



دانشگاه کاشان
University of Kashan

مجله محاسبات نرم
SOFT COMPUTING JOURNAL
تارنمای مجله: scj.kashanu.ac.ir



کنترل فرکانس بار با استفاده از کنترل کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده^۱

صابر فلاحتی علی آبادی^۱، دکتر، سید عباس طاهر^{۲*}، استاد
^۱ دانشکده برق و کامپیوتر، گروه مهندسی برق، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
^۲ شرکت برق منطقه ای اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

کنترل فرکانس بار (LFC) یکی از مهمترین موضوعات در سیستم های قدرت الکتریکی می باشد. در صنعت معمولاً از کنترل کننده های تناسبی انتگرالی (PI) برای این امر استفاده می شود. در این مقاله از کنترل کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده برای کنترل فرکانس بار در یک سیستم دو ناحیه ای استفاده شده است. به منظور تعیین محل توابع عضویت ورودی ها و نیز بهره های کنترل کننده های Fuzzy-PID از بهینه سازی استفاده شده است. در این مطالعه الگوریتم رقابت استعماری (ICA) جهت بهینه سازی بکار گرفته شده است. شبیه سازی ها در محیط سیمولینک برنامه MATLAB و در حضور منابع انرژی بادی و بارهای متغیر انجام پذیرفته است. به منظور مقایسه، شبیه سازی ها با کنترل کننده FOPID شده با الگوریتم رقابت استعماری نیز انجام شده است. همچنین به منظور بررسی میزان مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی در برابر عدم قطعیت های موجود در سیستم، شبیه سازی ها با تغییرات پارامترهای سیستم دو ناحیه ای نیز صورت گرفته است. نتایج شبیه سازی ها، عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی را نشان می دهند.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۰۵ بهمن ماه ۱۳۹۹
پذیرش ۲۵ مرداد ماه ۱۴۰۰

کلمات کلیدی:

کنترل کننده Fuzzy-PID
توابع عضویت بهینه شده
الگوریتم رقابت استعماری
کنترل فرکانس بار
کنترل کننده FOPID

مسئله کنترل سرعت یک واحد توربین-ژنراتور تبدیل شود. این کنترل سرعت در ابتدا با اضافه نمودن سیستم گاورنر صورت می گیرد که سرعت ماشین را حس کرده و شیر ورودی را برای تغییر خروجی توان مکانیکی به منظور ردیابی تغییر بار و بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی تغییر می دهد [۲]. تحت عملکرد نرمال، انحرافات فرکانسی کوچک می تواند با کنترل اولیه تضعیف شود. برای انحرافات فرکانسی بزرگتر (عملکرد غیر نرمال)، بسته به میزان توان ذخیره در دسترس، کنترل ثانویه که به عنوان کنترل فرکانس بار (LFC)^۱ نیز شناخته می شود، مسئول بازگرداندن فرکانس سیستم می باشد. دو هدف اصلی

۱. مقدمه

کنترل فرکانس یکی از مهمترین مباحث در سیستم های قدرت الکتریکی می باشد [۱] به گونه ای که یکی از شاخصه های پایداری سیستم های قدرت، پایداری فرکانسی می باشد. در صورتی که فرکانس سیستم به درستی کنترل نشود می تواند سبب از کار افتادن تجهیزات شبکه و نیز خاموشی سراسری گردد. از آنجا که فرکانس در یک شبکه الکتریکی متناسب با سرعت چرخشی ژنراتور می باشد، مسئله کنترل فرکانس ممکن است مستقیماً به

* نوع مقاله: پژوهشی

* نویسنده مسئول

پست (های) الکترونیک: s_falahati@yahoo.com (فلاحتی علی آبادی)

sataher@kashanu.ac.ir (طاهر)

¹ Load Frequency Control

تکنیک جدیدی را برای طراحی کنترل کننده FOPID برای مسئله کنترل فرکانس بار ارائه نموده است. این مرجع از الگوریتم BB-BC^۵ و طرح کنترل مدل داخلی استفاده نموده است. مرجع [۱۲] از الگوریتم GMBO^۶ برای طراحی FOPID برای کنترل فرکانس بار استفاده نموده است. مرجع [۱۳] طراحی کنترل کننده FOPID را با استفاده از تئوری خارتونوف^۷ انجام داده است. استفاده از ترکیب کنترل کننده های فازی و PID نیز برای کنترل فرکانس سیستم قدرت در مقالات مختلفی پیشنهاد شده است [۱۴-۱۵]. در مرجع [۱۴] از یک نوع کنترل کننده Fuzzy-PID برای مسئله LFC در سیستم های قدرت چند ناحیه ای بهم پیوسته استفاده نموده است. در این مرجع از الگوریتم بهینه سازی Tribe-DE و روش تنظیم وزن قانون استفاده شده است. در مرجع [۱۵] بهره های کنترل کننده Fuzzy-PID با استفاده از روش IGWO^۸ به منظور تنظیم فرکانس بهینه شده اند. در این مقاله از کنترل کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده با ICA جهت کنترل فرکانس بار در یک سیستم دو ناحیه ای استفاده می شود. ساختار کنترلی کنترل کننده این تحقیق با مرجع [۱۴] تفاوت داشته و بر خلاف مرجع [۱۵] که در آن تنها بهره های کنترل کننده بهینه گشته اند، در این مقاله علاوه بر بهره های کنترل کننده، محل توابع عضویت ورودی های کنترل کننده نیز به منظور کنترل فرکانس سیستم قدرت بهینه شده اند که با انجام این امر، کنترل فرکانس به صورت بهتری انجام می شود. بدین منظور از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است که طبق اطلاعات گرفته شده تاکنون این کار صورت نگرفته است. نویسندگان این مقاله در کار قبلی خود [۱] از کنترل کننده FOPID به منظور کنترل فرکانس بار استفاده کرده اند که در اینجا به منظور مقایسه، شبیه سازی ها با آن کنترل کننده FOPID بهینه شده با الگوریتم ICA نیز انجام شده است. ادامه مقاله بدین صورت سازماندهی شده است: در بخش دوم ساختار سیستم تحت مطالعه شرح داده می شود. در بخش سوم

