

## کنترل تولید خودکار یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای در حضور SMES و TCPS با استفاده از کنترل پیش جبران شده‌ی فازی مبتنی بر الگوریتم GWO

سیروان آرازی سیدجلال سیدشنوا عادل اکبری مجد

دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه برق و کامپیوتر

### چکیده

این مقاله کنترل تولید خودکار یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای به هم پیوسته در حضور ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) و شیفت دهنده‌ی فاز کنترل شده با تریستور (TCPS) را ارائه می‌کند. سیستم قدرت مورد ارزیابی متشکل از دو ناحیه‌ی چند واحد است که در ناحیه‌ی اول دو واحد حرارتی دارای بازگرمایش و در ناحیه‌ی دوم دو واحد آبی عمل می‌کنند. کنترل-کننده‌ی پیشنهاد شده، یک کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر (PI) پیش جبران شده‌ی فازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) است. عملکرد کنترل‌کننده با کنترل‌کننده‌های کلاسیک مانند انتگرال‌گیر (I) و تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر (PID) و همچنین PID فازی مقایسه شده است. همچنین عملکرد الگوریتم به کار رفته، با الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات (PSO) مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد دینامیکی بهتر کنترل‌کننده‌ی پیشنهاد شده را با وجود ساختار ساده‌تر نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل تولید خودکار، الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری، کنترل‌کننده‌ی PI پیش جبران شده‌ی فازی، ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا، شیفت دهنده‌ی فاز کنترل شده با تریستور

### ۱- مقدمه

تقاضا و تولید است، مستلزم برنامه‌ای مانند کنترل تولید خودکار (AGC)<sup>۱</sup> است.

در دهه‌های گذشته، استراتژی‌های مختلفی برای AGC به منظور مهیا کردن پاسخ دینامیکی مطلوب‌تر به کار گرفته شده است و به مرور زمان این استراتژی‌ها توسعه یافته‌اند. در این بین نقش به سزای الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز غیر قابل انکار است. در همین راستا محققان زیادی با اعمال کنترل‌کننده‌های کلاسیک مختلف، سعی در بهبود عملکرد کنترلی AGC

در یک سیستم قدرت به هم پیوسته، حفظ تبادل توان اکتیو برنامه‌ریزی شده و ثابت نگه داشتن فرکانس سیستم در مقدار نامی، بسیار حیاتی است. در واقع این فرکانس است که سلامت شبکه قدرت را از لحاظ کمبود یا ازدیاد تولید مشخص می‌کند. فرکانس پایین‌تر از مقدار نامی، نشان دهنده‌ی افزایش تقاضای بار و کمبود تولید است، در مقابل فرکانس بالاتر از مقدار نامی، نشان دهنده‌ی کاهش تقاضای بار و تولید اضافی است. از این رو، حذف خطای فرکانس که نشان دهنده‌ی عدم تعادل بین

<sup>1</sup>. Automatic Generation Control

داشته‌اند [۵-۱]. حال آن که با ورود منطق فازی به حوزه‌ی کنترلی، نتایج قابل قبولی در زمینه‌ی AGC بدست آمده است. در [۶] یک کنترل کننده‌ی PI فازی مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)<sup>۱</sup> پیشنهاد شده است. در [۷] برای یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای حرارتی-حرارتی، یک کنترل کننده-ی PID فازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. ریشاب ورما و همکارانش یک کنترل کننده‌ی هوشمند بر اساس منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)<sup>۲</sup> برای AGC یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای حرارتی-آبی پیشنهاد کرده‌اند [۸]. در [۹] یک کنترل کننده‌ی PID فازی چند مرحله‌ای برای AGC در یک سیستم قدرت مقررات زدایی شده طراحی شده است.

## ۲- سیستم قدرت مورد مطالعه

استفاده از ادواتی مانند شیفتر دهنده‌ی فاز کنترل شده با تریستور (TCPS)<sup>۳</sup>، ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES)<sup>۴</sup>، جبران‌ساز سری سنکرون استاتیک (SSSC)<sup>۵</sup>، ذخیره‌سازی انرژی خازنی (CES)<sup>۶</sup> و غیره از جمله اقدامات دیگری بوده که در راستای بهبود عملکرد دینامیکی کنترل تولید خودکار انجام گرفته است. در [۱۰] به بررسی تأثیر TCPS روی نوسانات فرکانسی در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای پرداخته شده است. تأثیر SMES روی پایداری نوسانات فرکانسی در کنترل تولید خودکار یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای در [۱۱] بررسی شده است. در تحقیقات دیگری نیز با ارائه الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف، سعی در بهبود عملکرد کنترل کننده‌ها در زمینه‌ی AGC شده است [۱۲-۱۵]. موارد ذکر شده همگی به دنبال دستیابی به عملکرد دینامیکی بهتر در حل مسأله AGC بوده‌اند. با این حال، به دلیل اهمیت این موضوع در سیستم قدرت، تحقیق برای یافتن راه‌حل‌های بهتر همچنان ادامه دارد.

