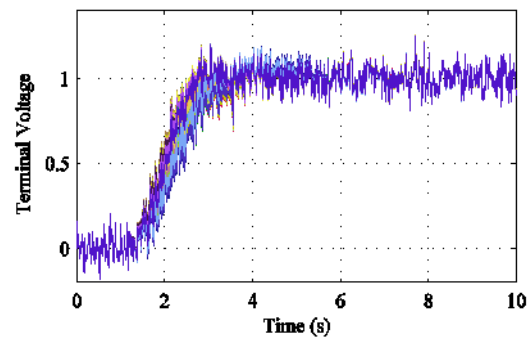
$$A_c = \begin{bmatrix} -110.4 & 8 & 0 & 0 \\ -38.55 & -1 & 0 & 0 \\ -28.23 & 0 & 25 & 0 \\ -1.944 & -5.254 & -15.27 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0.8288 \\ 0 & 3.084 \\ 0 & 2.258 \\ 0 & 0.07549 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$C_c = [-0.125 \quad -0.656 \quad -0.317 \quad -0.65 \quad 1].$$

مراجع

- [1] L. L. Grigsby, "Power System Stability and Control", Third ed., CRC press, USA 2016.
- [2] J. Machowski, J. Bialek, and J. Bumby, "Power System Dynamics: Stability and Control", John Wiley & Sons, USA 2011.
- [3] Y. Batmani and H. Golpîra, "Automatic Voltage Regulator Design Using A Modified Adaptive Optimal Approach," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 104, pp. 349-357, January 2019.
- [4] F. Tabassum and M. S. Rana, "An Optimal LQG-DC Control for Compensating Voltage Fluctuation in a Single Area Power System," in International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering, pp. 1-4, 11-12 July 2019.
- [5] A. J. H. Al Gizi, "A Particle Swarm Optimization, Fuzzy PID Controller With Generator Automatic Voltage Regulator," Soft Computing, Vol. 23, No. 1, pp. 8839-8853, September 2019.
- [6] M. Elsi, "Design Of Neural Network Predictive Controller Based On Imperialist Competitive Algorithm For Automatic Voltage Regulator," Neural Computing and Applications, Vol. 31, pp. 5017-5027, January 2019.
- [7] M. E. Ortiz-Quisbert, M. A. Duarte-Mermoud, F. Milla, R. Castro-Linares, and G. Lefranc, "Optimal Fractional Order Adaptive Controllers For AVR Applications," Electrical Engineering, Vol. 100, pp. 267-283, March 2018.
- [8] H. Shayeghi, A. Younesi, and Y. Hashemi, "Optimal Design of a Robust Discrete Parallel FP+FI+FD Controller for the Automatic Voltage Regulator System," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 67, pp. 66-75, May 2015.
- [9] G.-Q. Zeng, J. Chen, Y.-X. Dai, L.-M. Li, C.-W. Zheng, and M.-R. Chen, "Design of Fractional Order PID Controller for Automatic Regulator Voltage System Based on Multi-Objective Extremal Optimization," Neurocomputing, Vol. 160, pp. 173-184, July 2015.
- [10] S. Bhati and D. Nitawwre, "Genetic Optimization Tuning of an Automatic Voltage Regulator System," International Journal of Scientific Engineering and Technology, Vol. 1, No. 3, pp. 20-34, July 2012.
- [11] B. Hekimoğlu, "Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system," Trans. of the Institute of Measurement and Control, Vol. 41, pp. 1761-1771, April 2019.
- [12] S. Panda, B. K. Sahu, and P. K. Mohanty, "Design and Performance Analysis of PID Controller for an Automatic Voltage Regulator System Using Simplified Particle Swarm Optimization," Journal of the Franklin Institute, Vol. 349, No. 5, pp. 2609-2625, October 2012.
- [13] E. Amoupour, "New Method Presentation for PID Controller Design Based on PSO-NM Hybrid Algorithm," Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 63-76, April 2017.