LFC سیستم قدرت، حفظ فرکانس و تبادلات توان با نواحی کنترلی همسایه در مقادیر برنامه ریزی شده می باشد. این اهداف با اندازه گیری سیگنال خطای کنترلی که خطای کنترل ناحیه ای (ACE)^۱ نامیده می شود و نمایانگر عدم تعادل توان حقیقی بین تولید و بار است، بدست می آید. ACE به عنوان سیگنال ورودی کنترلی به کنترل کننده (که معمولاً یک کنترل کننده تناسبی انتگرالی می باشد) مورد استفاده قرار می گیرد. خروجی کنترل کننده سپس بر اساس ضرایب مشارکت بین واحدهای ژنراتور شرکت کننده در LFC پخش می شود تا فرامین کنترلی مناسب برای نقاط تنظیم نیروگاهها فراهم گردد. تاکنون تحقیقات فراوانی در حوزه LFC صورت گرفته است. در این بین کنترل کننده PID بیشترین استفاده را در صنعت برق داشته است [۳-۹]. در مرجع [۳] یک کنترل کننده PID بهینه شده با استفاده از مقادیر ویژه ماتریس مشخصه و روش لیاپانوف به منظور کنترل فرکانس بار استفاده شده است. در مرجع [۴] رویکرد جدیدی برای طراحی کنترل کننده PID مقاوم به منظور کنترل فرکانس بار در یک سیستم قدرت چند ناحیه ای پیشنهاد شده است. در مرجع [۵] تکنیک QRAWCP^۲ برای طراحی کنترل کننده PID بهینه برای مسئله LFC بکار گرفته شده است. در [۶] طراحی کنترل PID در حوزه فرکانس از طریق رویکرد استنتاج مستقیم پیشنهاد شده است. در مرجع [۷] از طریق بسط سری های لورنت، کنترل کننده PID طراحی شده است. در مرجع [۸] از رویکرد کنترل PID مبتنی بر LMI برای این امر استفاده گشته است. در مرجع [۹] از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری (ICA)^۳ جهت کنترل فرکانس بار استفاده شده است. استفاده از PID مرتبه کسری (FOPID)^۴ نیز به دلیل قابلیت انعطاف بالاتر آن در مقایسه با PID سنتی به منظور کنترل سیستم های قدرت در مراجع مختلفی معرفی شده است [۱]. در مرجع [۱۰] از کنترل کننده FOPID مبتنی بر PSO برای کنترل سیستم های قدرت استفاده شده است. مرجع [۱۱]

⁵ Big Bang Big Crunch

⁶ Gases Brownian Motion Optimization

⁷ Kharitonov

⁸ Improved Grey Wolf Optimization

¹ Area Control Error

² Quadratic Regulator Approach with Compensating Pole

³ Imperialist Competitive Algorithm

⁴ Fractional Order PID

آورده شده است:

$$T_{TR} = \frac{1 + sF_{hp}T_{rh}}{(1 + sT_{ch2})(1 + sT_{rh})} \quad (4)$$

در رابطه بالا F_{hp} ، T_{ch2} و T_{rh} به ترتیب ضریب توربین فشار بالا، تاخیر محفظه بخار و ثابت زمانی بازگرمایش می‌باشند. در شکل (۱) ACE_i نشان دهنده خطای کنترل ناحیه‌ای بوده و از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$ACE_i = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,i} \quad (5)$$

که در آن $\Delta P_{tie,i}$ نشان‌دهنده انحراف توان بین ناحیه‌ای در ناحیه i بوده که توسط رابطه ذیل بدست می‌آید [۲]:

$$\Delta P_{tie,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Delta P_{tie,ij} = \frac{2\pi}{s} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ij} \Delta f_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ij} \Delta f_j \right] \quad (6)$$

در این رابطه، N تعداد نواحی کنترلی بوده و T_{ij} بیانگر ضریب ناحیه سنکرون بین نواحی i و j می‌باشد که از رابطه ذیل حاصل می‌شود:

$$T_{ij} = \frac{|V_i||V_j|}{X_{ij}} \cos(\delta_i^0 - \delta_j^0) \quad (7)$$

در رابطه مذکور، V_i و δ_i^0 به ترتیب ولتاژ و زاویه فاز ترمینال ناحیه i بوده و X_{ij} راکتانس بین ناحیه i و j می‌باشد.

کنترل‌کننده پیشنهادی معرفی می‌گردد. در بخش چهارم شبیه‌سازی‌ها انجام شده و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

۲. سیستم تحت مطالعه

سیستم تحت مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل R ، β و D به ترتیب بیانگر ضریب افتی ژنراتور، ضریب بایاس و ضریب میرایی ژنراتور در ناحیه i ام می‌باشند. β از رابطه ذیل بدست آمده است:

$$\beta_i = \frac{1}{R_i} + D_i \quad (1)$$

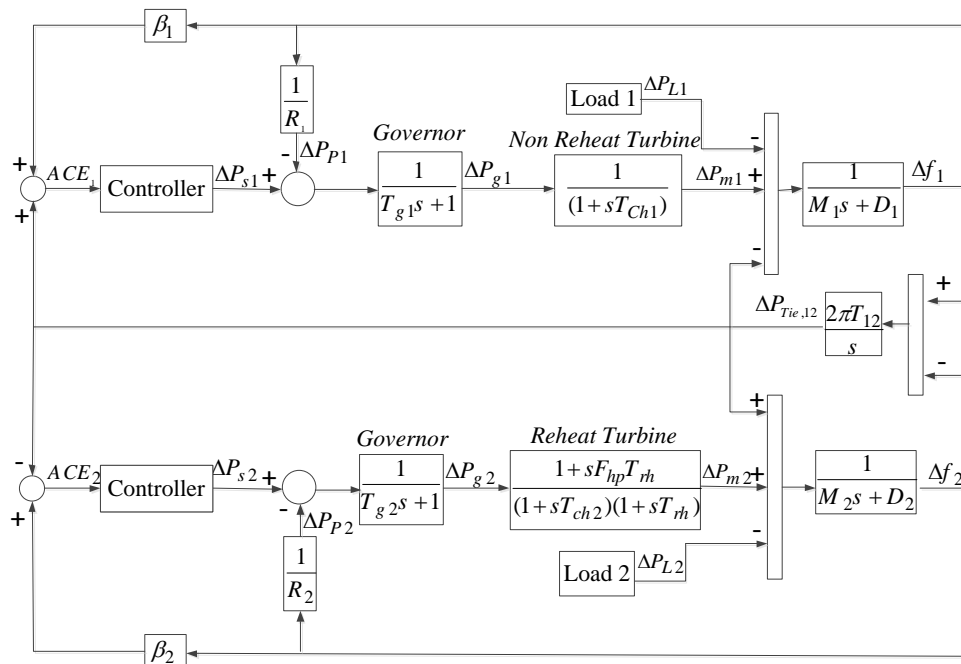
گاورنر در هر دو ناحیه به صورت زیر مدل شده است:

$$T_G = \frac{1}{T_g s + 1} \quad (2)$$

که در آن T_G ثابت زمانی گاورنر می‌باشد. برای ناحیه اول یک توربین بدون بازگرمایش بکار برده شده و به صورت ذیل مدل شده است:

$$T_T = \frac{1}{(1 + sT_{Ch1})} \quad (3)$$

که در آن T_{Ch1} ثابت زمانی توربین می‌باشد. ناحیه دوم دارای یک توربین با بازگرمایش می‌باشد. مدل این توربین در ذیل



شکل (۱): ساختار سیستم تحت مطالعه

معیار ITAE به منظور تعیین موارد فوق‌الذکر به صورت ذیل بکار برده شده است:

$$F = \int_0^T (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|)t dt \quad (8)$$

در این رابطه Δf_1 انحراف فرکانسی در ناحیه اول، Δf_2 انحراف فرکانسی در ناحیه دوم و ΔP_{tie} انحراف توان بین ناحیه‌ای می‌باشد. محدوده تعیین شده برای نقاط A تا H و نیز پارامترهای K_p, K_d, K_i و β به صورت ذیل می‌باشد:

$$\begin{aligned} -0.8 &\leq A, E \leq -0.4 \\ -0.4 &\leq B, F \leq 0 \\ 0 &\leq C, G \leq 0.4 \\ 0.4 &\leq D, H \leq 0.8 \\ -1 &\leq K_p, K_d, K_i, \beta \leq 1 \end{aligned} \quad (9)$$

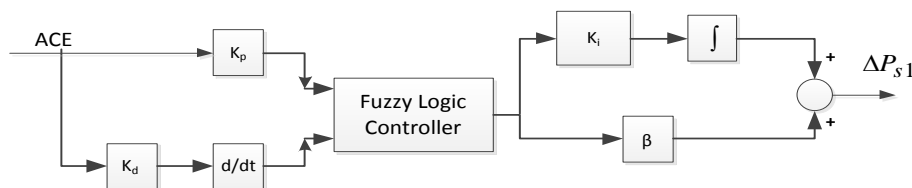
برای بهینه‌سازی فرض شده است که در لحظه صفر یک بار پله‌ای به بزرگی یک پریونیت به هر دو ناحیه وارد شده است. به منظور بهینه‌سازی، نقاط A تا H برای کنترل کننده‌های Fuzzy-PID هر دو ناحیه یکسان در نظر گرفته شده‌اند ولی پارامترهای K_p, K_d, K_i و β کنترل کننده‌ها متفاوت خواهند بود.

همانطور که قبلاً نیز بیان گشت کنترل کننده FOPID در مراجع متعددی از جمله مرجع [۱] به منظور کنترل فرکانس بار مورد استفاده قرار گرفته است. در اینجا به منظور مقایسه، شبیه‌سازی‌ها با کنترل کننده FOPID نیز صورت پذیرفته است. معیار (۸) جهت تعیین پارامترهای کنترل کننده FOPID نیز استفاده شده است. کنترل کننده FOPID در مقالات مختلفی از جمله مرجع [۱۷] مورد اشاره قرار گرفته است و در این مطالعه از آوردن توضیحات بیشتر در مورد این کنترل کننده خودداری شده است. در ادامه الگوریتم رقابت استعماری به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

همچنین در شکل (۱) $\Delta P_m, \Delta P_g, \Delta P_s, \Delta P_L$ به ترتیب بیانگر تغییرات بار، تغییرات سیگنال خروجی کنترل کننده ثانویه، تغییرات توان خروجی گاورنر و تغییرات توان خروجی توربین می‌باشند.