هدف اصلی در کنترل تولید خودکار یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای، صفر کردن خطای کنترل ناحیه (ACE)<sup>۸</sup> هر کدام از نواحی، جهت حفظ فرکانس سیستم و توان جاری شده در خطوط ارتباطی در مقادیر برنامه‌ریزی شده است. خطای کنترل ناحیه برای هر ناحیه به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$ACE_i = \sum_j \Delta P_{tie,i-j} + B_i \Delta f_i \quad (1)$$

که در آن  $ACE_i$  خطای کنترل ناحیه  $i$  ام،  $\Delta P_{tie,i-j}$  توان جاری شده در خط ارتباطی بین نواحی  $i$  ام و  $j$  ام،  $B_i$  ضریب گرایش فرکانس ناحیه  $i$  ام و  $\Delta f_i$  خطای فرکانس ناحیه  $i$  ام است.

## ۳- ادوات به کار رفته در سیستم قدرت

### ۳-۱- ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا

در این مقاله یک کنترل کننده‌ی PI پیش جبران شده‌ی فازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO)<sup>۷</sup> برای AGC یک سیستم قدرت به هم پیوسته پیشنهاد شده است. سیستم قدرت متشکل از دو ناحیه‌ی چند واحدی حرارتی-آبی است که به ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا و شیفتر دهنده‌ی فاز کنترل شده با تریستور مجهز شده است. جهت

ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) وسیله‌ای برای ذخیره‌سازی و دشارژ آنی مقادیر بزرگی از توان است. این وسیله انرژی را در میدان مغناطیسی ایجاد شده در یک سیم-پیچ از مواد ابررسانا ذخیره می‌کند و از آنجا که قادر به کنترل کردن همزمان توان اکتیو و راکتیو است، یکی از مهمترین مؤثرترین پایدارسازهای نوسانات فرکانسی به شمار می‌رود. شکل ۲ پیکربندی SMES را در سیستم قدرت نشان می‌دهد. به طور معمول تغییر در توان SMES، برای هر ناحیه به صورت زیر مدل می‌شود [۱۷]:

ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES)<sup>۴</sup>، جبران‌ساز سری سنکرون استاتیک (SSSC)<sup>۵</sup>، ذخیره‌سازی انرژی خازنی (CES)<sup>۶</sup> و غیره از جمله اقدامات دیگری بوده که در راستای بهبود عملکرد دینامیکی کنترل تولید خودکار انجام گرفته است. در [۱۰] به بررسی تأثیر TCPS روی نوسانات فرکانسی در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای پرداخته شده است. تأثیر SMES روی پایداری نوسانات فرکانسی در کنترل تولید خودکار یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای در [۱۱] بررسی شده است. در تحقیقات دیگری نیز با ارائه الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف، سعی در بهبود عملکرد کنترل کننده‌ها در زمینه‌ی AGC شده است [۱۲-۱۵]. موارد ذکر شده همگی به دنبال دستیابی به عملکرد دینامیکی بهتر در حل مسأله AGC بوده‌اند. با این حال، به دلیل اهمیت این موضوع در سیستم قدرت، تحقیق برای یافتن راه‌حل‌های بهتر همچنان ادامه دارد.

ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) وسیله‌ای برای ذخیره‌سازی و دشارژ آنی مقادیر بزرگی از توان است. این وسیله انرژی را در میدان مغناطیسی ایجاد شده در یک سیم-پیچ از مواد ابررسانا ذخیره می‌کند و از آنجا که قادر به کنترل کردن همزمان توان اکتیو و راکتیو است، یکی از مهمترین مؤثرترین پایدارسازهای نوسانات فرکانسی به شمار می‌رود. شکل ۲ پیکربندی SMES را در سیستم قدرت نشان می‌دهد. به طور معمول تغییر در توان SMES، برای هر ناحیه به صورت زیر مدل می‌شود [۱۷]:

1. Particle Swarm Optimization

2. Artificial Neural Networks

3. Thyristor Controlled Phase Shifter

4. Superconducting Magnetic Energy Storage

5. Static Synchronous Series Compensator

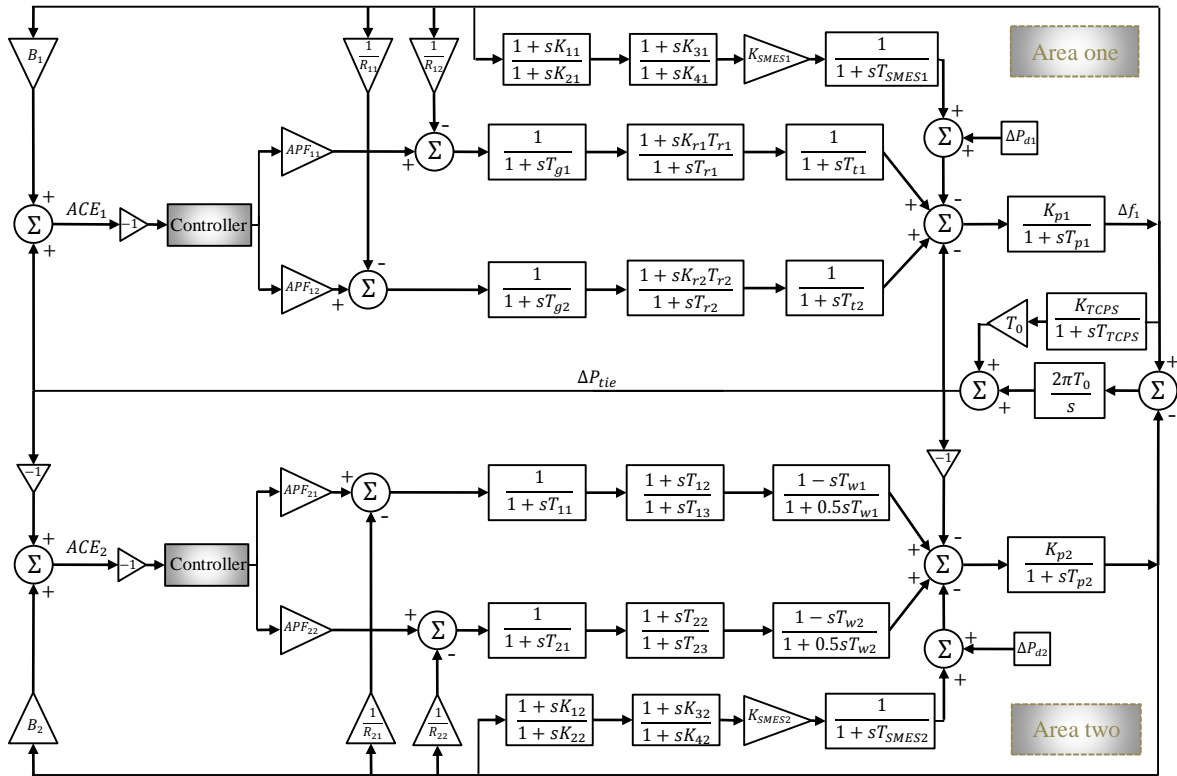
6. Capacitive Energy Storage

7. Grey Wolf Optimizer

8. Integral Square Error

9. Area Participation Factor

10. Area Control Error

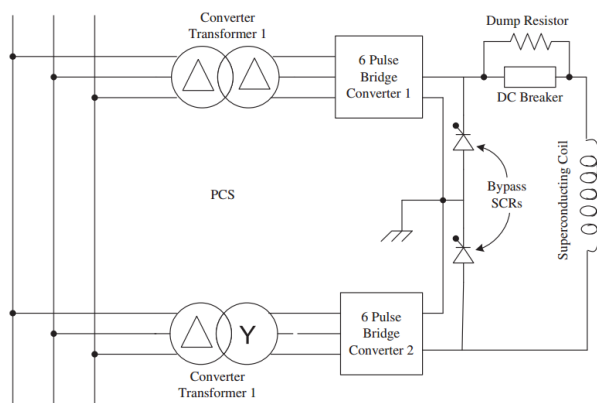


شکل ۱: سیستم قدرت دو ناحیه‌ای دو واحد

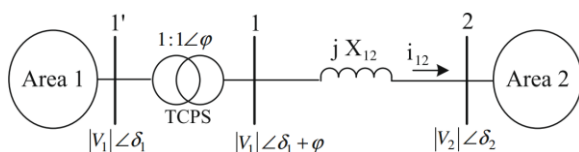
فاز که با کنترل آن، توان خط ارتباطی کنترل می‌شود، به صورت زیر مدل می‌گردد [۱۸]:

$$\Delta\phi(s) = \frac{K_{TCPS}}{1+sT_{TCPS}} \Delta f_1(s) \quad (3)$$

که در آن  $K_{TCPS}$  گین و  $T_{TCPS}$  ثابت زمانی TCPS است.



شکل ۲: پیکربندی SMES در سیستم قدرت



شکل ۳: طرح کلی یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای مجهز به TCPS

$$\Delta P_{SMES}(s) = \left( \frac{1+sK_1}{1+sK_2} \right) \left( \frac{1+sK_3}{1+sK_4} \right) \left( \frac{K_{SMES}}{1+sT_{SMES}} \right) \Delta f(s) \quad (2)$$

که در آن  $K_{SMES}$  بهره‌ی حلقه‌ی کنترلی،  $T_{SMES}$  ثابت زمانی SMES است و ثوابت زمانی  $K_1, K_2, K_3$  و  $K_4$  یک جبران‌ساز فاز را برای مهیا کردن مشخصه‌های پیش فاز مناسب جهت جبران کردن تأخیر فاز بین سیگنال‌های ورودی و خروجی ایجاد می‌کند.

### ۳-۲- شیفیت دهنده‌ی فاز کنترل شده با تریستور

شیفیت دهنده‌ی فاز کنترل شده با تریستور (TCPS) وسیله‌ای است که می‌تواند زاویه‌ی فاز نسبی بین ولتاژهای دو سیستم را تغییر دهد که به موجب آن، به کنترل توان حقیقی مبادله شده بین دو سیستم قدرت به هم پیوسته کمک می‌کند. به این ترتیب نوسانات فرکانسی ناشی از اغتشاش بار در هر کدام از نواحی، به خوبی تضعیف می‌شود. شکل ۳ طرح کلی یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای مجهز به TCPS سری با خط ارتباطی را نشان می‌دهد، که در آن TCPS نزدیک به ناحیه یک نصب شده است. به طور معمول زاویه‌ی شیفیت دهنده‌ی

