

## بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PID برای کنترل فرکانس بار با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

سید عباس طاهر\*<sup>۱</sup>، مهدی زراعتی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

sataher@kashanu.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

zeraatimahdi@gmail.com

**چکیده:** در این مقاله، با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) و با بهره‌گیری از معیار انتگرال زمان - قدرمطلق خطا (ITAE) به تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده PID فرکانس بار در سیستم‌های قدرت دو ناحیه‌ای با در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای سیستم قدرت پرداخته شده است. برای دست یافتن به عملکرد مقاوم مطلوب، در نظر گرفتن تابع هدف مناسب مهم است، به طوری که نتایج نشان می‌دهد با بهره‌گیری از معیار ITAE که با وجود انحراف فرکانس و خطای کنترل ناحیه (ACE) است، پارامترهای کنترل بهینه برای سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری که دقت و سرعت همگرایی بالایی دارد، به سهولت به دست می‌آیند. کارآیی روش پیشنهادی بر روی یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای تحت اغتشاش‌های بار ناحیه‌ای نشان داده شده است. با بررسی و ارزیابی نتایج مشاهده می‌شود که روش بهینه‌سازی پیشنهادی در محدوده وسیعی از تغییر پارامترهای سیستم و تغییرات بار، عملکرد مقاوم خوبی را دارند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم رقابت استعماری، کنترل فرکانس بار (LFC)، کنترل‌کننده PID، تنظیم بهینه پارامترها.

## ۱. مقدمه

با افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی، پیچیدگی سیستم‌های قدرت الکتریکی بیشتر می‌شود؛ بنابراین تأمین انرژی الکتریکی با پایداری و قابلیت اطمینان بالا لازم است. برای داشتن عملکرد موفق سیستم قدرت تحت شرایط غیرعادی، عدم تطابق‌ها بایستی توسط کنترل مکمل تصحیح شوند. کنترل اتوماتیک تولید<sup>۱</sup> (AGC) یا کنترل فرکانس بار<sup>۲</sup> (LFC)، مسئله‌ای بسیار مهم در عملکرد و کنترل سیستم قدرت برای تأمین انرژی کافی و قابل اطمینان با کیفیت مناسب است [۱-۳].

در سیستم‌های قدرت در مقیاس بزرگ، که معمولاً شامل نواحی کنترل مرتبط با هم می‌باشند، کنترل فرکانس بار برای نگه داشتن فرکانس سیستم و توان انتقالی بین نواحی نزدیک به مقادیر برنامه‌ریزی شده تا جایی که امکان دارد، دارای اهمیت است. توان مکانیکی ورودی به ژنراتورها برای کنترل فرکانس توان الکتریکی خروجی و نگه داشتن توان انتقالی بین نواحی در مقدار برنامه‌ریزی شده استفاده می‌شود. یک سیستم قدرت که به خوبی طراحی شده باشد، باید بتواند در مقابل تغییرات بار و اغتشاشات سیستم به خوبی عمل کند و سطح بالایی از کیفیت توان قابل انتظار را هم‌زمان با نگه داشتن فرکانس در محدوده قابل قبول فراهم آورد [۴].

مسئله تنظیم اتوماتیک فرکانس و توان عبوری از خطوط ارتباطی در سیستم‌های قدرت، سابقه طولانی دارد. تعداد زیادی استراتژی کنترل که غالباً در ارتباط استفاده از الگوریتم‌های هوشمند است، اخیراً در طراحی کنترل‌کننده‌های فرکانس بار مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵-۱۰]. در بین انواع مختلف کنترل‌کننده‌های فرکانس بار، کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی (PI) مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱۱]. کنترل‌کننده‌های PI برای پیاده‌سازی ساده‌اند، ولی می‌تواند سبب ایجاد نوسانات با دامنه زیاد در فرکانس گردد. کاربردی از یک کنترل‌کننده تناسبی و انتگرالی که بهره‌های آن توسط روش فازی تنظیم می‌شوند، (FGPI) برای LFC یک سیستم قدرت مرتبط دو ناحیه‌ای در

[۱۲] آمده است. در [۱۳] پارامترهای کنترل‌کننده‌های PI و I بر اساس روش الگوریتم بهینه‌سازی HPSO برای کنترل LFC در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ارائه شده است. کاربرد GA برای بهینه‌سازی بهره‌های کنترل‌کننده PI برای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با واحدهای حرارتی در [۱۴] بررسی شده است. در مرجع [۱۵] یک روش طراحی کنترل‌کننده LFC سیستم قدرت غیرمتمرکز مقاوم با استفاده از مقادیر تکین ساختاریافته معرفی شده است. همچنین در [۱۶] کنترل‌کننده LFC غیرمتمرکز مقاوم به کار گرفته شده است که طراحی آن براساس تئوری  $H_\infty$  بوده و در نتیجه یک کنترل‌کننده مرتبه بالا به دست آمده است. یک طرح کنترلی تطبیقی غیرمتمرکز برای LFC سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای برای مقابله با تغییرات پارامترهای سیستم در [۱۷] معرفی شده است. در بعضی از مراجع مانند [۱۸] به طراحی کنترل‌کننده PID برای LFC با استفاده از PSO پرداخته شده است، به طوری که یک روش جدید طراحی پارامترهای کنترل‌کننده PID برای AGC سیستم‌های قدرت با توربین آبی در [۱۹-۲۰] ارائه شده است. این روش بر اساس مشخصات ماکزیمم پیک رزونانس است که توسط دیاگرام نیکولز تعیین می‌شود.

اخیراً استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در مسائل بهینه‌سازی، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. یکی از این روش‌های مناسب و نسبتاً جدید، الگوریتم رقابت استعماری می‌باشد که کارایی آن در مقالات مختلف نشان داده شده است. در مرجع [۲۱] عملکرد این الگوریتم در مسائل مینیمم‌سازی متفاوت و بر روی توابع متعدد بررسی شده است.

در این مقاله، از این الگوریتم برای طراحی یک کنترل‌کننده PID جهت LFC در یک سیستم چند ماشینه استفاده شده است، به طوری که می‌تواند به عنوان یک روش تنظیم جدید و مناسب برای تعیین بهینه پارامترهای کنترل‌کننده مورد استفاده واقع شود. نتایج مقایسه‌ای برای کنترل‌کننده‌های PI و PID و همچنین با بهره‌گیری از الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که کنترل‌کننده بهینه طراحی شده با استفاده از الگوریتم ICA در مقایسه با

کنترل‌کننده I می‌باشد، با وجود این، در سیستم قدرت برای طراحی LFC با نام کنترل‌کننده PI شناخته می‌شود. این کنترل‌کننده برای یک سیستم تک‌ماشینه و چند ماشینه، به ترتیب در شکل (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده است. بهره کنترل‌کننده I بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که شکل مناسبی از پاسخ گذرای سیستم به دست آید. اگرچه تکنیک‌های مختلفی، اغلب بر اساس روش‌های سعی و خطا برای تعیین بهره  $K_I$  معرفی شده‌اند، هیچ ضمانتی برای داشتن بهترین پاسخ، مخصوصاً وقتی که پارامترهای سیستم تغییر می‌کند، وجود ندارد. برای سیستم‌های چند ماشینه،  $B_i$  ثابت بایاس فرکانس است که بایستی به اندازه کافی بزرگ باشد به گونه‌ای که هر ناحیه به اندازه کافی در کنترل فرکانس شرکت کند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، انتخاب  $K_I$  و  $B_i$  نمی‌تواند مقاومت کنترل‌کننده و عملکرد دینامیک مناسب را تضمین کند.