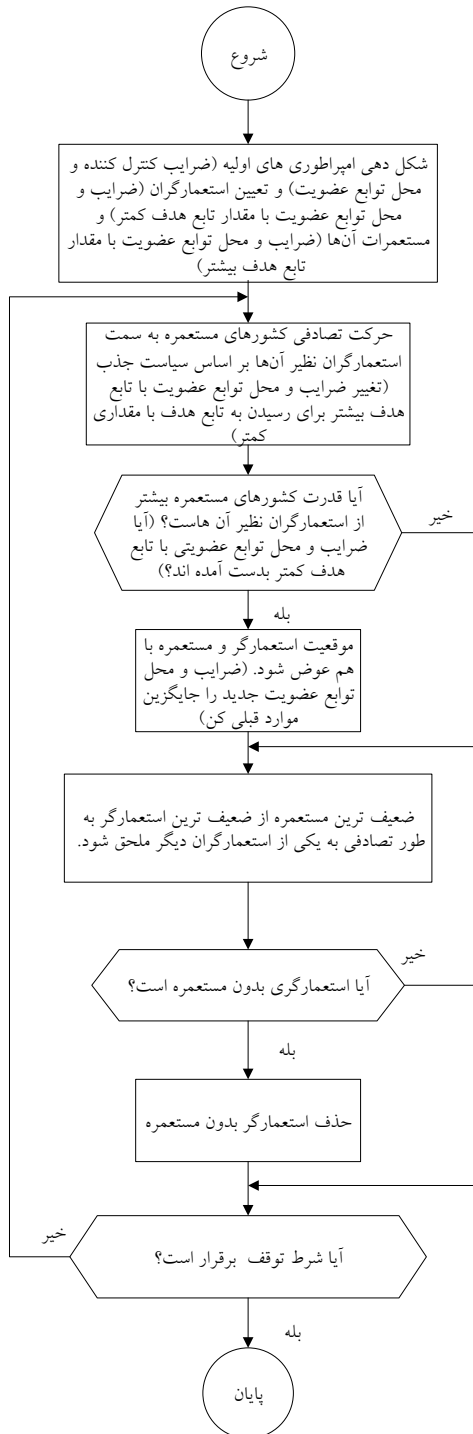
۳. طراحی کنترل کننده

همانطور که قبلاً نیز بیان گشت در این مقاله از کنترل کننده Fuzzy-PID بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری جهت کنترل فرکانس بار استفاده شده است. ساختار کلی این کنترل کننده از مرجع [۱۶] اخذ شده است ولی قوانین آن بسته به مسئله تغییر یافته و علاوه بر آن، محل توابع عضویت آن نیز با استفاده از بهینه‌سازی تعیین گشته است. ساختار کنترل کننده مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. ورودی‌های این کنترل کننده، خطا و مشتق خطای کنترل ناحیه‌ای می‌باشند. هر کدام از مقدار خطا، مشتق خطا و خروجی به هفت ناحیه به نام‌های NL, NM, NS, Z, PS, PM و PL تقسیم می‌شوند. قوانین فازی در جدول (۱) آورده شده‌اند. قوانین فازی به گونه‌ای ایجاد شده‌اند تا خطای کنترل ناحیه‌ای را حداقل نمایند. برای مثال هنگامی که خطای ACE زیاد بوده (NL) و شیب (مشتق) آن نیز زیاد و منفی باشد (NL)، لذا باید فرمان مثبت بزرگی تولید شود (PL) تا خطای ACE کاهش یابد. بالعکس هنگامی که خطای کنترل ناحیه‌ای بسیار مثبت (PL) باشد و مشتق آن نیز زیاد و مثبت (PL) باشد، خروجی کنترل کننده برای کاهش این خطا باید بسیار منفی (NL) باشد. دیگر قوانین نیز با همین منطق ایجاد شده‌اند. توابع عضویت کنترل کننده فازی در شکل‌های (۳) تا (۵) نشان داده شده است. نقاط A تا D در شکل (۳) و E تا H در شکل (۴) و نیز مقادیر K_p, K_d, K_i و β توسط بهینه‌سازی بدست می‌آیند.



شکل (۲): ساختار کنترل کننده Fuzzy-PID مورد استفاده

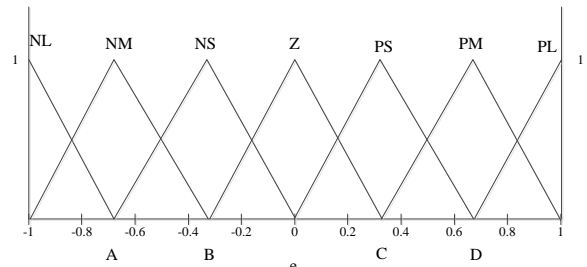
به عنوان امپریالیست در نظر گرفته شده و باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، محسوب می‌شوند. امپریالیست‌ها بسته به قدرت خود، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود می‌کشند. فلوجارت این الگوریتم در شکل (۶) آورده شده است [۱۷].



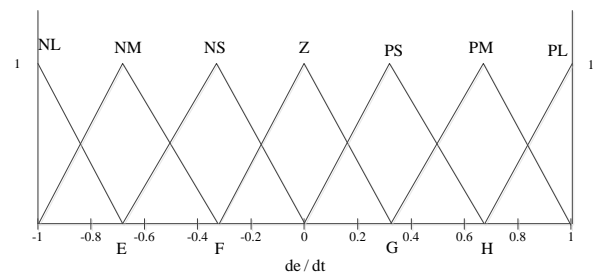
شکل (۶): فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری

جدول (۱): قوانین فازی بکار گرفته شده

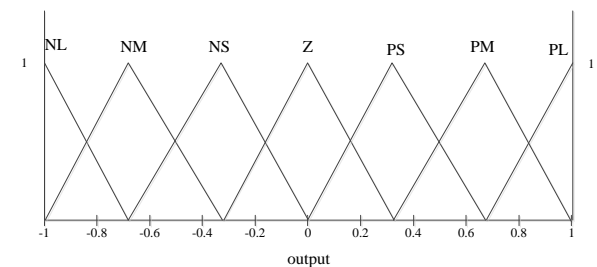
dACE/dt	ACE						
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PL	PL	PM	PM	Z
NM	PL	PL	PL	PM	PS	PS	Z
NS	PM	PM	PM	PS	Z	Z	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NS	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	Z	NS	NS	NM	NL	NL	NL
PL	NS	NS	NM	NL	NL	NL	NL