#### ۴- الگوریتم GWO

گرگ‌های خاکستری شکارچیانی هستند که اغلب به صورت گروهی زندگی می‌کنند و دسته‌بندی گروهی بسیار اکیدی دارند. گرگ  $\alpha$  در صدر این دسته‌بندی، به عنوان رئیس گروه ایفای نقش می‌کند و بعد از او گرگ‌های  $\beta$ ،  $\delta$  و  $\omega$  در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. هر کدام از گرگ‌های بر اساس این دسته‌بندی، وظایف مشخصی در گروه دارند. نکته‌ی جالب‌تر در مورد این گرگ‌ها، نحوه‌ی شکار کردن آن‌ها است، به گونه‌ای که پس از ردگیری و دنبال کردن طعمه، آن را محاصره کرده و بعد از خسته کردن طعمه به آن حمله‌ور می‌شوند. از این تکنیک شکار و دسته‌بندی گروهی گرگ‌های خاکستری به منظور طراحی GWO و انجام بهینه‌سازی استفاده شده است.

در این الگوریتم بهینه‌سازی، در هر تکرار بهترین جواب به عنوان  $\alpha$  در نظر گرفته می‌شود و دومین و سومین از بهترین جواب‌ها به عنوان  $\beta$  و  $\delta$  در نظر گرفته می‌شود. بقیه جواب‌های تعیین شده نیز به عنوان  $\omega$  در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  بهترین دانش را در مورد محل بالقوه‌ی جواب بهینه دارند و از این رو، موقعیت دیگر عامل‌های جستجو ( $\omega$ ها) با توجه به موقعیت  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  بر اساس فرمول‌بندی زیر به‌روز می‌شود

$$\begin{aligned} \bar{D}_\alpha &= |\bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha(t) - \bar{X}(t)| \\ \bar{D}_\beta &= |\bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta(t) - \bar{X}(t)| \\ \bar{D}_\delta &= |\bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta(t) - \bar{X}(t)| \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_1(t+1) &= \bar{X}_\alpha(t) - \bar{A}_1 \cdot \bar{D}_\alpha \\ \bar{X}_2(t+1) &= \bar{X}_\beta(t) - \bar{A}_2 \cdot \bar{D}_\beta \\ \bar{X}_3(t+1) &= \bar{X}_\delta(t) - \bar{A}_3 \cdot \bar{D}_\delta \end{aligned} \quad (5)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1(t+1) + \bar{X}_2(t+1) + \bar{X}_3(t+1)}{3} \quad (6)$$

که در آن  $t$  تکرار فعلی،  $\bar{A}$  و  $\bar{C}$  بردارهای ضرایب و  $\bar{X}$  موقعیت عامل جستجو را نشان می‌دهد. بردارهای  $\bar{A}$  و  $\bar{C}$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (7)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (8)$$

که در آن مؤلفه  $\vec{a}$  در طول تکرارها از ۲ به صفر کاهش می‌یابد و  $\vec{r}_1$  و  $\vec{r}_2$  بردارهای تصادفی در بازه‌ی  $[0,1]$  هستند. به

این ترتیب  $\bar{A}$  مقدار تصادفی در بازه‌ی  $[-2,2]$  و  $\bar{C}$  مقدار تصادفی در بازه‌ی  $[0,2]$  خواهد بود. برای مقادیر  $|A| < 1$  و  $C < 1$ ، عامل‌های جستجو به سمت جواب بهینه همگرا می‌شوند. در حالی که  $|A| > 1$  و  $C > 1$ ، واگرایی عامل‌های جستجو و کاوش سراسری را مدل می‌کند، که این کار برای جلوگیری از حاصل شدن جواب‌های بهینه‌ی محلی است. در نهایت هم با بهینه کردن تابع هدف در نظر گرفته شده، الگوریتم GWO به پایان می‌رسد.

برای اطلاعات بیشتر به [۱۹] مراجعه شود.

#### ۵- طراحی کنترل کننده

##### ۵-۱- ساختار کنترلی

به طور معمول کنترل کننده‌ی PID به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

که در آن  $e(t)$  سیگنال خطا است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e(t) = y_r(t) - y(t) \quad (10)$$

در معادله‌ی بالا  $y_r(t)$  ورودی مرجع و  $y(t)$  خروجی فرایند است.

تلاش‌های زیادی در راستای بهبود عملکرد کنترل کننده‌ی PID شده است. یکی از این تلاش‌ها اصلاح نقطه‌ی تنظیم<sup>۱</sup> است [۲۰]، که سیگنال ورودی خطا را برای کنترل کننده به صورت زیر تعریف می‌کند.

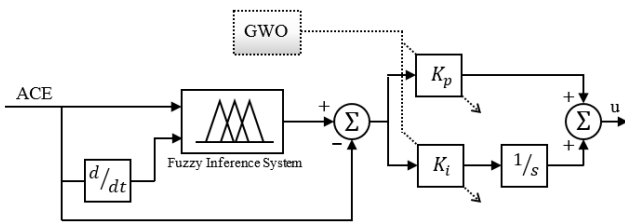
$$e'(t) = y_r(t) + F(e(t), \frac{de(t)}{dt}) - y(t) \quad (11)$$

که در آن  $F$  یک تابع غیر خطی از  $e(t)$  و  $\frac{de(t)}{dt}$  است. در این صورت خواهیم داشت:

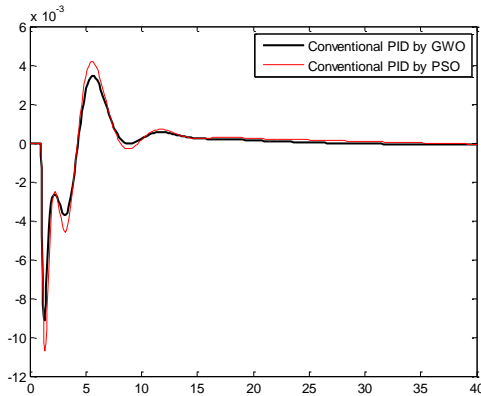
$$u(t) = k_p e'(t) + k_i \int e'(t) dt + k_d \frac{de'(t)}{dt} \quad (12)$$

به این ساختار، کنترل کننده‌ی PID پیش جبران شده گفته می‌شود. تابع  $F$  را می‌توان با یک سیستم فازی پیاده کرد، که

<sup>۱</sup>. set-point modification



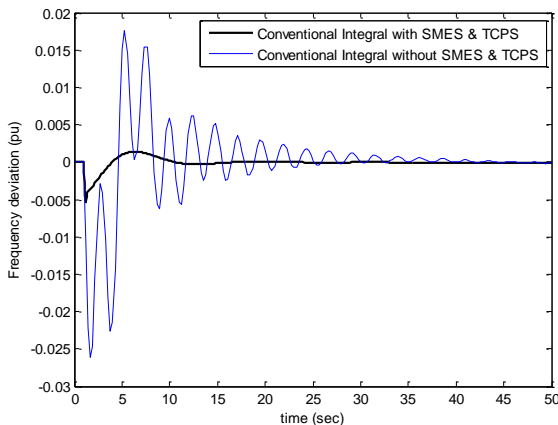
شکل ۲: ساختار کنترل کننده PI پیش جبران شده فازی



شکل ۳: مقایسه بین دو الگوریتم GWO و PSO با کنترل کننده PID متداول

## ۲-۶- تأثیر SMES و TCPS روی پاسخ دینامیکی

شکل های ۴ و ۵ تأثیر ادوات SMES و TCPS روی پاسخ دینامیکی سیستم را به ترتیب برای کنترل کننده های انتگرال-گیر و PID متداول نشان می دهد. ضرایب بهینه شده در شرایط وجود این ادوات نیز در جدول های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، مشخصه های کنترلی کاهش قابل توجهی نسبت به شرایط نبود این ادوات داشته است.



شکل ۴: تأثیر ادوات SMES و TCPS روی پاسخ دینامیکی در حالت اعمال کنترل کننده ی انتگرال گیر

در این صورت کنترل کننده، پیش جبران شده فازی نامیده می شود. از این رو، برای یک کنترل کننده ی PI پیش جبران شده فازی معادله ی ۱۳ را خواهیم داشت. شکل ۲ نیز ساختار این کنترل کننده را مبتنی بر الگوریتم GWO نشان می دهد.

$$u(t) = k_p (y_r(t) + F - y(t)) + k_i \int (y_r(t) + F - y(t)) dt \quad (13)$$

## ۲-۵- سیستم استنتاج فازی

ورودی های سیستم استنتاج فازی خطای کنترل ناحیه (ACE(t)) و مشتق آن  $\frac{dACE(t)}{dt}$  است. توابع عضویت و قواعد کنترلی نیز معمولاً با سعی و خطا و استفاده از تجربیات محققان تعیین می شود.

جدول ۲ قواعد کنترلی سیستم استنتاج فازی مورد استفاده را نشان می دهد. در این تحقیق، روش استنتاج فازی sugeno مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۶- نتایج شبیه سازی

برای بررسی عملکرد کنترل کننده ی پیشنهاد شده در سیستم قدرت مورد مطالعه، اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه اول اعمال شده است. الگوریتم GWO برای بهینه کردن ضرایب کنترل کننده ها مورد استفاده قرار گرفته است و شاخص ISE به عنوان تابع هدف در بهینه سازی استفاده شده است. این شاخص را می توان به صورت زیر تعریف کرد [۲۱]:

$$J = \int_0^t \{ (\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie,1-2})^2 \} dt \quad (14)$$

## ۶-۱- مقایسه ی الگوریتم GWO با PSO

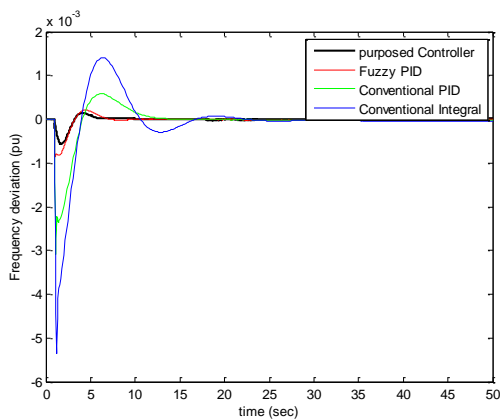
برای مقایسه ی الگوریتم به کار رفته در این مطالعه با الگوریتم PSO، سیستم قدرت مورد مطالعه را بدون SMES و TCPS در نظر می گیریم. در هر دو الگوریتم تعداد تکرارها و تعداد عامل های جستجوی برابر در نظر گرفته شده است. شکل ۳ مقایسه بین این دو الگوریتم را در حالتی که کنترل کننده ی PID متداول در سیستم قدرت به کار رفته است را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، شاخص های کنترلی فراجش، فراجش و زمان نشست در حالتی که الگوریتم GWO به کار رفته است، مناسب تر است.

