

طراحی کنترل کننده فازی بهینه شده برای بهبود کنترل خودکار بار- فرکانس در سیستم های چند ناحیه ای در شبکه قدرت با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری*

محمد عابدینی* و بهرام رشیدی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده. اهمیت کنترل فرکانس بار در سیستم قدرت الکتریکی برای خدمات کمکی بدون وقفه حیاتی است. یک کنترل کننده فرکانس بار از یک ناحیه به هم پیوسته تشکیل شده است که فرکانس را در حد دلخواه حفظ می کند و توان خط میان دو ناحیه را در یک مقدار مشخص شده نگه می دارد. نکته حائز اهمیت در این میان تنظیم پارامترهای کنترل کننده های به کار گرفته شده در این سیستم می باشد که بتواند در زمان کم و با نوسانات پایین خطای ایجاد شده در شبکه را به صفر برساند. امروزه به کارگیری هوش مصنوعی در صنایع مختلف به ویژه مهندسی رو به افزایش می باشد چرا که با هزینه کم و قدرت بالا می توانند مسائل پیچیده و غیرخطی را به راحتی تحلیل نمایند. از این رو در این مقاله از ترکیب کنترل کننده های فازی و الگوریتم بهینه سازی جدیدی که برگرفته از طبیعت می باشد جهت تنظیم پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی استفاده شده است تا بتواند به تغییرات بار به سرعت پاسخ داده و حتی در مقابل تغییر در پارامترهای (ادامه دارد)

سیستم مقاوم باشد و به صورت هوشمند و بدون نیاز به دخالت اپراتور سیستم پارامترهای کنترلر پیشنهادی را تنظیم نماید. برای نشان دادن عملکرد پیشنهادی نیز سه سناریو پیاده‌سازی شده است و روش پیشنهادی به خوبی میرایی سیستم را افزایش داده و خطای حالت ماندگار ناشی از اغتشاش در شبکه را در زمان کوتاه به صفر می‌رساند.

۱. مقدمه

بارهای الکتریکی شامل مصرف‌کنندگان انرژی هستند که از لوازم خانگی تا ماشین‌آلات صنعتی را شامل می‌شود. در سیستم تولید برق، بار به‌طور مداوم تغییر می‌کند و هدف، تطابق تغییرات تولید با تغییرات بار با حداقل هزینه است. به عبارت دیگر، سیستم قدرت متصل به هم باید تغییرات ولتاژ و فرکانس را در یک محدوده بسیار نزدیک حفظ کند. هنگامی که سیستم دچار اختلالات ناشی از تغییرات بار می‌شود، کنترل‌کننده‌های ژنراتور باید به سرعت عمل کنند تا تعادل را حفظ کرده و نوسانات تجربه‌شده توسط سیستم را کاهش دهند [۱]. کنترل سیستم انرژی الکتریکی به‌منظور به دست آوردن تطابق دقیق بین تولید و بار یک کار بسیار پیچیده است زیرا بار در هر ساعت یا حتی هر دقیقه تغییر می‌کند. تغییرات در توان اکتیو بر فرکانس تأثیر می‌گذارد درحالی‌که تغییرات در توان راکتیو بر ولتاژ تأثیر می‌گذارد. بنابراین هر دو ولتاژ و فرکانس به‌طور جداگانه کنترل می‌شوند. کنترل فرکانس بار (LFC)^۱ روشی برای کنترل فرکانس است که در توان اکتیو نقش خواهد داشت. در همین حال، تنظیم‌کننده ولتاژ (AVR)^۲ ولتاژ و توان راکتیو را کنترل می‌کند. کنترل فرکانس-بار توسط یک سیستم کنترل تولید خودکار (AGC)^۳ که توسط اپراتور سیستم اداره می‌شود انجام می‌شود. تعادل بین تولید و تقاضا به‌طور سنتی از طریق کنترل‌های خودکار روی دریچه‌های بخار یا دریچه‌های آب گاورنرهای سرعت به‌منظور تنظیم میزان بخار یا آب جاری به داخل توربین‌ها به دست می‌آید. از این رو، آن‌ها قدرت مکانیکی روی شفت ژنراتورهای توربو را کنترل می‌کنند [۲، ۳]. برنامه‌ریزی و کنترل تولید یکی از اجزای مهم عملیات روزانه سیستم قدرت است. هدف کلی AGC کنترل خروجی الکتریکی ژنراتورها است درحالی‌که با تغییر مداوم بار به روشی اقتصادی تنظیم آن پیاده‌سازی شود. اپراتور سیستم قدرت یا توزیع‌کننده‌ای که برق را از شرکت تولید خریداری می‌کند، آن را به مصرف‌کننده می‌فروشد که بیشتر اوقات با AGC تعامل می‌کند. به‌منظور حفظ مؤثر کنترل تولید در سیستم قدرت، AGC توسط خطای کنترل منطقه (ACE)^۴ هدایت می‌شود [۴].

¹ Load Frequency Control (LFC)

² Automatic Voltage Regulator (AVR)

³ Automatic generation control (AGC)

⁴ Area Control Error (ACE)