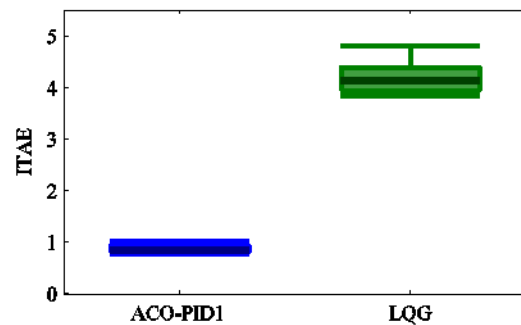


(ب)

شکل ۱۴: نتایج آزمایش مونت کارلو برای کنترل کننده‌ها در

حضور نامعینی‌های تحریک کننده و نویز محیط:

ACO-PID₁ (الف)، ZN-PID (ب)



شکل ۱۵: نحوه تغییر معیار ITAE در شبیه سازی مونت کارلو

برای کنترل کننده‌های ACO-PID₁ و LQG در حضور

نامعینی‌های تحریک کننده و نویز اندازه گیری

با دخیل کردن معیارهای حد فاز و حد بهره در تعریف تابع هزینه، شاخصی تعریف شد که کمینه سازی آن، قوام سیستم در برابر نامعینی‌ها را به همراه داشت و نیز با وارد کردن معیار خطای ITAE تضمین می شد که خطای حالت ماندگار بهبود یابد. برای حل این مسئله بهینه سازی از الگوریتم ACO_{RR} بهره گرفته شد. با شبیه سازی‌های که در سناریوهای مختلف انجام شد، برتری کنترل کننده حاصل از الگوریتم ACO_{RR} نسبت به روش‌های کنترلی موجود در ادبیات به اثبات رسید. برای کارهای آینده می توان عملکرد کنترل کننده در سیستم چندماشینه را با وجود خطاهای شبکه نیز بررسی کرد تا بهتر بتوان کارایی آن را سنجید.

- [19] M. Dorigo and C. Blum, "Ant Colony Optimization Theory: A Survey," *Theoretical computer science*, vol. 344, pp. 243-278, November 2005.
- [20] H.-b. Duan, D.-b. Wang, and X.-f. Yu, "Novel Approach to Nonlinear PID Parameter Optimization Using Ant Colony Optimization Algorithm," *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 73-78, Jun 2006.
- [21] M. Ünal, H. Erdal, and V. Topuz, "Trajectory Tracking Performance Comparison Between Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization for PID Controller Tuning on Pressure Process," *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 20, pp. 518-528, August 2012.
- [22] K. Jagatheesan, B. Anand, and D. Nilanjan, "Automatic Generation Control of Thermal-Thermal-Hydro Power Systems with PID Controller using Ant Colony Optimization," *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 18-34, December 2015.
- [23] K. Socha and M. Dorigo, "Ant Colony Optimization for Continuous Domains," *European journal of operational research*, Vol. 185, pp. 1155-1173, March 2008.
- [14] E. Çelik and N. Öztürk, "A Hybrid Symbiotic Organisms Search and Simulated Annealing Technique Applied to Efficient Design of PID Controller for Automatic Voltage Regulator," *Soft Computing*, Vol. 22, pp. 8011-8024, December 2018.
- [15] Y. Tang, L. Zhao, Z. Han, X. Bi, and X. Guan, "Optimal Gray PID Controller Design for Automatic Voltage Regulator System via Imperialist Competitive Algorithm," *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, Vol. 7, pp. 229-240, April 2016.
- [16] V. Rajinikanth and S. C. Satapathy, "Design of Controller for Automatic Voltage Regulator Using Teaching Learning Based Optimization," *Procedia Technology*, Vol. 21, pp. 295-302, January 2015.
- [17] E. Afzalan, and M. Joorabian, "Control Design for Load-Frequency Control of Power System Using Seeker Optimization Algorithm Considering Governor Dead-band", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 111-133, 2015.
- [18] L. Yun, A. Kiam Heong, and G. C. Y. Chong, "PID Control System Analysis and Design," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 26, No.1, pp. 32-41, February 2006.

¹ Automatic Voltage Regulator

² Linear Quadratic Gaussian

³ Fractional

⁴ Proportional-Integral-Derivative Controller

⁵ Ziegler-Nichols

⁶ Particle Swarm Optimization

⁷ Stimulated Annulling

⁸ Imperialist Competitive Algorithm

⁹ Teaching Learning Based Optimization

¹⁰ Seeker Optimization

¹¹ Integral Square Error

¹² Integral Absolute value Error

¹³ Integral Time-Weighted Square Error

¹⁴ Combinatorial Optimization

¹⁵ Construct Ants Solution

¹⁶ Update Pheromones

¹⁷ Daemon Actions

¹⁸ Solution Archive

¹⁹ Selection Pressure