شکل (۳): تابع عضویت ACE



شکل (۴): تابع عضویت مشتق ACE



شکل (۵): تابع عضویت خروجی کنترل‌کننده

۴. الگوریتم رقابت استعماری

امروزه الگوریتم رقابت استعماری به دلیل سرعت و دقت بالای آن در دستیابی به پاسخ‌های مسئله، مورد توجه قرار گرفته است [۲۱-۱۸]. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک «کشور» نامیده می‌شوند، آغاز می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت

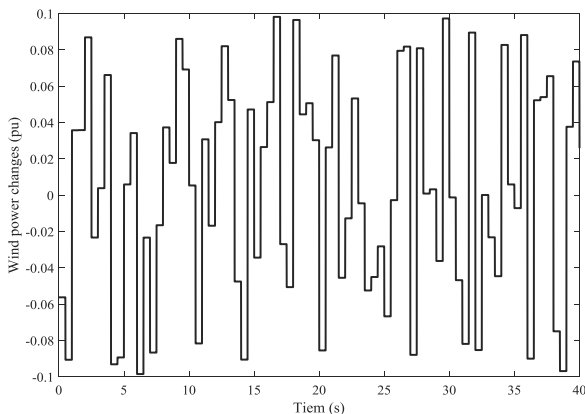
۵. نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی های انجام شده در محیط سیمولینک MATLAB بیان شده و مورد بررسی قرار می گیرد.

۵.۱. مطالعه موردی اول: شبیه سازی در حضور نیروگاه بادی

در این حالت فرض می شود که در هر یک از نواحی یک نیروگاه بادی وجود دارد. تغییرات خروجی نیروگاه بادی برای هر دو ناحیه یکسان در نظر گرفته شده و در شکل (۹) نشان داده شده است. تغییرات فرکانس در نواحی ۱ و ۲ و نیز تغییرات توان بین ناحیه ای به ترتیب در شکل های (۱۰) تا (۱۲) نشان داده شده است.

همانطور که از شکل های (۱۰) و (۱۱) می توان متوجه شد با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی نوسانات فرکانس در هر دو ناحیه نسبت به زمانی که از کنترل کننده FOPID بهینه شده، استفاده می شود کاهش می یابد. مقدار موثر انحراف فرکانسی با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی در نواحی ۱ و ۲ به ترتیب برابر با $0/0024$ و $0/0028$ هرتز می باشد در حالی که با استفاده از کنترل کننده FOPID این مقادیر به ترتیب برابر با $0/0044$ و $0/0044$ هرتز می باشد که نشان دهنده کاهش انحراف فرکانسی به اندازه 46% و 36% به ترتیب در نواحی ۱ و ۲ با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی می باشد.

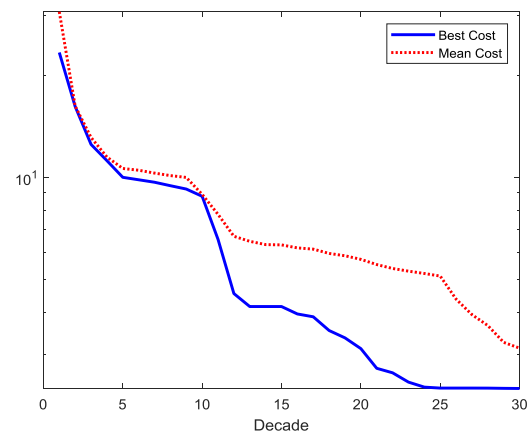


شکل (۹): تغییرات توان باد

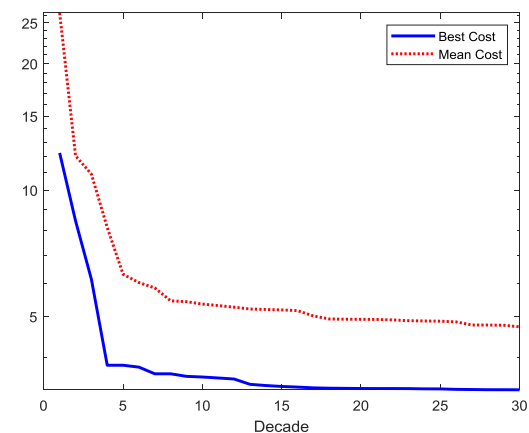
به طور خلاصه مراحل الگوریتم رقابت استعماری را می توان بدین صورت برشمرد [۲۲]:

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

در ضمیمه برخی از پارامترهای سیستم دو ناحیه ای و الگوریتم رقابت استعماری به همراه مقادیر بدست آمده از بهینه سازی آورده شده است. همچنین روند همگرایی برای کنترل کننده پیشنهادی و کنترل کننده FOPID به ترتیب در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده اند.

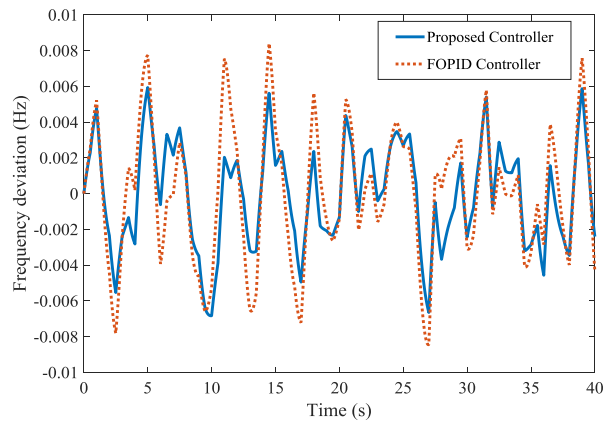


شکل (۷): روند همگرایی برای روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