را می‌توان به‌عنوان سیستمی تعریف کرد که نشان‌دهنده مکانیسم یا اقدامی است که برای اطمینان از حداکثر صرفه‌جویی و جریان بهینه توان در یک شبکه قدرت به‌هم‌پیوسته که شامل تولید، انتقال و توزیع است، انجام می‌شود [۴، ۵]. تفاوت بین تولید و بار با استفاده از یک کنترلر انتگرال تناسبی (PI) که از خطای ACE به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند، جبران می‌شود. در عمل در دنیای واقعی، پارامترهای کنترلی کنترل‌کننده‌های فرکانس بار PI معمولی به‌صورت آنلاین با آزمون و خطا و تنها یک‌بار برای مدت زمان طولانی تنظیم می‌شوند. بنابراین، پارامترهای کنترلی به دست آمده ممکن است در طیف وسیعی از حوادث کارآمد نباشند. علاوه بر این، عملکرد دینامیکی چنین کنترل‌کننده‌هایی بعید است قابل قبول باشد. مجموعه‌ای از تحقیقات وجود دارد که به بهبود عملکرد گذرا کنترل فرکانس بار کمک می‌کند، فن‌های بهینه‌سازی مختلف برای بهینه‌سازی پارامترهای LFC مبتنی بر کنترل‌کننده PID مجهز به یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای تحت انواع اغتشاشات استفاده می‌شود که در ادامه بررسی شده است. در [۶] کنترل‌کننده LFC از نوع انتگرالی است و بهره کنترلی آن برای حفظ پایداری نسبت به عدم قطعیت پارامترها با استفاده از نظریه بازخورد انتخاب شده است. در این مقاله، به‌منظور کاهش نوسانات پاسخ به دلیل اختلالات بار در طول دوره گذرا، یک کنترل‌کننده پیش فاز به کنترل‌کننده LFC اضافه شده است. کنترل‌کننده PI مرسوم [۷] برای مطالعه عملکرد حالت پایدار پیاده‌سازی شده است و در دستیابی به خطای حالت پایدار صفر موفق است. اما واقعیت این است که یک تغییر مداوم در بار وجود دارد. از این‌رو کنترلرهای PI معمولی برای این عملیات نامناسب هستند [۸]. علاوه بر آن، سیستمی که توسط کنترل‌کننده PI کنترل می‌شود، با نوسانات فرکانس گذرا و فراجهدش مشخص می‌شود. چنین سیستم‌های دینامیکی که توسط سیستم منطق فازی (FL) ^۱ کنترل می‌شوند نتایج خوبی را ارائه می‌کنند و همچنین برای بسیاری از عدم قطعیت‌ها مناسب هستند. در [۹]، یک کنترل‌کننده غیرمتمرکز برای مسئله کنترل فرکانس بار پیشنهاد شده است که بر اساس روش‌های اغتشاش منفرد، به دست می‌آید. در [۱۰]. یک فیلتر قدرت هیبریدی پیشنهاد شده است که از فیلتر غیرفعال و فیلتر فعال تشکیل گردیده است. پارامترهای این فیلتر باید به نحوی تعیین می‌شود که هم اعوجاجات هارمونیک مینیم شود و هم ضریب قدرت ماکزیمم گردد لذا این کار با الگوریتم فرا ابتکاری چند هدفه انجام می‌شود. در [۱۱] کنترل‌کننده دو درجه آزادی PID را توسعه داده است که تشخیص و کنترل نقطه تنظیم را در حضور ورودی‌های اغتشاش را بهبود می‌بخشد. در [۱۲] یک کنترل‌کننده PID بهینه‌شده با روش بهینه‌سازی تکامل تفاضلی را برای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای پیشنهاد کرده است. در [۱۳] کنترل‌کننده PID بهینه‌شده ازدحام ذرات برای سیستم AVR مورد بحث قرار گرفته است. هدف

¹Fuzzy Logic (FL)

اصلی کنترل پیشنهادی این است که هزینه عملیاتی شامل مصرف سوخت ژنراتور با در نظر گرفتن توان خروجی هر واحد تولیدی در شرایط محدودیت تقاضای بار سیستم، حداقل باشد. در [۱۴، ۱۵]، عملکرد کنترلر PI ترکیب شده با کنترل فازی در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای حلقه بسته و حلقه باز تحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد سیستم با توجه به زمان نشست، درصد کاهش فراجهدش و تغییرات فرکانس حالت پایدار بهبود یافته است. در [۱۶] از روش جستجوی گرم شب‌تاب برای بهینه‌سازی بهره بهینه کنترل‌کننده PID استفاده شده است. در [۱۷] پارامترهای بهره یک کنترل‌کننده فازی-PID جدید برای AGC را در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با استفاده از فن بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری مدل‌سازی می‌کند. در [۱۸]، یک فن بهبود یافته از الگوریتم گرگ خاکستری برای تنظیم مقدار بهره پارامتر کنترل‌کننده PID مورد بررسی قرار گرفت که نتایج از عملکرد مناسب کنترل‌کننده حکایت می‌کند اما در مقابل تغییرات سریع همچنان زمان زیادی را برای میرا شدن نوسانات نیاز خواهد بود. کنترل‌کننده‌های مبتنی بر هوش مصنوعی اخیراً در حوزه مهندسی مورد توجه قرار گرفته‌اند، زیرا با هزینه‌های کم قابل پیاده‌سازی و اجرا هستند، علاوه بر ارائه عملکرد دینامیکی پایدار، قابل اعتماد و مقاوم در برابر تغییرات ناگهانی در سیستم نیز می‌باشند. این کنترلرها به‌طور حرفه‌ای می‌توانند مسائل فنی مختلف ناشی از غیرخطی‌ها و عدم قطعیت‌ها را نیز مدیریت کنند. به‌منظور دستیابی به بهترین کنترل ممکن، یک فن محاسباتی نرم مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ملخ برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌های پیشنهادی برای اهداف LFC پیشنهاد شده است که از یک روش ترکیبی فازی و PID بهره‌شده براساس الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبود داده شده جهت تنظیم کردن پارامترهای کنترلر پیشنهادی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پاسخ‌های حالت پایدار با کنترل‌کننده‌های پیشنهادی مشابه هستند، زیرا تغییرات فرکانس در هر دو ناحیه و انحراف توان خط اتصالی بین دو ناحیه به صفر خواهد رسید. با این حال، از نظر پاسخ‌گذرا، کمترین افت در فرکانس و توان انتقالی بعد از اغتشاش بار بر اساس ساختار فازی FPID ارائه شده به دست آمده است. به‌علاوه روش پیشنهادی در مقابل تغییرات بار در مقایسه با حالت بدون فازی عملکرد سریع‌تر و نوسانات کمتری را نمایش می‌دهد. ادامه مقاله به‌صورت زیر می‌باشد، در قسمت دوم مدل‌سازی سیستم دو ناحیه‌ای آورده شده است، در قسمت سوم کنترل‌کننده پیشنهادی مدل‌سازی می‌گردد، روش بهینه‌سازی IGOA در قسمت چهارم آورده شده است و در نهایت نتایج شبیه‌سازی در قسمت پنجم نمایش داده خواهد شد.