روش GA دارای عملکرد بهتری است. در ضمن کنترل‌کننده مورد استفاده مقاوم است و عملکرد آن وقتی پارامترهای سیستم تغییر می‌کند، رضایت‌بخش می‌باشد.

## ۲. مدل سیستم تحت مطالعه

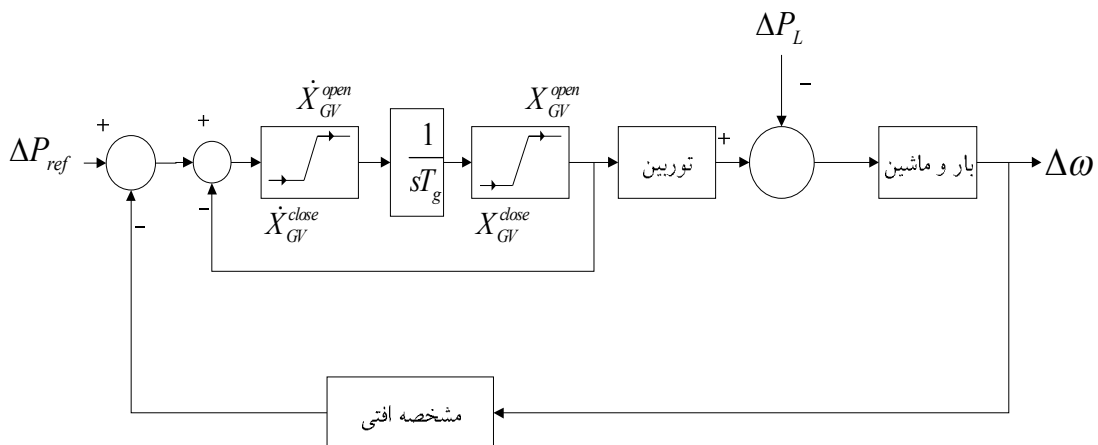
مدل خطی سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت (SMIB) در شکل (۱) نشان داده شده است که توابع تبدیل بلوک‌های آن به شرح زیر می‌باشد [۱۹-۲۰]:

$$\frac{1}{1+T_T S} = \text{توربین بخار}$$

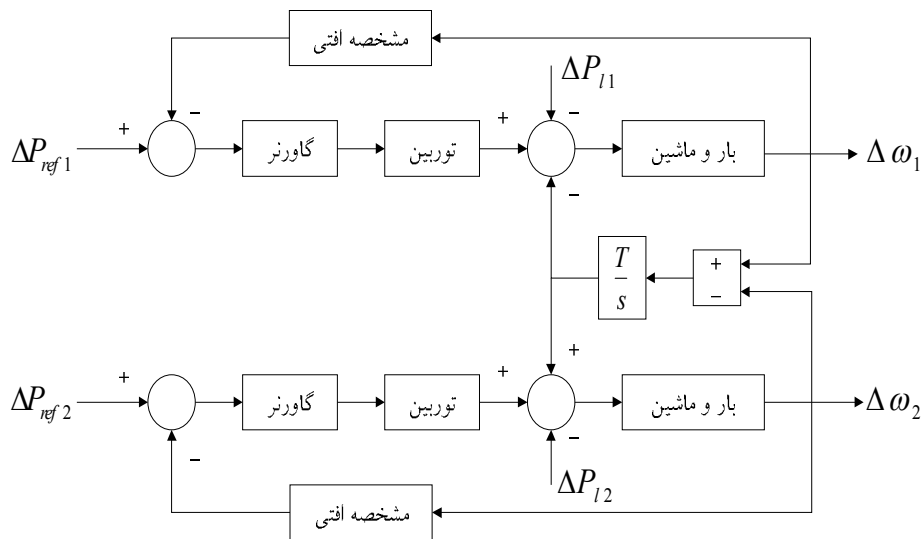
$$\frac{1}{2HS + D} = \text{بار و ماشين}$$

$$\frac{1}{R} = \text{مشخصه افتی گاورنر}$$

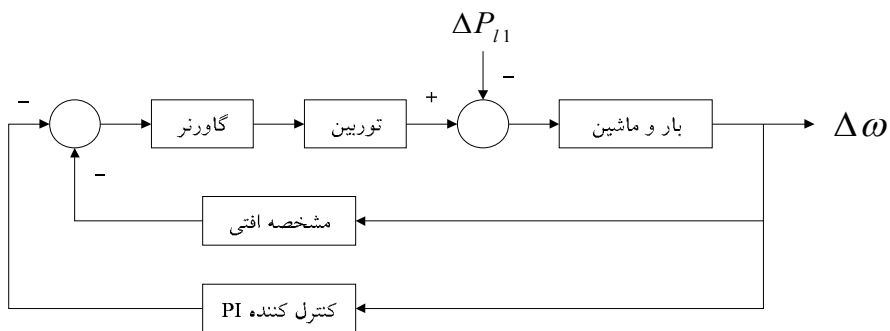
بلوک دیاگرام خطی سیستم چند ماشینه با در نظر گرفتن اثر توان خط ارتباطی در شکل (۲) نشان داده شده است. به منظور نگه داشتن دائمی فرکانس سیستم در مقدار نامی خود یک عمل کنترلی مکمل نظیر یک کنترل‌کننده به فرم  $K_I/S$  معمولاً مورد نیاز است. این کنترل‌کننده در واقع یک