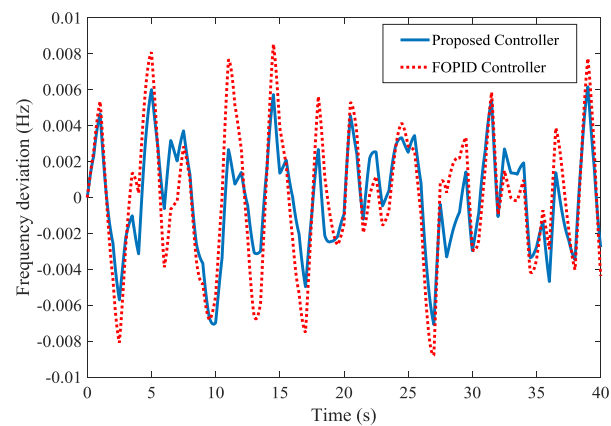


شکل (۸): روند همگرایی برای کنترل کننده FOPID با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

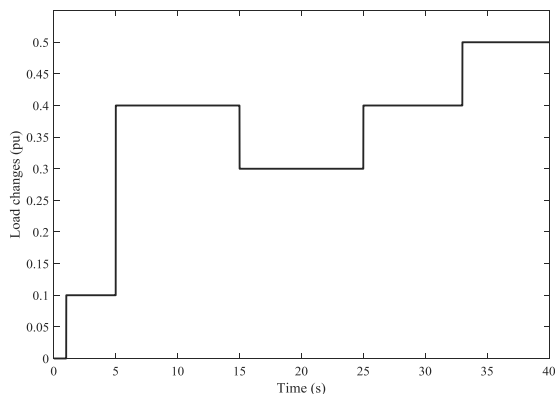
نواحی ۱ و ۲ و نیز انحراف توان بین ناحیه‌ای را در این حالت نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌گردد با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی نوسانات انحراف فرکانس و نیز انحراف توان بین ناحیه‌ای نسبت به کنترل‌کننده FOPID بهینه‌شده کاهش یافته است. همچنین ماکزیمم انحراف فرکانس در نواحی ۱ و ۲ با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی به ترتیب برابر با 0.0118 و 0.0131 - هرتز بوده در حالی که با استفاده از کنترل‌کننده FOPID ماکزیمم انحراف فرکانسی در نواحی ۱ و ۲ به ترتیب 0.0147 و 0.0149 - هرتز می‌باشد که نشان دهنده کاهش 20% در ناحیه اول و 12% در ناحیه دوم با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی می‌باشد. ماکزیمم انحراف توان بین ناحیه‌ای نیز با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده FOPID کاهش یافته است به گونه‌ای که با بکارگیری کنترل‌کننده FOPID ماکزیمم انحراف توان بین ناحیه‌ای برابر با 0.1835 - پر یونیت می‌باشد در حالی که با کنترل‌کننده پیشنهادی به 0.176 - کاهش می‌یابد.



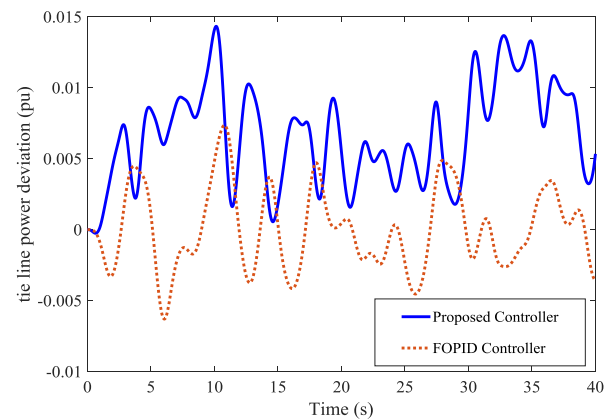
شکل (۱۰): انحراف فرکانسی ناحیه اول در مطالعه موردی اول



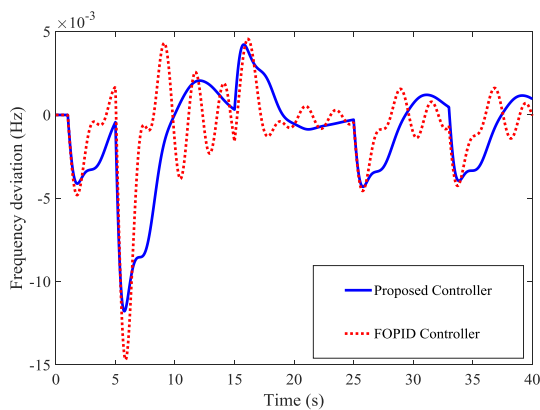
شکل (۱۱): انحراف فرکانسی ناحیه دوم در مطالعه موردی اول



شکل (۱۳): تغییرات بار ناحیه اول



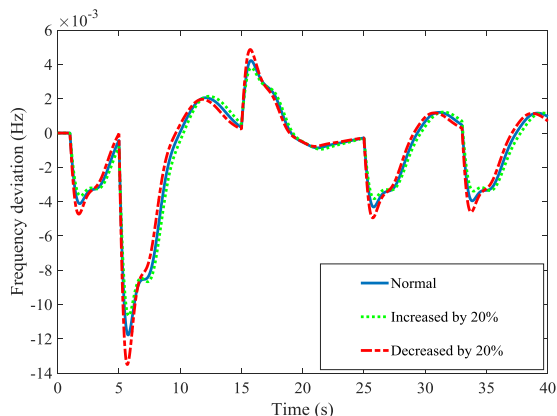
شکل (۱۲): انحراف توان بین ناحیه‌ای در مطالعه موردی اول



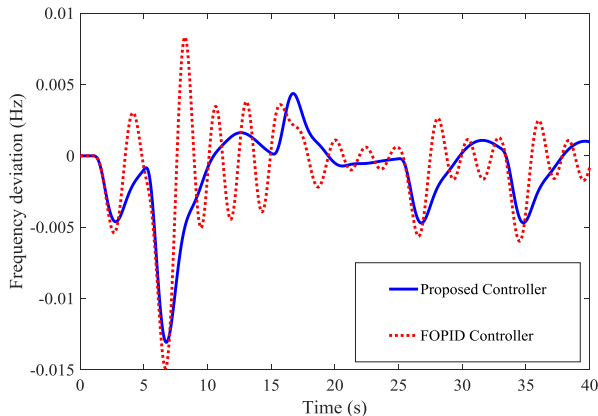
شکل (۱۴): انحراف فرکانسی ناحیه اول در مطالعه موردی دوم