۲. مدل‌سازی سیستم دو ناحیه‌ای

اهمیت کنترل فرکانس بار (LFC) در سیستم قدرت الکتریکی برای خدمات کمکی بدون وقفه حیاتی است. یک LFC از یک ناحیه به هم‌پیوسته فرکانس را در حد دلخواه حفظ می‌کند و توان خط میان دو ناحیه را در یک مقدار مشخص شده نگه می‌دارد. این امر با تغییر توان خروجی از ژنراتور به منظور جبران هرگونه انحراف جزئی در تقاضای بار قابل مشاهده است. شبکه برق از ژنراتورهای الکتریکی به هم‌پیوسته تشکیل شده است. هرگونه خرابی ناشی از اختلالات یا تغییر در مصرف بار را می‌توان فوراً توسط LFC بین مصرف برق و تولید حس کرد و از قطع برق جلوگیری کرد [۱۹، ۲۰]. در ادامه مدل‌سازی اجزای مختلف سیستم دو ناحیه معرفی می‌گردد.

۱.۲. مدل ژنراتور. با استفاده از معادله نوسان یک ماشین سنکرون به اغتشاش کوچک و خطی سازی سیستم خواهیم داشت [۱۱]:

$$2H \frac{d\omega}{dt} = P_m(s) - P_e(s) \quad (1.2)$$

که در معادله (۱)، P_m توان ورودی روی شفت روتور، P_e توان الکتریکی عبوری از فاصله هوایی، H انرژی جنبشی بر ولت-آمپر نامی و ω انحراف سرعت سیستم می‌باشد.

۲.۲. مدل توربین. افزایش بار باعث کاهش سرعت ژنراتور می‌شود که منجر به افزایش گشتاور الکتریکی بیشتر از گشتاور مکانیکی می‌شود. این تفاوت در گشتاور باعث کاهش توان لازم برای تأمین بار می‌شود و در نتیجه نیاز به جبران گشتاور الکتریکی وجود خواهد داشت لذا گاورنر سیگنالی ارسال خواهد کرد تا دریچه را برای آب یا گاز ورودی به سیستم بیشتر باز کند تا بتوان گشتاور را متعادل کرد که سبب افزایش سرعت محرک اصلی برای رفع کمبود سرعت توسط توربین خواهد شد. گاورنر به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند هرگونه تغییر بار در سیستم را دنبال کند. هنگامی که بار افزایش می‌یابد، گاورنر سرعت را به‌طور همزمان تنظیم می‌کند. از این رو معادله توربین به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۱]:

$$P_{ref}(s) - P_e(s) = \frac{1}{\omega} \quad (2.2)$$

در معادله (۲)، P_{ref} توان مرجع و R تنظیم‌کننده سرعت گاورنر ژنراتور می‌باشد.

۳.۲. مدل بار. توان تولید شده برای تأمین انواع بارها مانند بارهای مقاومتی، خازنی و القایی استفاده می‌شود. برخی از بارها به فرکانس وابسته هستند و برخی دیگر نیز مستقل از فرکانس‌اند به‌عنوان مثال لامپ‌های رشته‌ای مستقل از فرکانس‌اند اما موتورهای القایی به فرکانس وابسته‌اند از این‌رو در مدل‌سازی بار خواهیم داشت [۲۱ و ۲۲]:

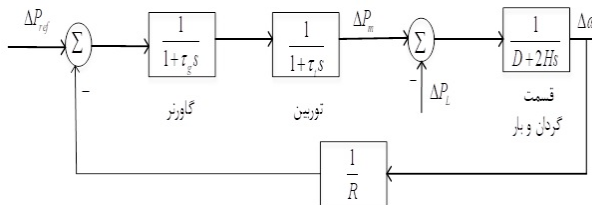
$$P_L(s) - P_e(s) = D\Delta\omega \quad (۳.۲)$$

در معادله (۳)، P_L بار مستقل از فرکانس و D درصد تغییرات بار به فرکانس می‌باشد.

۴.۲. محرک اصلی. محرک اصلی به‌عنوان نقطه اصلی تولید نیروی مکانیکی در سیستم مانند توربین هیدرولیک، توربین گاز و توربین بخار در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور مدل‌سازی توربین، تغییر توان مکانیکی می‌تواند به تغییر موقعیت دریچه بخار مربوط شود. بنابراین تابع تبدیل مربوط به محرک اصلی در ژنراتور را به‌صورت زیر می‌توان نوشت [۲۱ و ۲۲]:

$$G_e(s) = \frac{1}{1 + \tau_s s} \quad (۴.۲)$$

از کنار هم قرار دادن المان‌های بیان‌شده در این بخش می‌توان یک مدل ساده برای LFO به‌صورت شکل (۱) نمایش داد.



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم LFO برای سیستم یک ناحیه‌ای

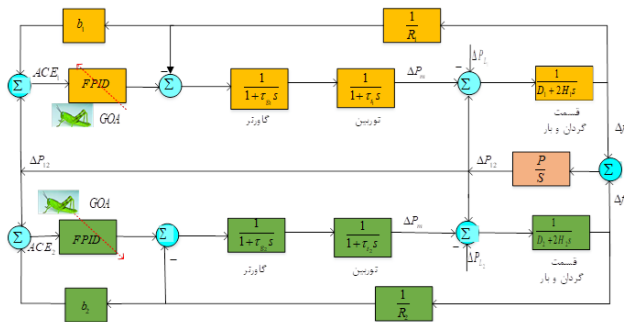
در این مقاله یک سیستم دو ناحیه‌ای برای مدل‌سازی انتخاب شده است، این دو ناحیه از طریق یک خط بدون تلفات با راکتانس X_{tie} به هم متصل می‌شوند. این خط به‌عنوان یک سنسور عمل می‌کند که اطلاعات مربوط به ناحیه‌های متصل شده را ارائه می‌دهد، تغییر در توان برنامه‌ریزی شده این خط نیاز به جبران در نواحی دیگر را نشان می‌دهد. تحت بهره برداری عادی سیستم، توان از طریق این خط ارتباطی که می‌تواند به‌صورت زیر نمایش داده شود مبادله می‌شود:

$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_1 + X_2 + X_{tie}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (5.2)$$

در رابطه (۵)، $|V_1|$ و $|V_2|$ اندازه ولتاژ در هر ناحیه؛ δ_1 و δ_2 زاویه ولتاژ هر ناحیه، X_1 و X_2 اندازه راکتانس معادل در هر ناحیه می‌باشد. خطی شده معادله (۵) به صورت معادله (۶) برای مطالعه توان عبوری از دو ناحیه مورد مطالعه قابل پیاده‌سازی باشد.

$$P_{12} = P(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (6.2)$$

P نشان‌دهنده شیب منحنی زاویه-توان است. لذا سیستم مدل شده در این مقاله یک سیستم دو ناحیه‌ای می‌باشد که در شکل (۲) نمایش داده شده است.