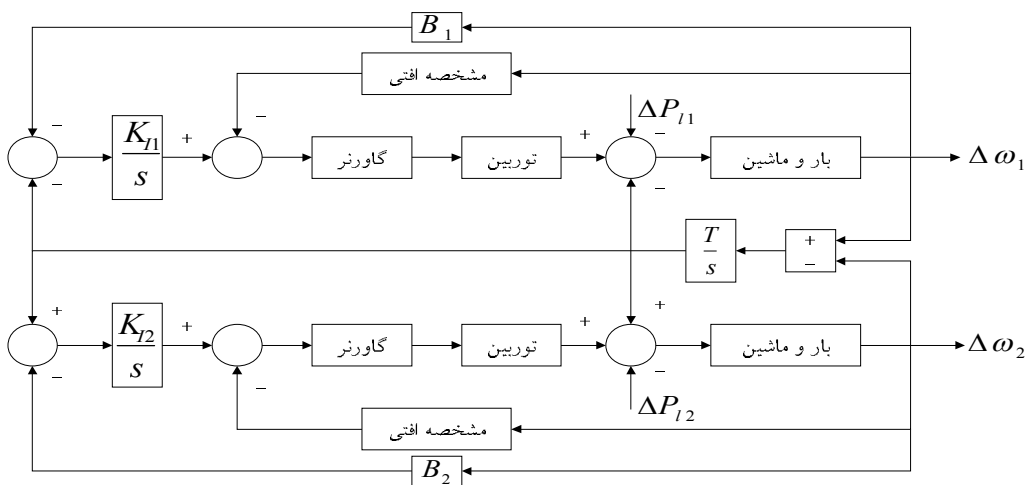
شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم شامل توربین، گاورنر، بار و ماشين



شکل (۲): بلوک دیاگرام سیستم دو ناحیه‌ای شامل توربین، گاورنر، بار و ماشین



(الف)



(ب)

شکل (۳): (الف) بلوک دیاگرام یک سیستم SMIB با کنترل کننده PI. (ب) بلوک دیاگرام سیستم چند ماشینه با کنترل کننده PI

### ۳. الگوریتم رقابت استعماری

همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک «کشور» نامیده می‌شوند، شروع می‌شود [۲۱-۲۷]. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان امپریالیست انتخاب می‌شوند. باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند.

استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص که در ادامه می‌آید، به سمت خود می‌کشند در ادامه به شرح مراحل الگوریتم رقابت استعماری پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱. شکل دهی امپراطوری‌های اولیه

در بهینه‌سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه بر حسب متغیرهای مسئله است، لذا یک آرایه از متغیرهای مسئله که باید بهینه شوند، ایجاد می‌گردد که کشور نامیده می‌شود. در یک مسئله بهینه‌سازی  $N_{var}$  بعدی، یک کشور، یک آرایه به طول  $N_{var} * 1$  است. این آرایه به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱-۲۷]:

$$\text{country} = [p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}}] \quad (1)$$

برای شروع الگوریتم، تعداد  $N_{country}$  کشور اولیه را ایجاد نموده و  $N_{imp}$  از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان امپریالیست انتخاب خواهند شد. باقیمانده  $N_{colony}$  تا از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند.

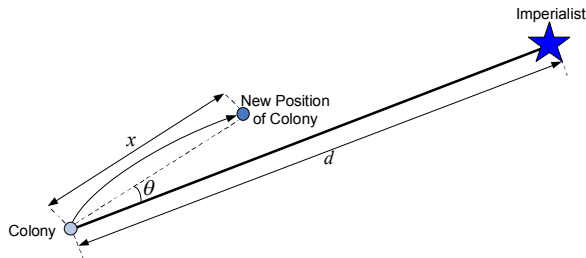
#### ۳-۲. سیاست جذب (حرکت مستعمره‌ها به سمت امپریالیست)

سیاست همگون‌سازی (جذب) با هدف تحلیل فرهنگ و ساختار اجتماعی مستعمرات در فرهنگ حکومت مرکزی انجام می‌گیرد. روند این مرحله در شکل (۴) نشان داده شده است. در راستای این سیاست، کشور مستعمره (Colony)، به اندازه  $x$  واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر (Imperialist)، حرکت کرده و به موقعیت جدید (New Position of Colony)، کشانده می‌شود.  $x$  عددی تصادفی با توزیع یکنواخت (و یا هر توزیع مناسب دیگر) است. اگر فاصله میان استعمارگر و

مستعمره با  $d$  نشان داده شود، معمولاً برای  $d$  داریم [۲۱-۲۷]:

$$x \sim U(0, \beta * d) \quad (2)$$

که در آن،  $\beta$  عددی بزرگ‌تر از یک و نزدیک به ۲ می‌باشد. یک انتخاب مناسب می‌تواند  $\beta = 2$  باشد.



شکل (۴): حرکت مستعمرات به سمت امپریالیست (سیاست جذب)

#### ۳-۳. انقلاب (تغییرات ناگهانی در موقعیت یک کشور)

در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابجایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود کلیت حرکت تکاملی از گیر کردن یا توقف در دره‌های محلی بهینه نجات یابد [۲۱-۲۷].

#### ۳-۴. جابجایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند. در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با همدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار این کشور امپریالیست جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند [۲۱-۲۷].

#### ۳-۵. رقابت استعماری

قدرت یک امپراطوری به صورت قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن تعریف می‌شود. به مرور زمان، امپراطوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست داده و امپراطوری‌های قوی‌تر، این مستعمرات را

که در آن،  $\Delta\omega_1$  و  $\Delta\omega_2$  به ترتیب تغییرات فرکانس نواحی اول و دوم است و  $\Delta P_{ie}$  تغییر توان مربوط به خط ارتباطی می باشد. برای اطمینان از عملکرد مطلوب سیستم در مقابل تغییر پارامترهای سیستم قدرت، ITAE در سه نقطه کار مجزا در نظر گرفته شده و با یکدیگر ترکیب شده اند.  $OP_1$  بیانگر نقطه کار اول می باشد که پارامترهای سیستم در مقادیر نامی تنظیم شده اند. به همین ترتیب،  $OP_2$  و  $OP_3$  نشان دهنده نقاط کار مربوط به تنظیم پارامترهای سیستم قدرت در ۸۰٪ و ۱۲۰٪ مقدار نامی می باشند.

روند محاسبه ضرایب کنترل کننده ها با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری در فلوچارت شکل (۵) نشان داده شده است. در ضمن برای مقایسه، ضرایب مذکور از طریق به کارگیری الگوریتم ژنتیک نیز محاسبه شده اند که نتایج به دست آمده به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آمده اند. لازم است یادآوری شود تعداد تکرار هر دو الگوریتم در مقدار ۵۰ تنظیم شده و زمان شبیه سازی ( $T_s$ ) نیز، ۴۰ ثانیه مد نظر قرار گرفته است. مقدار تابع هدف پس از به دست آمدن جواب ها در جدول ها آورده شده اند. تنظیمات و مقادیر متغیرهای مورد استفاده در الگوریتم ها در ضمیمه (الف) و در جدول های (الف-۱) و (الف-۲) داده شده اند.