جدول ۱: پارامترهای سیستم قدرت به هم پیوسته

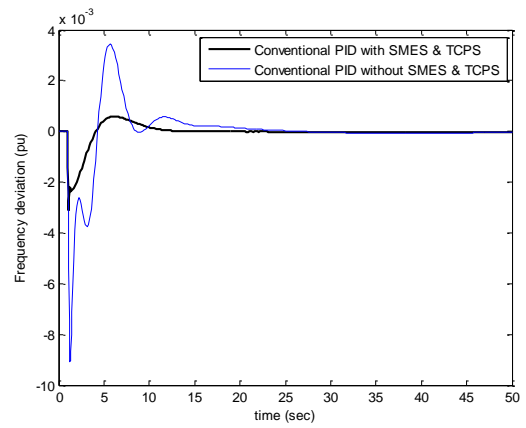
پارامتر	مقدار	توصیف پارامتر
f	60 Hz	فرکانس سیستم
T <sub>t1</sub> , T <sub>t2</sub>	0.4 Second	ثابت زمانی توربین بخار
T <sub>g1</sub> , T <sub>g2</sub>	0.08 Second	ثابت زمانی گاورنر توربین بخار
K <sub>r1</sub> , K <sub>r2</sub>	0.333	ثابت بازگرمایش توربین بخار
T <sub>r1</sub> , T <sub>r2</sub>	10 Second	ثابت زمانی بازگرمایش توربین بخار
K <sub>p1</sub> , K <sub>p2</sub>	120 Hz/pu MW	ثابت سیستم قدرت ناحیه
T <sub>p1</sub> , T <sub>p2</sub>	20 Second	ثابت زمانی سیستم قدرت ناحیه
T <sub>0</sub>	0.0707 MW/radian	ضریب سنکرون کننده
T <sub>11</sub> , T <sub>21</sub>	48.7 Second	ثابت زمانی گاورنر آبی (مرحله ۱)
T <sub>13</sub> , T <sub>23</sub>	10 Second	ثابت زمانی گاورنر آبی (مرحله ۲)
T <sub>12</sub> , T <sub>22</sub>	0.513 Second	ثابت زمانی گاورنر آبی (مرحله ۲)
T <sub>w1</sub> , T <sub>w2</sub>	1 Second	زمان شروع آب برای توربین آبی
ΔP <sub>d1</sub> , ΔP <sub>d2</sub>	0.01 pu, 0	تغییر در بار
B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub>	0.425 pu MW/Hz	ضریب گرایش فرکانس خط ارتباطی
R <sub>11</sub> , R <sub>12</sub> , R <sub>21</sub> , R <sub>22</sub>	2.4 Hz/pu MW	پارامتر تنظیم سرعت

جدول ۲: قواعد فازی استفاده شده برای سیستم استنتاج فازی

		d(ACE)/dt	
		Negative	Positive
ACE	Negative	Min	Zero
	Positive	Zero	Max



شکل ۷: انحراف فرکانس در ناحیه اول ناشی از اغتشاش بار ۰.۱٪ در ناحیه اول

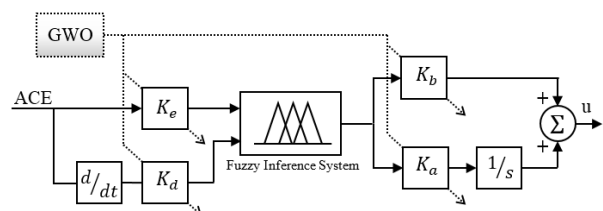


شکل ۵: تأثیر ادوات SMES و TCPS روی پاسخ دینامیکی در حالت اعمال کنترل کننده PID متداول

### ۳-۶ - بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهاد شده

عملکرد کنترل کننده پیشنهاد شده با سه کنترل کننده انتگرال گیر، PID متداول و PID فازی مقایسه شده است. ساختار کنترل کننده PID فازی که جهت مقایسه‌ی نتایج با کنترل کننده پیشنهاد شده به کار رفته است، در شکل ۶ نشان داده شده است. ضرایب بهینه بدست آمده برای اغتشاش بار ۰.۱٪ در ناحیه اول، در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. انحراف فرکانس ناحیه اول و دوم در اثر اغتشاش بار ۰.۱٪، به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. انحراف توان خط ارتباطی نیز در شکل ۹ نشان داده شده است.