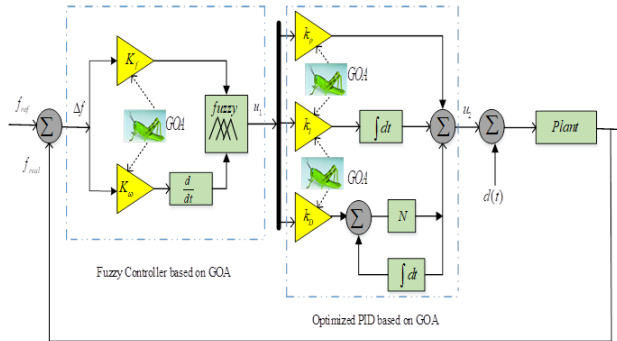


شکل ۲: بلوک دیاگرام سیستم LFO پیشنهادی برای سیستم دو ناحیه‌ای

معادلات حاکم بر سیستم دو ناحیه‌ای برحسب شکل (۲) به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$ACE_1 = b_1(\Delta f_1) + \Delta P_{12} \quad (7.2)$$

$$ACE_2 = b_2(\Delta f_2) + \Delta P_{21} \quad (8.2)$$



شکل ۳: بلوک دیاگرام سیستم FPID پیشنهادی

۳. کنترل‌کننده FPID بهینه‌شده پیشنهادی

در شکل (۳) بلوک دیاگرام سیستم LFO پیشنهادی برای سیستم دو ناحیه‌ای نمایش داده شده است که در آن یک بلوک تحت عنوان FPID ترسیم شده است که نشان‌دهنده کنترل‌کننده PID فازی بهینه‌شده با الگوریتم ملخ می‌باشد. که در آن پارامترهای PID توسط الگوریتم ملخ بهینه می‌شود و هم‌چنین تغییرات فرکانس و سرعت به‌عنوان ورودی سیستم فازی تعریف می‌شود که در ادامه بیان می‌گردد.

۱.۳. کنترل‌کننده PID. یک کنترلر PID^۱ یک مکانیسم بازخورد حلقه کنترل پرکاربرد در سیستم‌های کنترل صنعتی است. وظیفه اصلی آن تنظیم متغیرهای فرآیند مانند دما، جریان، فشار، سرعت و سایر موارد برای حفظ آن‌ها در یک نقطه تنظیم مطلوب است. معادله زیر تابع تبدیل یک PID را نمایش می‌دهد.

$$u_s = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \frac{Ns}{N+s} \right) e(s) \quad (۱.۳)$$

بر اساس مقدار خطا e_s ، کنترل‌کننده PID یک سیگنال کنترل را محاسبه می‌کند. این سیگنال ترکیبی از سه عبارت است:

عبارت تناسبی K_p : این عبارت متناسب با خطای فعلی است. یک خطای بزرگ‌تر منجر به یک عمل کنترل بزرگ‌تر می‌شود.

^۱Proportional-Integral-Derivative Controller (PID)

عبارت انتگرالی $\frac{K_i}{s}$: این عبارت خطاهای گذشته را جمع می‌کند. این به حذف خطاهای حالت ماندگار و بهبود دقت کمک می‌کند.

عبارت مشتقی K_d : این عبارت با در نظر گرفتن میزان تغییر خطا، خطاهای آینده را پیش‌بینی می‌کند. این ترم به کاهش میزان فراجهدش و بهبود پایداری کمک خواهد کرد.

یکی از معایب کنترل‌های PID معمولی این است که مدل‌سازی دقیق ریاضی سیستم برای یافتن نمایش فضای حالت سیستم مورد نیاز است. سیستم قدرت یک سیستم پویا است و ممکن است مدل ریاضی آن به‌طور دقیق قابل استخراج نباشد.

۲.۳. کنترلر منطق فازی پیشنهادی برپایه FPID. کنترل‌کننده‌های منطق فازی یک روش نوین و قدرتمند در کنترل سیستم‌ها هستند که بر اساس منطق فازی عمل می‌کنند [۲۳ و ۲۴]. در این مقاله از ترکیب کنترل‌کننده PID و روش فازی استفاده شده است، روش پیشنهادی برپایه FPID به‌خوبی میرایی سیستم را افزایش می‌تواند دهد و خطای حالت ماندگار ناشی از اغتشاش در شبکه را در زمان کوتاه به صفر برساند. به‌علاوه روش پیشنهادی در مقابل تغییرات بار در مقایسه با حالت بدون فازی عملکرد سریع‌تر و نوسانات کمتری را نمایش می‌دهد. ساختار کلی روش پیشنهادی به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:^۱

۱.۲.۳. اجزای اصلی یک کنترل‌کننده فازی.