با مشاهده مقادیر تابع هدف مشخص می شود الگوریتم رقابت استعماری، نتیجه بسیار بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک داشته و در عین حال عملکرد کنترل کننده PID نسبت به کنترل کننده PI بسیار مطلوب تر است. همچنین به منظور مقایسه دقت و سرعت همگرایی دو الگوریتم، منحنی شاخص عملکرد به دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است. در ادامه، به بررسی نتایج شبیه سازی که با استفاده از نرم افزار Matlab/Simulink انجام گرفته، پرداخته می شود.

تصاحب کرده و بر قدرت خویش می افزایند. بدین ترتیب، در تکرار الگوریتم، یکی یا چند مورد از ضعیف ترین مستعمرات ضعیف ترین امپراطوری برداشته شده و برای تصاحب این مستعمرات، رقابتی را میان کلیه امپراطوری ها ایجاد می گردد [۲۱-۲۷].

### ۳-۶. سقوط امپراطوری های ضعیف

در جریان رقابت های امپریالیستی، خواه یا ناخواه امپراطوری های ضعیف به تدریج سقوط کرده و مستعمراتشان به دست امپراطوری های قوی تر می افتد. شروط متفاوتی را می توان برای سقوط یک امپراطوری در نظر گرفت. بعد از این مرحله، شرط توقف الگوریتم بررسی شده و در صورتی که این شرط برآورده نشود، الگوریتم به تکرار بعد می رود [۲۱-۲۷].

### ۴. طراحی کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم

#### رقابت استعماری

کنترل کننده های تناسبی انتگرالی (PI) و تناسبی انتگرالی مشتق گیر (PID) به طور گسترده ای در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند [۲]. سادگی و توانایی این کنترل کننده ها از مهم ترین مزایای آنها هستند که روش های بسیاری در مراجع برای به دست آوردن پارامترهای آنها ارائه شده است. در این مقاله با بهره گرفتن از معیار انتگرال زمان-قدر مطلق خطا (ITAE) و استفاده از الگوریتم رقابت استعماری به حداقل نمودن تابع هدف پرداخته شده و سپس مقادیر بهره های کنترل کننده های PI و PID تعیین می شوند. تابع هدف مورد استفاده در این بهینه سازی به صورت زیر تعریف شده است:

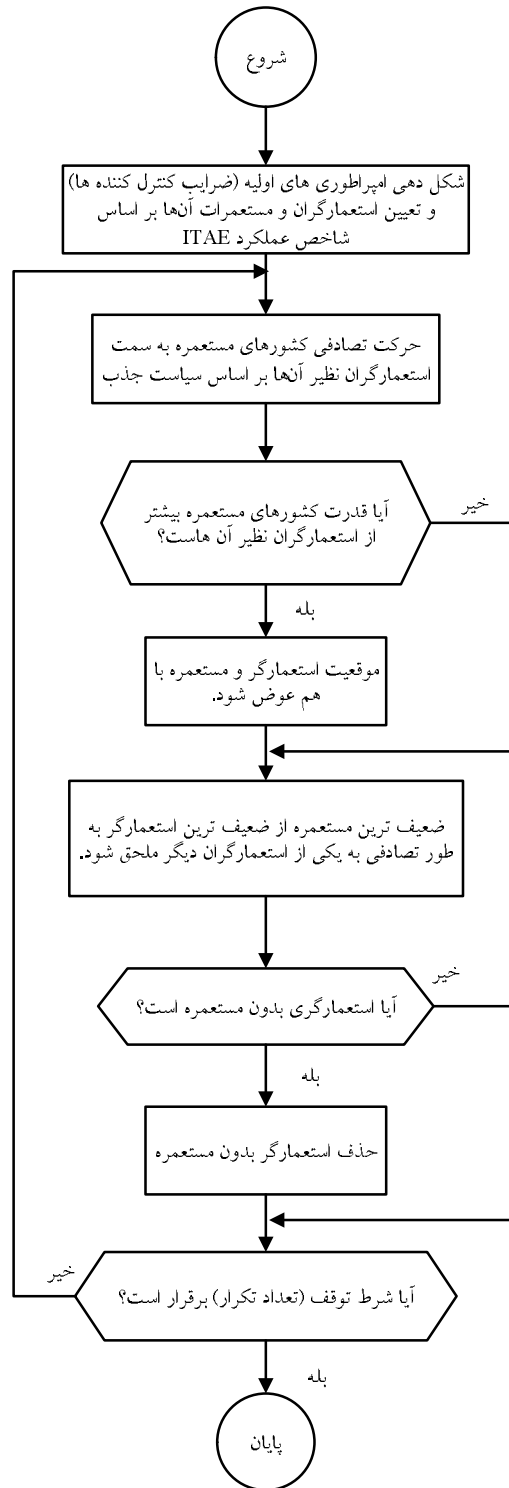
$$ObjectiveFunction = OF = \int_0^{T_s} t (|\Delta\omega_1| + |\Delta\omega_2| + |\Delta P_{ie}|) |_{OP1} + \int_0^{T_s} t (|\Delta\omega_1| + |\Delta\omega_2| + |\Delta P_{ie}|) |_{OP2} + \int_0^{T_s} t (|\Delta\omega_1| + |\Delta\omega_2| + |\Delta P_{ie}|) |_{OP3} \quad (3)$$

جدول (۱): نتایج بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

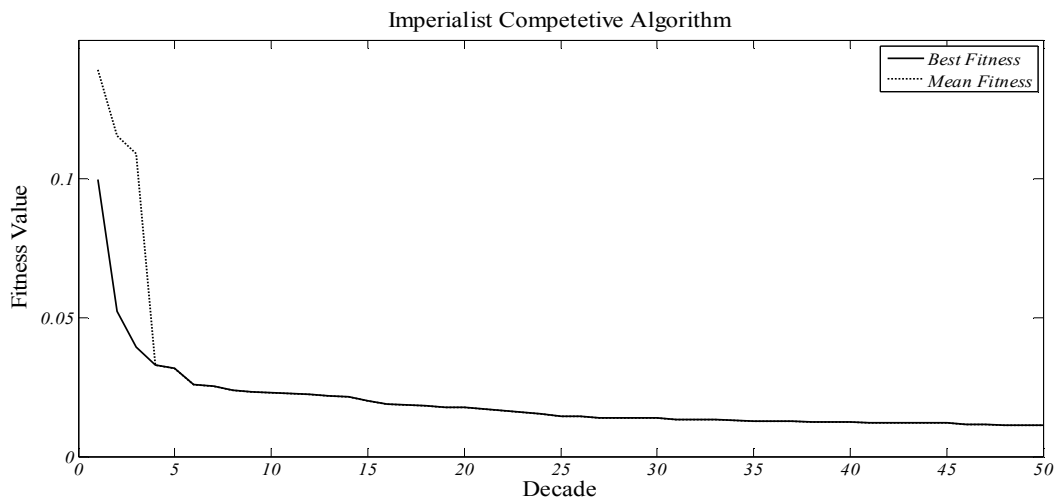
پارامترهای کنترل‌کننده PID	ناحیه ۱		ناحیه ۲		پارامتر کنترل‌کننده PI	ناحیه ۱		ناحیه ۲	
	P	I	D	Fitness		P	I	D	Fitness
P	۱۴۶/۲۳۹۴	۵/۴۸۴۱			I	۰/۵۲۰۲	۰/۰۲۳۲		
I	۱۹۷/۷۰۸۳	۵/۲۲۰۴							
D	۷۱/۳۸۱	۲۸/۷۴۴۸							
Fitness	۰/۰۱۱۲				Fitness	۰/۷۹۳۵			