۵.۲. مطالعه موردی دوم: شبیه‌سازی با اعمال بار متغیر

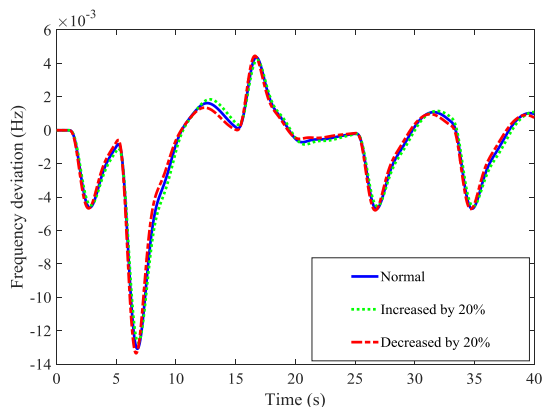
در این بخش تغییر باری به صورت شکل (۱۳) در نظر گرفته شده و این بار به ناحیه اول اعمال می‌شود. در این مطالعه تغییرات بار ناحیه دوم در مدت زمان شبیه‌سازی صفر در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۴) تا (۱۵) انحراف فرکانس در



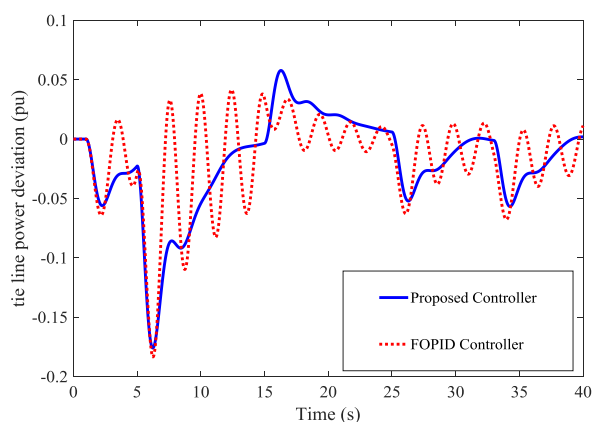
شکل (۱۷): انحراف فرکانسی ناحیه اول در مطالعه موردی سوم با تغییر پارامترهای سیستم



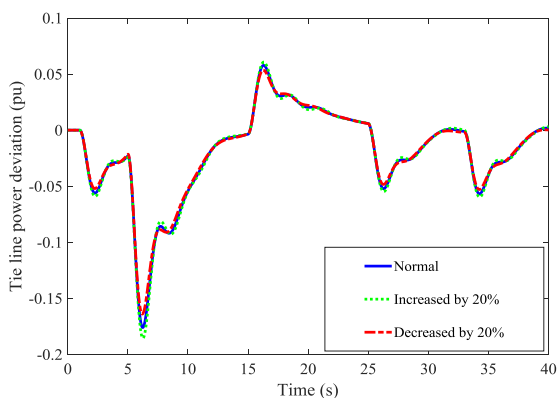
شکل (۱۵): انحراف فرکانسی ناحیه دوم در مطالعه موردی دوم



شکل (۱۸): انحراف فرکانسی ناحیه دوم در مطالعه موردی سوم با تغییر پارامترهای سیستم



شکل (۱۶): انحراف توان بین ناحیه‌ای در مطالعه موردی دوم



شکل (۱۹): انحراف توان بین ناحیه‌ای در مطالعه موردی سوم با تغییر پارامترهای سیستم

۵.۳. مطالعه موردی سوم: شبیه‌سازی با تغییر پارامترهای

سیستم

در این بخش به منظور بررسی میزان مقاومت کنترل کننده پیشنهادی در برابر عدم قطعیت‌های موجود در سیستم، عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با تغییر پارامترهای سیستم شامل M ، D و تحت بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور شبیه‌سازی‌ها با تغییرات ۲۰٪ افزایش و کاهش در پارامترهای مذکور انجام شده است. لازم بذکر است که بارهای سیستم در این مطالعه همانند مطالعه دوم در نظر گرفته شده است. انحراف فرکانس نواحی ۱ و ۲ و انحراف توان بین ناحیه‌ای به ازای حالات عادی، افزایش ۲۰٪ و کاهش ۲۰٪ در پارامترهای سیستم به ترتیب در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده است مقاومت کنترل کننده در برابر تغییرات سیستم مطلوب می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور کنترل فرکانس بار از کنترل کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده استفاده شد. در ابتدا قوانین

جدول ب: برخی از پارامترهای سیستم و الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری	
مقدار	پارامتر
100	تعداد جمعیت
100	ماکزیمم تعداد دهه ها
2	β
0.1	ξ

جدول ج: پارامترهای کنترل کننده‌ها

	Fuzzy-PID (1)	Fuzzy-PID (2)	FOPID (1)	FOPID (2)
A	-0.6868	-0.6868	-	-
B	-0.4	-0.4	-	-
C	0.3158	0.3158	-	-
D	0.5477	0.5477	-	-
E	-0.5081	-0.5081	-	-
F	-.3387	-.3387	-	-
G	0.3236	0.3236	-	-
H	0.4273	0.4273	-	-
K_p	1	-0.3645	-0.3331	-0.4473
K_d	-0.592	-0.6294	0.6733	-1
K_i	0.2879	-0.7529	-0.5385	-0.4743
δ	-	-	0.0472	0
λ	-	-	0.9001	-0.9064
β	-0.2318	-0.8353	-	-
Fitness function value	2.3784		3.3460	

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافی ندارند.