- فازی‌سازی: در مسئله پیشنهاد شده انحراف فرکانس و مشتق آن به‌عنوان ورودی سیستم فازی مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شده است. ابزار واسط "ممدانی" در این کنترل‌کننده برای مرحله فازی سازی استفاده می‌شود.

$$\mu(\Delta f, \dot{\Delta f}) = \mu_{Ai}(\Delta f) * \mu_{Bi}(\dot{\Delta f}) \quad (2.3)$$

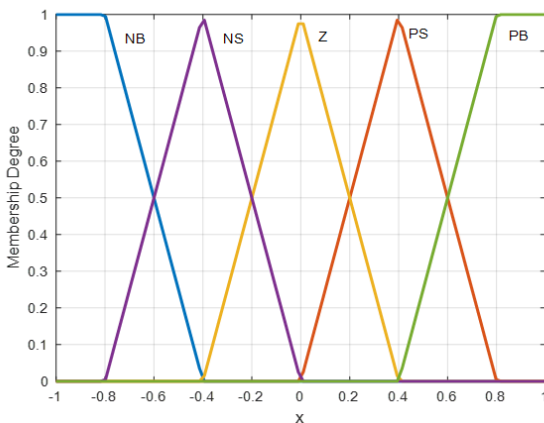
- پایگاه قواعد، یکی از اجزای اصلی یک سیستم کنترل‌کننده منطق فازی است. این قواعد به‌صورت "اگر-آنگاه" بیان می‌شوند. به‌عنوان مثال اگر انحراف فرکانس Δf صفر می‌باشد (Z) و تغییرات انحراف فرکانس نیز $\dot{\Delta f}$ صفر می‌باشد لذا سیگنال خروجی باید صفر Z باشد. یا به‌عنوان مثال دیگر اگر انحراف فرکانس Δf منفی بزرگ باشد (NB) و تغییرات انحراف فرکانس نیز $\dot{\Delta f}$ مثبت کوچک (PS) باشد لذا

¹Fuzzy Logic Controllers (FLC)

سیگنال خروجی باید منفی کوچک (NS) باشد که نتیجه آن کاهش خطای میان ورودی مرجع و خروجی سیستم در کنترل کننده پیشنهادی می باشد. سایر قوانین کنترلی (۲۵ عدد) در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: قوانین فازی برای کنترلر FPID

Δf					\dot{f}
PB	PS	Z	NS	NB	
Z	NS	NB	NB	NB	NB
PS	Z	NS	NB	NB	NS
PB	PS	Z	NS	NB	Z
PB	PB	PS	Z	NS	PS
PB	PB	PB	PS	Z	PB



شکل ۴: توابع عضویت برای ورودی و خروجی سیستم مورد مطالعه

- دفازی سازی: (Defuzzification) از معادله (۱۱) برای تبدیل مقدار خروجی فازی کنترل کننده به مقدار واقعی استفاده می شود.

$$\mu(\Delta f, \Delta f) = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{u}_i \min(\mu_{Ai}(\Delta f), \mu_{Bi}(\Delta f))}{\sum_{i=1}^n \min(\mu_{Ai}(\Delta f), \mu_{Bi}(\Delta f))} \quad (3.3)$$

که \hat{u}_i مقدار مرکزی خروجی فازی را نشان می‌دهد. خلاصه‌ای از فازی سازی در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵: خلاصه‌ای از روش فازی

۴. روش حل مسئله

بلوک دیاگرام سیستم LFO پیشنهادی برای سیستم دو ناحیه‌ای در شکل (۲) نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود در هر ناحیه پنج پارامتر تعریف شده است یعنی برای هر دو ناحیه در کل ده مجهول وجود خواهد داشت. الگوریتم‌های هوش ازدحامی که اخیراً پیشنهاد شده‌اند برای حل مدل‌های بهینه‌سازی به دست آمده از مسائل واقعی مختلف استفاده شده‌اند. در این مقاله، برای افزایش سرعت همگرایی کنترل‌کننده و نیز افزایش میرایی سیستم از یک الگوریتم جدید به نام الگوریتم بهینه‌سازی بهبود داده شده ملخ که در سال ۲۰۲۱ پیشنهاد شد استفاده می‌گردد [۲۶].

۱.۴. روش حل مسئله. الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA) ^۱ که در سال ۲۰۱۷ پیشنهاد شد، از رفتار دسته‌های ملخ در طبیعت برای حل مسائل بهینه‌سازی تقلید می‌کند [۲۵]. در GOA اصلی، تأثیر نیروی گرانش بر موقعیت به روز شده هر ملخ در نظر گرفته نمی‌شود، که احتمالاً باعث می‌شود GOA سرعت همگرایی کمتری داشته باشد. بر این اساس، GOA بهبودیافته (IGOA) ^۲ با دو به روزرسانی در موقعیت هر ملخ در [۲۶] معرفی گردید. اولین به روزرسانی این است که نیروی گرانش به موقعیت به روز شده هر ملخ در GOA اصلی وارد می‌شود. و دیگر اینکه سرعت در موقعیت به روز شده هر ملخ مدل‌سازی می‌گردد و موقعیت جدید از مجموع موقعیت فعلی و سرعت به دست می‌آید (معادله ۲۲). مراحل اجرای الگوریتم GOA به طور خلاصه در زیر آورده شده است:

¹Grasshopper Optimization Algorithm (GOA)

²Improved Grasshopper Optimization Algorithm (IGOA)

- ایجاد جمعیت اولیه: تعداد مشخصی ملخ به صورت تصادفی در فضای جستجو برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده FPID شامل پارامترهای PID و ضرایب وزنی فرکانس و تغییرات فرکانس (شکل ۳) ایجاد می‌شوند.

- محاسبه مقدار تابع هدف: برای هر ملخ، مقدار تابع هدف ارائه شده در معادله (۲۳) محاسبه می‌شود تا کیفیت جواب آن مشخص شود.

- به‌روزرسانی موقعیت ملخ‌ها: موقعیت هر ملخ در فضای جستجو را بر اساس معادلات حرکت الگوریتم IGOA که در معادله (۲۲) نمایش داده شده است به‌روزرسانی کنید. این معادلات شامل تأثیر نیروهای اجتماعی، گرانش (به سمت بهترین ملخ فعلی) و باد (حرکت تصادفی) است.

- توقف: اگر شرط توقف برآورده شود (مثلاً تعداد مشخصی تکرار یا رسیدن به یک دقت مشخص)، الگوریتم متوقف می‌شود و مقادیر بهینه برای پارامترهای کنترل کننده FPID شامل (K_p) ، (K_i) و (K_d) کنترلر PID، و نیز پارامترهای کنترلر فازی (K_f) و (K_w) را نشان می‌دهد.

در ادامه مدل ریاضی روش IGOA جهت حل مسئله پیشنهادی در این مقاله آورده شده است.