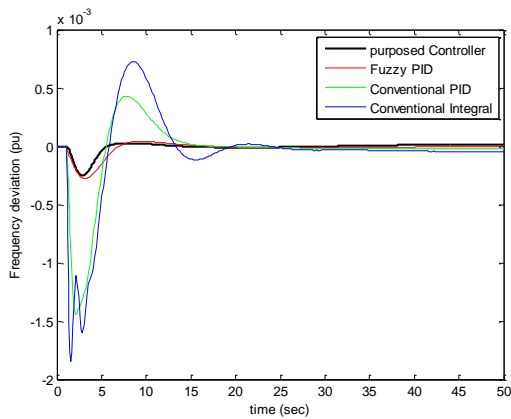
همان طور که مشاهده می‌شود، فراجش و فروجش با کنترل کننده پیشنهاد شده نسبت به سایر کنترل کننده‌ها کاهش یافته است. این کاهش در زمان نشست نیز مشاهده می‌شود. در جدول ۵ این مشخصه‌های کنترلی برای انحراف فرکانس در ناحیه اول نشان داده شده است. البته این را نیز می‌توان گفت که در مقایسه با کنترل کننده PID فازی، کنترل کننده پیشنهاد شده تعداد پارامترهای کمتری برای تنظیم دارد. همان طور که در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود، برای کنترل کننده پیشنهاد شده تنها دو پارامتر تنظیم می‌شود، در حالی که برای کنترل کننده PID فازی چهار پارامتر تنظیم می‌شود.



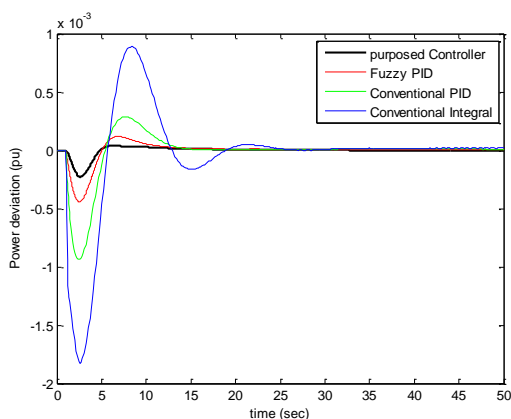
شکل ۶: ساختار کنترل کننده PID فازی

جدول ۵: مشخصه‌های کنترلی کنترل‌کننده پیشنهاد شده برای انحراف فرکانس در ناحیه اول ناشی از اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه اول

	فروجهش (pu)	فراجشش (pu)	زمان نشست (ثانیه)
کنترل‌کننده انتگرال‌گیر	$-5.3668 \times 10^{-3}$	$1.4069 \times 10^{-3}$	24.27
کنترل‌کننده PID متداول	$-3.0827 \times 10^{-3}$	$5.8102 \times 10^{-4}$	13.89
کنترل‌کننده PID فازی	$-8.6482 \times 10^{-4}$	$2.0828 \times 10^{-4}$	6.74
کنترل‌کننده پیشنهاد شده	$-5.6746 \times 10^{-4}$	$1.4245 \times 10^{-4}$	5.07



شکل ۸: انحراف فرکانس در ناحیه دوم ناشی از اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه اول



شکل ۹: انحراف توان در خط ارتباطی ناشی از اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه اول

کننده، یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای دو واحد مجهز به SMES و TCPS در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی با اعمال اغتشاش بار ۱٪ به ناحیه اول انجام گردید و نتایج با سه نوع

جدول ۳: ضرایب بهینه شده کنترل‌کننده‌ها برای اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه اول

ناحیه	ضرایب بهینه شده
کنترل‌کننده انتگرال‌گیر	اول $K_{i1}=3.2679$
	دوم $K_{i2}=0.1279$
کنترل‌کننده PID متداول	اول $K_{p1}=4.9131, K_{i1}=5.2344, K_{d1}=1.4804$
	دوم $K_{p2}=1.5971, K_{i2}=0.2104, K_{d2}=0.6489$
کنترل‌کننده PID فازی	اول $K_{e1}=1.9394, K_{d1}=2.0185, K_{a1}=1.9267, K_{b1}=1.3086$
	دوم $K_{e2}=0.3673, K_{d2}=1.0069, K_{a2}=1.1552, K_{b2}=0.1786$
کنترل‌کننده پیشنهاد شده	اول $K_{p1}=9.8039, K_{i1}=5.8591$
	دوم $K_{p2}=1.3231, K_{i2}=0.2013$

جدول ۴: ضرایب بهینه شده SMES و TCPS برای اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه اول

ضریب	کنترل‌کننده			
	انتگرال‌گیر	PID متداول	PID فازی	PI پیش جبران شده فازی
$K_{SMES1}$	1.6420	1.7784	1.8369	1.4935
$T_{SMES1}$	1.5958	1.8171	0.0043	0.6464
$K_{11}$	1.4204	1.2841	1.6131	2.1792
$K_{21}$	0.0612	0.5539	1.1117	0.0100
$K_{31}$	1.8972	1.6823	1.3186	1.2665
$K_{41}$	1.3890	0.0413	0.3278	0.0373
$K_{SMES2}$	1.0695	0.6489	0.9055	0.7346
$T_{SMES2}$	0.8608	0.3333	0.1582	0.1009
$K_{12}$	0.7227	0.6593	1.9803	0.9615
$K_{22}$	0.5757	0.6915	1.4607	1.3121
$K_{32}$	1.5265	0.8622	1.8237	1.6426
$K_{42}$	0.6855	0.6232	0.6461	0.8225
$K_{TCPS}$	2.1629	1.4147	1.9583	0.2553
$T_{TCPS}$	0.0408	0.4570	0.6032	2.1283

## ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک کنترل‌کننده PI پیش جبران شده فازی پیشنهاد شد. برای بررسی عملکرد دینامیکی این کنترل