فازی برای بخش فازی این کنترل کننده به گونه‌ای تعیین شدند تا خطای کنترل ناحیه‌ای به ازای تغییرات بار کاهش یابد. سپس با استفاده از بهینه‌سازی و با بکارگیری الگوریتم رقابت استعماری پارامترهای این کنترل کننده به منظور کنترل فرکانس بار سیستم بهینه گشتند. به منظور ارزیابی کنترل کننده پیشنهادی، یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی‌های با حضور منابع انرژی بادی و بارهای متغیر صورت پذیرفت. به منظور مقایسه، شبیه‌سازی‌ها با کنترل کننده FOPID بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری نیز انجام گشت. نتایج شبیه‌سازی‌ها عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی در برابر کنترل کننده FOPID را نشان دادند. همچنین به منظور بررسی میزان مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی در برابر عدم قطعیت‌های سیستم، برخی از پارامترهای سیستم ۲۰٪ افزایش و کاهش داده شده و نتایج با حالت عادی سیستم مقایسه گشت که نتایج حاصل از آن عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی را نشان دادند.

ضمائم

جدول الف: برخی از پارامترهای سیستم و الگوریتم رقابت استعماری

سیستم	
مقدار	پارامتر
1	D
10	M
0.1	T_g
0.3	T_{ch1}
0.3	T_{ch2}
0.3	F_{hp}
7	T_{rh}
22.6	$2 * \pi * T_{12}$
0.05	R

مراجع

- [1] Taher S.A., HajiakbariFini M., Falahati Aliabadi S., "Fractional order PID controller design for LFC in electric power systems using imperialist competitive", Ain Shams Engineering Journal, 5:121-135, 2014.
- [2] Bevrani H., Robust Power System Frequency Control. Second Edition, Springer, 2013.
- [3] Yazdizadeh A., Ramezani M.H., Hamedrahmat E., "Decentralized load frequency control using a new robust optimal MISO PID controller", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 35(1):57-65, 2012.
- [4] Saxena S., Hote Y. V., "Decentralized PID load frequency control for perturbed multi-area power systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 81:405-415, 2016.

- [5] Hanwate S. D., Hote Y.V., "Optimal PID design for Load frequency control using QRAWCP approach", IFAC-PapersOnLine, 51(4):651-656, 2018.
- [6] Anwar M. N., Pan S., "A new PID load frequency controller design method in frequency domain through direct synthesis approach", International Journal of electrical Power and Energy Systems, 67:560-569, 2015.
- [7] Padhan DG., Majhi S., "A new control scheme for PID load frequency controller of single-area and multi-area power systems", ISA Trans, 52:242-251, 2013.
- [8] Singh V.P., Kishor N., Samuel P., "Improved load frequency control of power system using LMI based PID approach", Journal of the Franklin Institute, 354(15):6805-6830, 2017.
- [۹] طاهر س.ع.، زراعتی م.، «بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PID برای کنترل فرکانس بار با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری»، مجله محاسبات نرم، جلد ۱، شماره ۲، ص ۶۰-۷۳، ۱۳۹۱.
- [10] M. Karimi-Ghartemani, M. Zamani, N. Sadati, M. Parniani, "An optimal fractional order controller for an avr system using particle swarm optimization algorithm", Power Engineering, 2007 Large Engineering Systems Conference on, pp. 244- 247, 2007.
- [11] Jain Sh., Hote Y.V., "Design of fractional PID for Load frequency control via Internal model control and Big bang Big crunch optimization", IFAC-PapersOnLine, 51(4):610-615, 2018.
- [12] Zamani A., Barakati S. M., Yousofi-Darmian S., "Design of a fractional order PID controller using GBMO algorithm for load-frequency control with governor saturation consideration", ISA Transactions, 64:56-66, 2016.
- [13] Sondhi S., Hote Y.V., "Fractional order PID controller for perturbed load frequency control using Kharitonov's theorem", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 78:884-896, 2016.
- [14] Jalali N., Razmi H., Doagou-Mojarrad H., "Optimized fuzzy self-tuning PID controller design based on Tribe-DE optimization algorithm and rule weight adjustment method for load frequency control of interconnected multi-area power", Applied Soft Computing, 93:1-19, 2020.
- [15] Sahoo B.P., Panda S., "Improved grey wolf optimization technique for fuzzy aided PID controller design for power system frequency control", Sustainable Energy, Grids and Networks, 16:278-299, 2018.
- [16] Woo Z., Chung Z., Lin J., "A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors" Fuzzy Sets and Systems, 115:321-326, 2000.
- [17] Falahati S., Taher S.A., "Design of Fuzzy-FOPID controller optimized by ICA for control of AVR", Majlesi Journal of Electrical Engineering, 11(4):27-35, 2017.
- [18] Karami A., Rezaei E., Shahhosseini M., Aghakhani M., "Optimization of heat transfer in an air cooler equipped with classic twisted tape inserts using imperialist competitive algorithm", Experimental Thermal and Fluid Science, 38:195-200, 2012.
- [19] Kaveh A., Talatahari S., "Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm" Computers & Structures, 88(21-22):1220-1229, 2010.
- [20] Nazari-Shirkouhi S., Eivazy H., Ghodsi R., Rezaei K., Atashpaz-Gargari E., "Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the imperialist competitive algorithm", Expert Systems with Applications, 37(12):7615-7626, 2010.
- [۲۱] حلوائی‌نیاسر ا.، فلاحتی علی‌آبادی ص.، «کنترل مبدل BLDC با استفاده از کنترل‌کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری»، مجله محاسبات نرم، جلد ۲، شماره ۱، ص ۲-۱۱، ۱۳۹۲.
- [22] Atashpaz-Gargari E., Lucas C., "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 4661-4667, 2007.