۲.۴. مدل‌سازی رفتار ملخ‌ها. برای داشتن یک موقعیت جدید از ملخ‌ها از معادله (۱۲) استفاده می‌کنیم:

$$x_i = r_1 G_i + r_2 A_i + r_3 S_i \quad (1.4)$$

که x_i ، S_i ، G_i و A_i نشان‌دهنده موقعیت ملخ i ، موقعیت اجتماعی ملخ i ، موقعیت بهترین ملخ و یک بردار تصادفی به ترتیب می‌باشد. و پارامترهای r_1 ، r_2 و r_3 اعداد تصادفی در بازه می‌باشد. موقعیت اجتماعی ملخ i نیز مشابه (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$S_i = \sum_{j=1}^n s(d_{ij}) \hat{d}_{ij} \quad (2.4)$$

$$d_{ij} = |x_i - x_j| \quad (3.4)$$

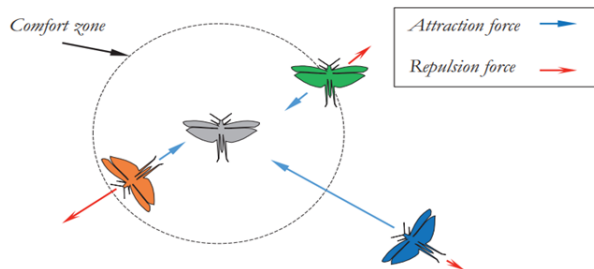
$$\hat{d}_{ij} = \frac{|x_i - x_j|}{d_{ij}} \quad (4.4)$$

که در آن N تعداد ملخ‌های دسته جمعی را نشان می‌دهد، d_{ij} فاصله بین ملخ i و ملخ j است. بردار واحد از ملخ i به ملخ j می‌باشد. فرض کنید d فاصله بین دو ملخ باشد. $d=2.079$ به منطقه آسایش گفته می‌شود که در آن نه جاذبه و نه دافعه بین دو ملخ وجود دارد. هنگامی که $d < 2.079$ دفع بین دو ملخ وجود دارد. وقتی $d > 2.079$ بین دو ملخ جاذبه وجود دارد. به‌ویژه، زمانی که d از 2.079 به تقریباً ۴ تغییر می‌کند، s افزایش می‌یابد. وقتی $d > 4$ کاهش می‌یابد. وقتی $d > 10$ ، s به صفر میل می‌کند و بنابراین s هیچ مقداری جهت جذب یا دفع ملخ‌ها ندارد. بنابراین فضای بین دو ملخ به منطقه دافعه و منطقه جاذبه مطابق شکل (۶) تقسیم می‌شود [۲۶]. برخی اصطلاحات به کار برده شده به‌صورت زیر در الگوریتم بهینه‌سازی ملخ تعریف می‌شوند:

بردار واحد سرعت باد: نشان‌دهنده تأثیر تصادفی بر حرکت ملخ‌ها است و به اکتشاف کمک می‌کند.

منطقه آسایش: نیروهای جاذبه و دافعه بین ملخ‌ها را بر اساس فاصله آن‌ها کنترل می‌کند.

نیروی گرانش: همه ملخ‌ها را به سمت بهترین راه‌حلی که تاکنون پیدا شده است، می‌کشد.



شکل ۶: الگوهای اصلاحی اولیه بین جمعیت در دسته‌ای از ملخ‌ها.

مقدار G_i در معادله ۱۲ به‌صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$G_i = -g \dot{e}_g \quad (5.4)$$

که در آن g ثابت گرانشی است و e_g یک بردار واحد را به سمت مرکز زمین نشان می‌دهد. مؤلفه A در معادله (۱۲) به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$A_i = w_i \quad (۶.۴)$$

که u نمایش ثابت رانش و w_i مقدار بردار واحد در جهت سرعت باد می‌باشد. با جایگذاری کردن روابط (۱۳) تا (۱۷) در معادله (۱۲) موقعیت هر ملخ در جمعیت از طریق رابطه (۱۸) محاسبه خواهد شد:

$$x_i^d = c \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{u_d^b - l_d^b}{d_{ij}} s(|x_i^d - x_j^d|) |x_i^d - x_j^d| - g \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{|x_i^d - x_j^d|}{d_{ij}} + \dot{T}_d \quad (۷.۴)$$

که u_d^b ، l_d^b کران پایینی و کران بالایی مؤلفه d ام i th ملخ هستند، \dot{T}_d مؤلفه d ام ملخ بهینه T است. پارامتر به‌روزرسانی c یک ضریب کاهش برای کوچک کردن منطقه آسایش، منطقه دافعه و منطقه جاذب است که از طریق معادله (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$c = c_{max} - t \frac{c_{max} - c_{min}}{T} \quad (۸.۴)$$

در معادله (۱۹)، t مرحله تکرار برنامه، T نیز کل تکرارهای برنامه، c_{max} و c_{min} مقادیر مینیمم و ماکزیمم پارامتر به‌روزرسانی می‌باشد.

۳.۴. به‌روزرسانی موقعیت ملخ‌ها. سرعت ملخ i th باعث می‌شود که موقعیت آن در طول فرآیند شکار به شرح زیر به‌روز شود:

$$v_i^d = cv_i^d + a * rand * (\dot{T}_d - x_i^d) \quad (۹.۴)$$

و موقعیت جدید ذرات مطابق معادله (۲۱) محاسبه می‌گردد:

$$x_i^d = x_i^d + v_i^d \quad (۱۰.۴)$$

۴.۴. به روزرسانی موقعیت ملخ‌ها. در نهایت براساس یک احتمال از بین دو جواب داده شده در معادله (۱۸) و (۲۱) یک جواب برای مرحله بعد از میان ذرات براساس (۲۲) انتخاب می‌گردد [۲۶].

$$x_i^d = \begin{cases} x_i^d + v_i^d & p > 0.5 \\ x_i^d \text{ based on equation (18)} & p \leq 0.5 \end{cases} \quad (11.4)$$