جدول (۲): نتایج بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم ژنتیک

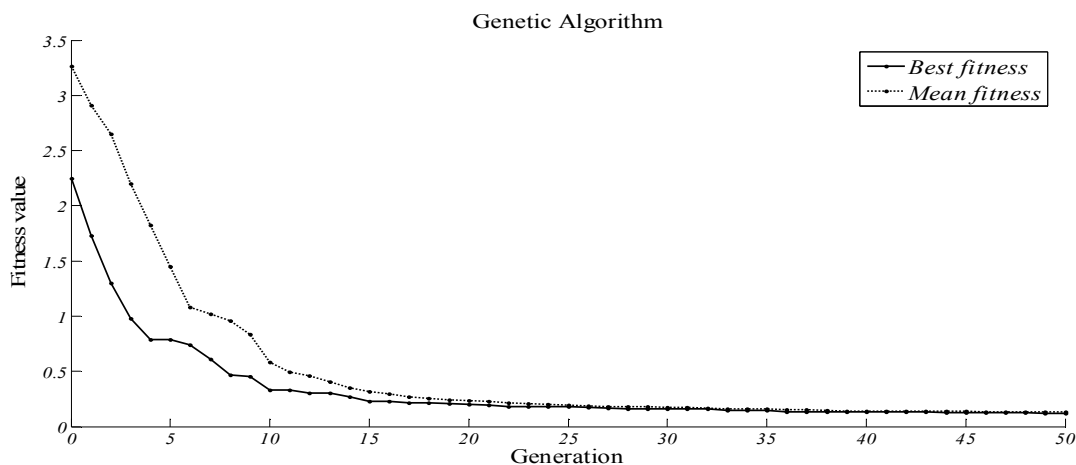
پارامترهای کنترل‌کننده PID	ناحیه ۱		ناحیه ۲		پارامترهای کنترل‌کننده PI	ناحیه ۱		ناحیه ۲	
	P	I	D	Fitness		P	I	D	Fitness
P	۰/۱۲۸	-۱/۰۲۸			I	۰/۵۲۸	۰/۱۸۴		
I	۹/۲۰۷	۴/۸۳۷							
D	۲/۸۸۹	۲/۳۹							
Fitness	۰/۱۸۸۶				Fitness	۰/۸۵۷۴			



شکل (۵): فلوچارت ICA برای تعیین ضرایب بهینه کنترل‌کننده‌ها



(الف)



(ب)

شکل (۶): منحنی شاخص عملکرد با استفاده از: الف) الگوریتم رقابت استعماری؛ ب) الگوریتم ژنتیک

## ۵. نتایج شبیه‌سازی

دو کنترل‌کننده PI و PID با پارامترهای به دست آمده در بخش قبل که به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده است، انجام می‌شود.

شکل (۸) تغییرات فرکانس نواحی را که ناشی از یک تغییر پله‌ای در بار سیستم قدرت ناحیه اول است، نشان می‌دهد ( $\Delta P_{L1} = 0.02 pu$ ). نوسانات توان خط ارتباطی نیز در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تغییر فرکانس هر دو ناحیه با استفاده از کنترل‌کننده PID با زمان

مطالعات شبیه‌سازی برای یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با کنترل‌کننده PI نشان داده شده در شکل (۳) و همچنین کنترل‌کننده PID نشان داده شده در شکل (۷) انجام شده است. سیستم شامل محدودکننده‌های نرخ افزایش شیب و اشباع بهره در سیستم‌های قدرت می‌باشند. مشخصات ماشین‌های دو ناحیه در ضمیمه (ب) آمده است. برای مقایسه، شبیه‌سازی‌ها برای هر

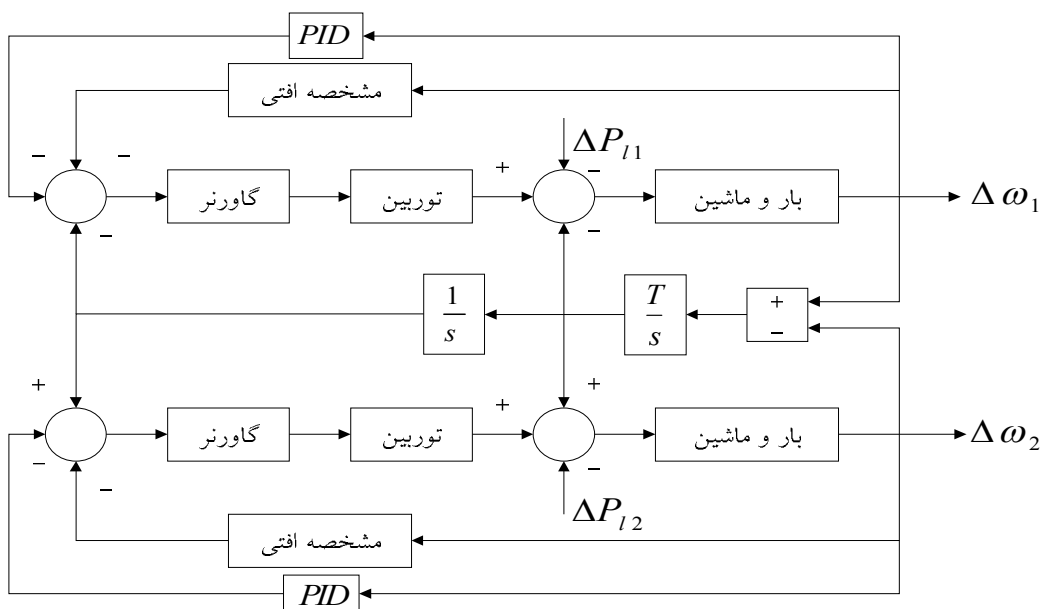


بالا به سیستم اعمال شده که در شکل (۱۱) نتایج حاصل آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به ازای تغییرات  $\pm 20\%$  پارامترهای سیستم، عملکرد مقاوم و مطلوب سیستم در بازه مناسبی می‌باشد.