- Conversion and Management, vol. 47, no. 18–19, pp. 2829-2845, 2006.
- [10] R.J. Abraham, D. Das and A. Patra, "Effect of TCPS on oscillations in tie-power and area frequencies in an interconnected hydrothermal power system," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 1, no. 4, p. 632 – 639, 2007.
- [11] V.S. Sundaram and T. Jayabarathi, "An effect of SMES using automatic generation control in a multi area power system," in International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering, Sivakasi, 2011.
- [12] S. Dutta, S. Paul, K. Bhattacharjee and A. Bhattacharya, "Automatic generation control of an interconnected hydro-thermal system with thyristor control phase shifter using gravitational search algorithm," in IEEE International Conference On Advances In Engineering, Science And Management, Nagapattinam, Tamil Nadu, 2012.
- [13] P. Dash, L.C. Saikia, R. Kedia and N. Sinha, "Damping of oscillations using TCPS with BF technique in a three-area thermal system," in Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, Bangalore, 2014.
- [14] U.K. Rout, R.K. Sahu and S. Panda, "Gravitational Search Algorithm based Automatic Generation Control for interconnected power system," in International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, Nagercoil, 2013.
- [15] A. Saxena, M. Gupta and V. Gupta, "Automatic Generation Control of Two Area Interconnected Power System Using Genetic Algorithm," in IEEE International Conference on Computational Intelligence & Computing Research, Coimbatore, 2012.
- [16] C.D. Boesack, T. Marwala and V. Nelwamondo, "Application of GA-Fuzzy Controller Design to Automatic Generation Control," in Third International Workshop on Advanced Computational Intelligence, Suzhou, Jiangsu, 2010.
- [17] P. Bhatt, R. Roy and S.P. Ghoshal, "Comparative performance evaluation of SMES–SMES, TCPS–SMES and SSSC–SMES controllers in automatic generation control for a two-area hydro–hydro system," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 33, no. 10, p. 1585–1597, 2011.
- [18] P. Bhatt, R. Roy and S.P. Ghoshal, "GA/particle swarm intelligence based optimization of two specific varieties of controller devices applied to two-area multi-units automatic generation control," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 32, no. 4, p. 299–310, 2010.
- [19] S.A. Mirjalili, S.M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," Advances in Engineering Software, vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [20] J.H. Kim, K.C. Kim and E.K.P. Chong, "Fuzzy precompensated PID controllers," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 2, no. 4, pp. 406-411, 1994.
- [21] S. Debbarma, L.C. Saikia and N. Sinha, "Automatic generation control using two degree of freedom fractional order PID controller," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 58, pp. 120-129, 2014.

کنترل کننده‌ی انتگرال‌گیر، PID متداول و PID فازی مقایسه شد. عملکرد دینامیکی بهتر کنترل‌کننده‌ی پیشنهاد شده با مقایسه‌ی انحراف فرکانس نواحی و همچنین انحراف توان خط ارتباطی در اثر اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه‌ی اول، نشان داده شد. این نتایج با وجود تعداد پارامترهای کمتر جهت تنظیم در کنترل‌کننده‌ی پیشنهاد شده در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی PID فازی بدست آمده است. همچنین الگوریتم GWO به کار رفته با الگوریتم PSO مقایسه شد که عملکرد بهتر الگوریتم GWO را نشان داد.

## مراجع

- [1] J. Nanda and L.C. Saikia, "Comparison of Performances of Several Types of Classical Controller in Automatic Generation Control for an Interconnected Multi-Area Thermal System," in Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, NSW, 2008.
- [2] B.H. Bakken and O.S. Grande, "Automatic Generation Control in a Deregulated Power System," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 1401-1406, 1998.
- [3] M.L. Kothari, P.S. Satsangi and J. Nanda, "Sampled-Data Automatic Generation Control of Interconnected Reheat Thermal Systems Considering Generation Rate Constraints," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vols. PAS-100, no. 5, pp. 2334-2342, 1981.
- [4] J. Nanda, S. Mishra, P.G. Mishra and K.V. Sajith, "A novel classical controller for automatic generation control in thermal and hydrothermal systems," in International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, New Delhi, 2010.
- [5] L.C. Saikia, S. Debbarma, M. Pathak, D.J. Borah, K.K. Kumar and M. Kumar, "Automatic Generation Control of an Interconnected Thermal System Using a New Classical Controller: A Preliminary Study," in 1st International Conference on Power and Energy in NERIST, Nirjuli, 2012.
- [6] H. Guolian, Q. Lina, Z. Xinyan and Z. Jianhua, "Application of PSO-Based Fuzzy PI Controller in Multi-area AGC System after Deregulation," in 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, 2012.
- [7] A. Kumar, A. Kumar and S. Chanana, "Genetic fuzzy PID controller based on adaptive gain scheduling for load frequency control," in International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, New Delhi, 2010.
- [8] R. Verma, S. Pal and S. Sathans, "Intelligent Automatic Generation Control of Two-Area Hydrothermal Power System using ANN and Fuzzy Logic," in International Conference on Communication Systems and Network Technologies, Gwalior, 2013.
- [9] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar and A. Jalili, "Multi-stage fuzzy PID power system automatic generation controller in deregulated environments," Energy