۵.۴. تابع هدف مسئله بهینه‌سازی تنظیم فازی پارامترهای کنترلر پیشنهادی. در طراحی کنترلرهای مدرن و برای هر سیستم کنترل شده، عملکرد پایدار و پاسخ سریع مورد نیاز است. با این حال، در عمل، هر دو الزام هرگز به‌طور همزمان قابل دستیابی نیستند. بنابراین، سازش بین پاسخ سریع و پایداری مناسب در هنگام طراحی یک کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود که با انتخاب یک کنترل‌کننده مناسب و طراحی آن با هدف به حداقل رساندن یک تابع هدف مناسب به کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی قابل دستیابی است. تابع هدف مورد استفاده برای تنظیم کنترلر عمدتاً بر یک معیار عملکرد متکی است که پاسخ حلقه بسته کلی سیستم را در نظر می‌گیرد. در این مقاله، تابع هدف استفاده شده در طراحی کنترلر پیشنهادی در معادله (۲۳) نمایش شده داده شده است.

$$ITAE = \int_{t=0}^{t=t_1} (|\Delta P_{tie}| + |\Delta f_1 + \Delta f_2|) * t * dt \quad (12.4)$$

۶.۴. مراحل روش پیشنهادی. در ادامه مراحل روش پیشنهادی جهت سیستم کنترل تولید خودکار ارائه شده است:

- مرحله ۱: بردار جواب اولیه با مقادیر تصادفی برای تنظیم ضرایب کنترلر LFC تعیین شود.
- مرحله ۲: تعیین حدود و نوع توابع فازی برای کنترلر FPID پیشنهادی
- مرحله ۳: دی فازی سازی برای پارامترهای کنترلر FPID براساس معادله (۱۱).
- مرحله ۴: به کمک روش بهینه‌سازی بهبود داده شده ملخ (معادلات ۱۲ تا ۲۱) متغیرهای مسئله به روز می‌شوند.
- مرحله ۵: در صورت رسیدن به شرط توقف (تعداد تکرار مشخص) نمایش نتایج در غیر این صورت برو به مرحله (۲).

جدول ۲: پارامترهای سیستم مورد مطالعه

Zone ۱	فرکانس	τ_{g1}	τt_1	R_1	P	H ۱
	۶۰Hz	۰/۷۵s	۰/۳۵s	۲/۲Hz/p.u	۰/۶pu	۸/۸s
Zone ۲	فرکانس	τ_{g2}	τg_2	R_2	P	H ۲
	۶۰Hz	۰/۶s	۰/۳s	۲Hz/p.u	۰/۶pu	۷/۲s

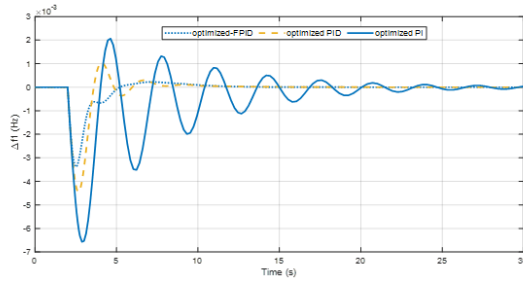
جدول ۳: پارامترهای روش بهینه‌سازی مورد مطالعه

تعداد ذرات	a	g	Cmin	Cmax
۴۵	۲	۰/۹	۰/۰۰۰۰۰۱	۱

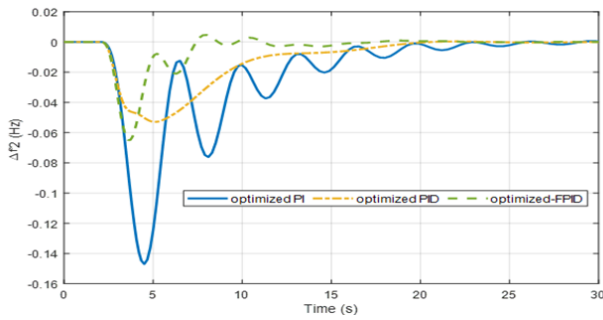
۵. شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب انجام شده است. اطلاعات سیستم دو ناحیه‌ای در جدول (۲) آورده شده است. اطلاعات مربوط به روش بهینه‌سازی IGOA و GOA در جدول (۳) نمایش داده شده است. یک تغییر بار ناگهانی ۱۰ درصد در ناحیه ۱ برای طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی با استفاده از الگوریتم IGOA اعمال می‌شود. هم‌چنین نتایج با روش‌های بهینه‌سازی پرندگان بهبود داده شده و نیز تفاضلی نیز مقایسه شده است [۲۷ و ۲۸]. ITAE به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است تا پارامترهای کنترل‌کننده‌های پیشنهادی را با استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده در بالا برای سیستم معرفی شده به دست آوریم. سه سناریو در این مقاله مورد مطالعه قرار داده شده است تا عملکرد روش پیشنهادی را ارزیابی کند در ابتدا در سناریو اول و دوم یک تغییر در بار ایجاد می‌شود. در سناریو آخر نیز هدف بررسی مقاوم بودن روش پیشنهادی برای تنظیم ضرایب کنترلر می‌باشد.

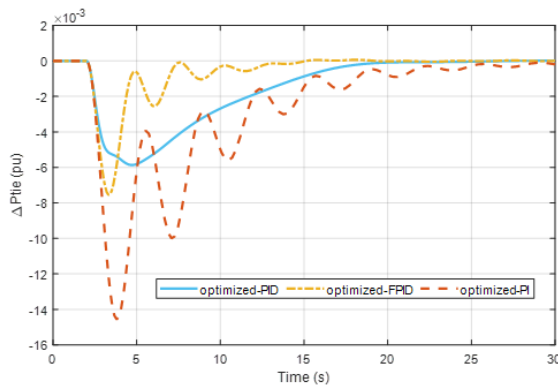
۱.۵. سناریو اول. در ابتدا در سناریو اول، مقدار بار با ۱۰ درصد افزایش بار مدل‌سازی می‌گردد. پارامترهای طراحی کنترلرهای پیشنهادی در محدوده [۰.۳] در نظر گرفته می‌شوند و ضریب فیلتر N در محدوده [۱۰۰-۵۰۰] مدل‌سازی شده است. در شکل‌های (۷) تا (۹) تغییرات فرکانس در دو ناحیه و میزان توان عبوری بین دو ناحیه را نمایش می‌دهد.