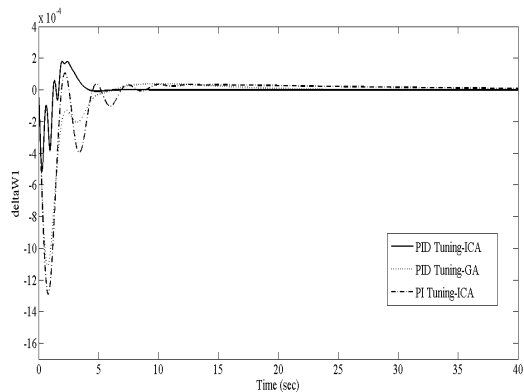
عملکرد سیستم همچنین برای وقتی که تغییرات پله‌ای به اندازه  $(\Delta P_{L1} = 0.02 pu)$  و  $(\Delta P_{L2} = -0.02 pu)$  به ترتیب در بارهای دو ناحیه به وجود آمده‌اند، مورد آزمایش قرار گرفته است، به گونه‌ای که در زمان  $t = 0$   $\Delta P_{L1}$  و در  $t = 10 sec$   $\Delta P_{L2}$  به سیستم اعمال شده است. نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۱۲) به نمایش درآمده است. در این مورد نیز، بهبود قابل توجهی در زمان نشست و درصد فراجش در مقایسه با مرجع [۲۸] قابل مشاهده است. نتایج به دست آمده مؤید عملکرد مقاوم و مطلوب سیستم در هنگام وجود عدم قطعیت پارامترهای سیستم قدرت در بازه مناسبی می‌باشد.

نشست کمتری نسبت به کنترل‌کننده PI میرا می‌شود، ضمن اینکه کنترل‌کننده PID تنظیم‌شده با الگوریتم رقابت استمراری در مقایسه با کنترل‌کننده PID تنظیم‌شده با الگوریتم ژنتیک رفتار مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهد. در ضمن کنترل‌کننده بهینه طراحی شده در این مطالعه در مقایسه با طرح پیشنهادی در [۲۸] دارای زمان نشست و درصد فراجش کمتری است، به طوری که حدوداً ۱۸٪ این دو شاخص کاهش یافته است.

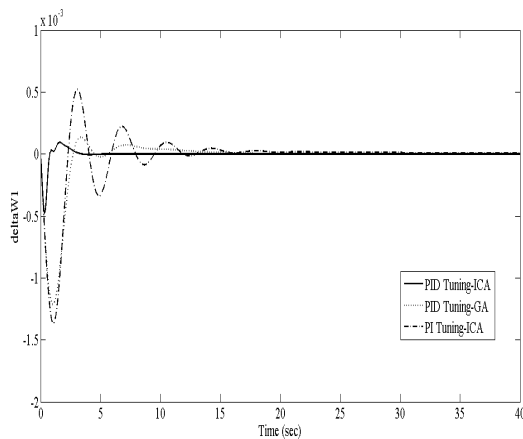
برای بررسی عملکرد مقاوم سیستم تحت شرایط تغییر پارامترهای سیستم قدرت، شبیه‌سازی‌ها در دو حالت دیگر صورت گرفته است. ابتدا با کاهش مقادیر پارامترهای سیستم قدرت به میزان ۸۰٪ مقدار نامی و اعمال تغییر پله‌ای  $(\Delta P_{L1} = 0.02 pu)$ ، نوسان فرکانس دو ناحیه و نیز توان خط ارتباطی نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. در حالت بعدی مقادیر پارامترها در ۱۲۰٪ مقدار نامی تنظیم شده و تغییرات بار مانند شرایط



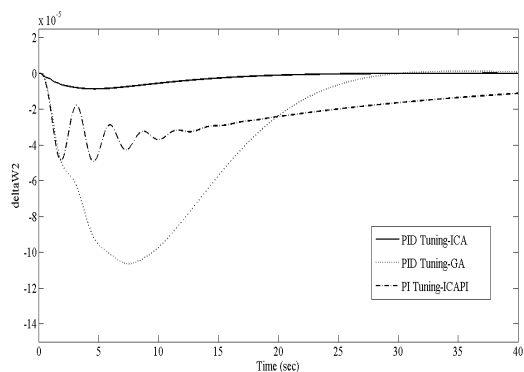
شکل (۷): سیستم دو ناحیه‌ای با کنترل‌کننده PID



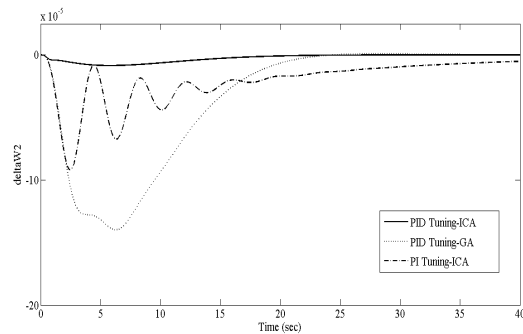
(الف)



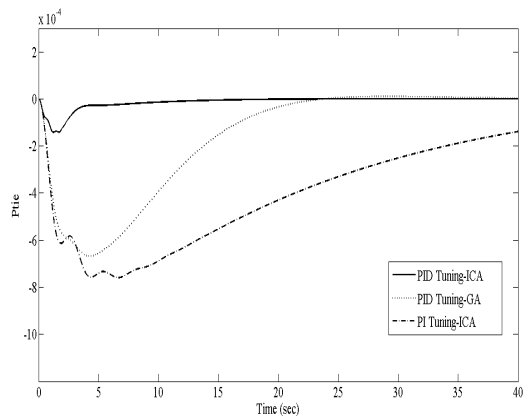
(الف)



(ب)

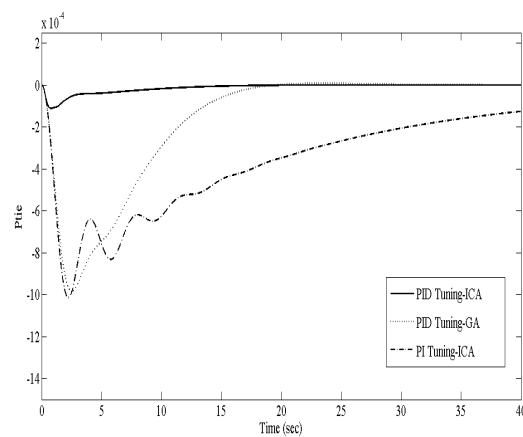


(ب)



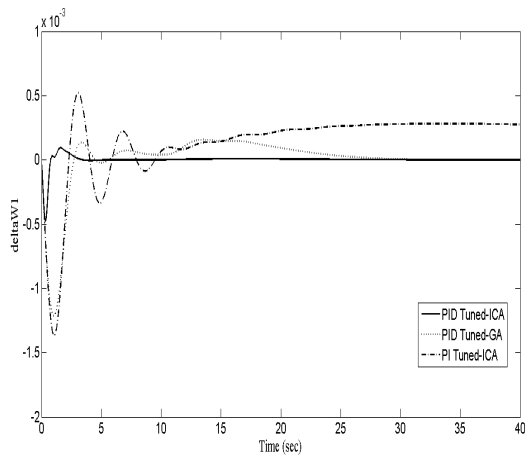
(ج)

شکل (۸): تغییرات فرکانس ناشی از تغییر بار در ناحیه اول در نقطه کار نامی ( $\Delta P_{L1} = 0.02 pu$ ): الف) ناحیه اول؛ ب) ناحیه دوم

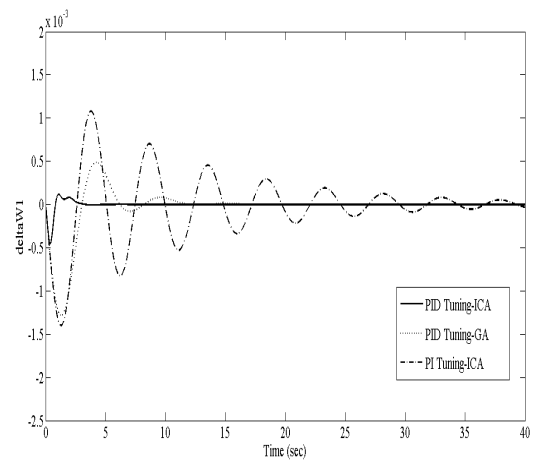


شکل (۹): تغییرات توان خط ارتباطی ناشی از تغییر بار در ناحیه اول در نقطه کار نامی ( $\Delta P_{L1} = 0.02 pu$ )

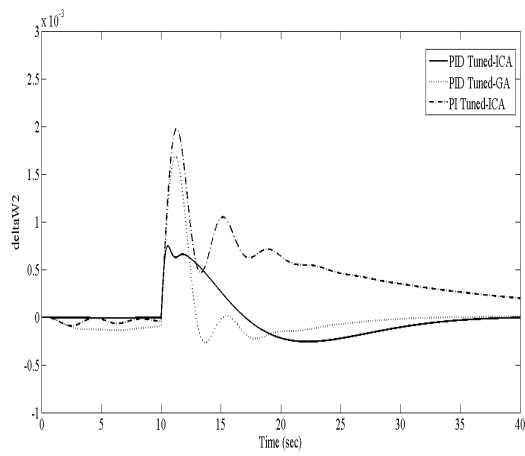
شکل (۱۰): نتایج حاصل از تغییر پله‌ای در بار ناحیه اول ( $\Delta P_{L1} = 0.02 pu$ ) به ازای پارامترهای سیستم قدرت در مقدار ۸۰٪ نقطه کار نامی: الف) تغییرات فرکانس ناحیه اول؛ ب) تغییرات فرکانس ناحیه دوم؛ ج) تغییرات توان خط ارتباطی



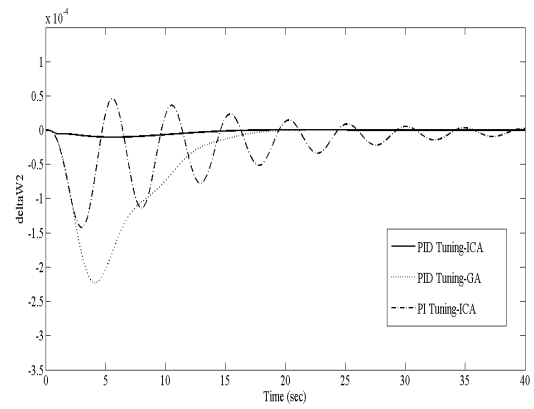
(الف)



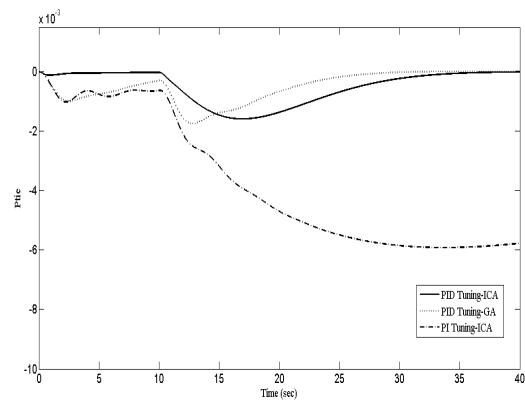
(الف)



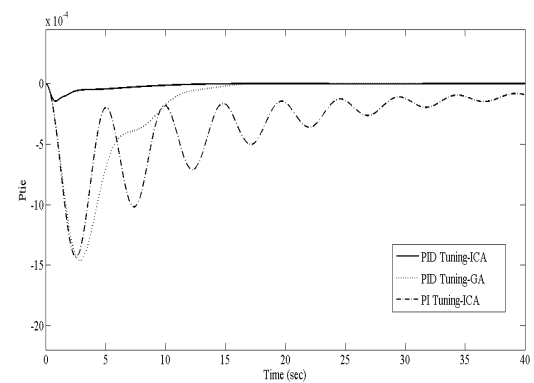
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل (۱۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی به ازای تغییرات در بارهای نواحی (  $\Delta P_{L1} = 0.02, \Delta P_{L2} = -0.02 pu$  ): الف) تغییرات فرکانس ناحیه اول؛ ب) تغییرات فرکانس ناحیه دوم؛ ج) تغییرات توان خط ارتباطی

شکل (۱۱): نتایج حاصل از تغییر پله ای در بار ناحیه اول (  $\pm 20\%$  ) به ازای پارامترهای سیستم قدرت در مقدار ۱۲۰٪ نقطه کار نامی: الف) تغییرات فرکانس ناحیه اول؛ ب) تغییرات فرکانس ناحیه دوم؛ ج) تغییرات توان خط ارتباطی

**ضمیمه ب:**

پارامترهای سیستم تحت مطالعه به شرح زیر است:

پارامترهای ناحیه اول:

$$H = 5, D = 0.8, T_g = 0.2, T_T = 0.5, R = 0.05$$

پارامترهای ناحیه دوم:

$$H = 4, D = 0.9, T_g = 0.3, T_T = 0.6, R = 0.0625$$

همچنین مقادیر محدودکننده‌ها به شرح زیر است:

$$X_{GV}^{open} = 0.4 \quad X_{GV}^{close} = 1.5 \quad X_{GV}^{open} = 1.2 \quad X_{GV}^{close} = 0.4$$

**مراجع**

- [1] Panda A.M., "Automatic generation control of multi area interconnected power system considering non-linearity due to governor dead band", Archives of Control Sciences, Vol. 7, No. 3-4, pp. 285-299, 1998.
- [2] Talaq J., Al-Basari F., "Adaptive fuzzy gain scheduling for load frequency control", IEEE Trans. Power System, Vol. 14, No. 1, pp. 145-150, 1999.
- [3] Bengamin N.N., Chan W.C., "Multilevel load-frequency control of interconnected power systems", IEE Proceedings Control Theory and Applications, Vol. 125, No. 6, pp. 521-526, 1978.
- [4] Kundur P., "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994.
- [5] Chaturvedi D.K., Satsangi P.S., Kalra P.K., "Load frequency control: a generalized neural network approach", International Journal of Electric Power and Energy System, Vol. 21, No. 6, pp. 405-415, 1999.
- [6] Dong L., Zhang Y., Gao Z., "A robust decentralized load frequency controller for interconnected power systems", ISA Transactions, Vol. 51, No. 3, pp. 10-419, 2012.
- [7] Juang C.F., Lu C.F., "Load frequency control by hybrid evolutionary fuzzy PI controller", IEE Proc. Generation Transmission Distribution, Vol. 153, No. 2, pp. 196-204, 2006.
- [8] Sudha K.R., Butchi Raju Y., Chandra Sekhar A., "Fuzzy C-Means clustering for robust decentralized load frequency control of

**۶. نتیجه گیری**

در این مقاله، به طراحی و بررسی عملکرد کنترل فرکانس یک سیستم دو ناحیه‌ای با کنترل کننده PID با پارامترهای تنظیم شده بهینه از طریق الگوریتم رقابت استعماری پرداخته شد. تابع هدف مورد استفاده در این مسئله بهینه‌سازی بر مبنای معیار انتگرال زمان- قدرمطلق خطا ITAE می‌باشد. عملکرد سیستم با کنترل کننده PID بهینه تنظیم شده با الگوریتم رقابت استعماری با کنترل کننده PID بهینه تنظیم شده با الگوریتم ژنتیک و نیز کنترل کننده PI بهینه شده توسط الگوریتم رقابت استعماری مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده عملکرد بسیار مطلوب الگوریتم رقابت استعماری در تعیین پارامترهای کنترل کننده PID در مسئله کنترل فرکانس بار در سیستم‌های قدرت است. در ضمن عملکرد کنترل کننده در وضعیت تغییر پارامترهای سیستم قدرت در محدوده  $\pm 20\%$  مقدار نامی به خوبی نشان‌دهنده داشتن مقاومت لازم در مقابل تغییرات پارامترهای سیستم است.

**ضمیمه الف:**

پارامترهای الگوریتم‌های ICA و GA به شرح جداول (الف-۱) و (الف-۲) می‌باشد:

جدول (الف-۱): پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری	
beta	۲
P <sub>Revolution</sub>	۰/۱
zeta	۰/۱

جدول (الف-۲): تنظیمات الگوریتم ژنتیک	
Scaling function	rank
Crossover fraction	۰/۸۵
Mutation function	Adaptive feasible
Crossover function	Scattered
Selection function	Stochastic

- International Journal Electric Power Energy System, Vol. 27, No. 8, pp. 575-583, 2005.
- [18] Sabahi K., Sharifi A., Aliyari M., Teshnehlab M., Aliasghary M., "Load frequency controller in interconnected power system using multi-objective PID controller", Appl. Sci., Vol. 8, No. 20, pp. 3676-3682, 2008.
- [19] Khodabakhshian A., Hooshmand R., "A new PID controller design for automatic generation control of hydro power systems", International Journal Electric Power Energy System, Vol. 32, No. 5, pp. 375-382, 2010.
- [20] Khodabakhshian A., Golbon N., "Unified PID design for load frequency control", IEEE International Conference on Control Applications, Vol. 2, No. 4, pp. 1627-1632, 2004.
- [21] Atashpaz-Gargari E., Lucas C., "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 4661-4666, 2007.
- [22] Sepehri Rad, H., Lucas, C., "Application of Imperialistic Competition Algorithm in recommender systems". In 13<sup>th</sup> Int'l CSI Computer Conference (CSICC'08), 2008.
- [23] Talatahari S., Farahmand-Azar B., Sheikholeslami R., Gandomi A.H., "Imperialist competitive algorithm combined with chaos for global optimization", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 17, No. 3, pp. 1312-1319, 2012.
- [24] Lucas C., Nasiri-Gheidari Z., Tootoonchian F., "Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor", Energy Conversion and Management, Vol. 51, No. 7, pp. 1407-1411, 2010.
- [25] Ebrahimzadeh A., Addeh J., Rahmani Z., "Control chart pattern recognition using K-MICA clustering and neural networks", ISA Transactions, Vol. 51, No. 1, pp. 111-119, 2012.
- [26] Karami A., Rezaei E., Shahhosseni M., Aghakhani M., "Optimization of heat transfer in an air cooler equipped with classic twisted interconnected power system with Generation Rate Constraint", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 37, No. 1, pp. 58-66, 2012.
- [9] Yazdizadeh A., Ramezani M.H., Hamedrahmat E., "Decentralized load frequency control using a new robust optimal MISO PID controller", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 35, No. 1, pp. 57-65, 2012.
- [10] Khuntia S.R., Panda S., "Simulation study for automatic generation control of a multi-area power system by ANFIS approach", Applied Soft Computing, Vol. 12, No. 1, pp. 333-341, 2012.
- [11] Shayeghi H., Jalili A., Shayanfar H.A., "Multi-stage fuzzy load frequency control using PSO", Energy Converse Management, Vol. 49, No. 10, pp. 2570-2580, 2008.
- [12] Cam E., Kocaarslan I., "Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control", International Journal Electric Power Energy System, Vol. 27, No. 8, pp. 542-549, 2005.
- [13] Taher S.A., Hematti R., Abdolalipour A., Tabei S.H., "Optimal decentralized load frequency control using HPSO algorithms in deregulated power systems", Am J Appl Sci, Vol. 5, No. 9, pp. 1167-1174, 2008.
- [14] Ramesh S., Krishnan A., "Modified genetic algorithm based load frequency controller for interconnected power system", International Journal Electric Power Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 26-30, 2009.
- [15] Yang T.C., Cimen H., Zhu Q.M., "Decentralized load frequency controller design based on structured singular values", IEE Proc-Generation Transaction Distribution, Vol. 145, No. 1, pp. 7-14, 1998.
- [16] Rerkpreedapong D., Hasanovich A., Feliachi A., "Robust load frequency control using genetic algorithm and linear matrix inequalities", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 855-861, 2003.
- [17] Zribi M., Al-Rashed M., Alrifai M., "Adaptive decentralized load frequency control of multi area power systems",

tape inserts using imperialist competitive algorithm", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 38, pp. 195-200, 2012.

- [27] Niknam T., Taherian-Fard E., Pourjafarian N., Rosta A., "An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 24, No. 2, pp. 306-317, 2011.
- [28] Ali E.S., Abd-Elazim S.M., "Bacteria foraging optimization algorithm based load frequency controller for interconnected power system", *International Journal Electric Power and Energy System*, Vol. 33, No. 3, pp. 633-638, 2011.