شکل ۷: تغییر فرکانس در ناحیه ۱ برحسب (Hz) بعد از افزایش بار



شکل ۸: تغییر فرکانس در ناحیه ۲ برحسب (Hz) بعد از افزایش بار



شکل ۹: تغییر توان خط اتصالی بین دو ناحیه بعد از افزایش بار

جدول ۴: پارامترهای کنترل‌کننده PI بهینه‌شده با روش IGOA

ناحیه ۲		ناحیه ۱	
K_{p2}	K_{I2}	K_{I1}	K_{p1}
۰/۱۲۱۱	۰/۲۱۷۱	۰/۲۹۹۸	-۰/۱۶۲۶

جدول ۵: پارامترهای کنترل‌کننده PID بهینه‌شده با روش IGOA

ناحیه ۲			ناحیه ۱		
k_{d2}	k_{I2}	k_{p2}	K_{d1}	K_{I1}	k_{p1}
۲/۱۶۸۰	۰/۲۰۵۲	۲/۳۳۷۵	۲/۴۵۵۴	۲/۱۳۱۲	۲/۸۲۱۶

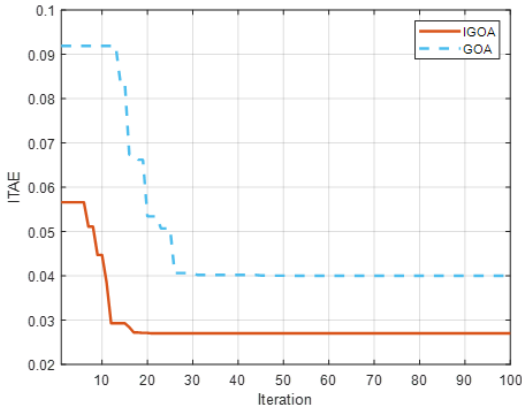
همان‌گونه که در شکل‌های (۷) تا (۹) دیده می‌شود طراحی ضرایب کنترل‌کننده پیشنهادی با روش FPID بهینه‌شده در مقایسه با دو حالت دیگر یعنی زمانی که تنها ضرایب کنترل‌کننده PID بهینه‌شده و یا ضرایب PI بهینه‌شده است تغییرات فرکانس و توان عبوری در خط واسط دو ناحیه بعد از وقوع یک تغییر ناگهانی در بار عملکرد سریع‌تری را داشته است. هم‌چنین افت فرکانس روش FPID بهینه‌شده و نیز فراجش آن در مقایسه از دو روش دیگر کمتر می‌باشد. افت فرکانس در ناحیه یک به کمک روش پیشنهادی تقریباً $0.032 -$ هرتز و در روش PID بهینه‌شده $0.042 -$ هرتز و در روش PI بهینه‌شده $0.064 -$ هرتز می‌باشد که نشان از عملکرد بهتر روش پیشنهادی می‌باشد. میزان توان عبوری در خط واسط بین دو ناحیه نیز به ترتیب برای روش‌های FPID بهینه‌شده، PID بهینه‌شده و PI بهینه‌شده $0.076 -$ ، $0.06 -$ و $0.142 -$ پریونیت می‌باشد. علاوه بر این، پاسخ گذرا سیستم با زمان نشست بهتر و فراجش کمتر بهبودیافته است. در جدول (۴) تا (۶) نیز ضرایب پارامترهای بهینه‌شده با IGOA آورده شده است. در شکل (۱۰) نیز مقدار تغییرات تابع هدف ITAE برای دو روش GOA و IGOA نمایش داده شده است که مقدار نهایی IGWO به 0.271 و مقدار نهایی GWO به 0.4 می‌رسد که در مقایسه با روش GOA که مقدار 0.4 است روش IGOA عملکرد بهتری را داشته است. سرعت همگرایی در روش IGWO نیز در مقایسه از روش GWO بهتر می‌باشد که در شکل (۱۰) دیده می‌شود در زمان ۱۷ ثانیه روش IGWO همگرا می‌گردد.

جدول ۶: پارامترهای کنترل‌کننده FPID بهینه‌شده با روش IGOA

ناحیه ۲						ناحیه ۱					
N_2	k_{D2}	k_{I2}	k_{P2}	$k_{\omega 2}$	k_{f2}	N_1	k_{D1}	k_{I1}	k_{P1}	$k_{\omega 1}$	k_{f1}
۴۴	۲/۱۰۰۵	۰/۹۰۲۹	۱/۲۶۷۸	۱/۳۸۰۷	۱/۱۶۲۷	۳۹۲	۱/۲۶۷۸	۱/۸۹۲۶	۲/۹۹۲۱	۱/۵۲۴۶	۱/۲۳۷۱

جدول ۷: پارامترهای کنترل‌کننده FPID با روش های مختلف بهینه‌شده

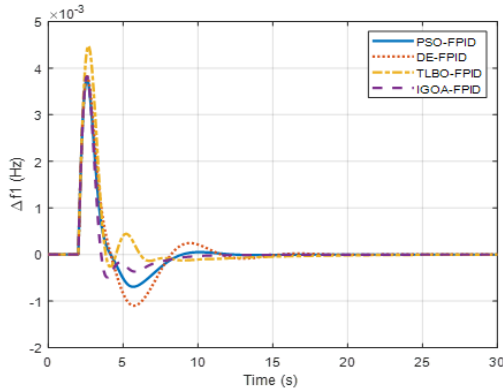
ناحیه ۲						ناحیه ۱						روش
N_2	k_{D2}	k_{I2}	k_{P2}	$k_{\omega 2}$	k_{f2}	N_1	k_{D1}	k_{I1}	k_{P1}	$k_{\omega 1}$	k_{f1}	
۴۴۹	۲/۲۸۱۰	۰/۲۳۳۸	۲/۹۱۰۴	۲/۹۴۰۲	۲/۷۵۱۰	۴۰۳	۲/۵۱۷۸	۲/۶۰۴۹	۲/۵۸۷۵	۲/۸۰۴۶	۱/۳۹۴۲	IGOA
۲۹۹	۲/۴۹۲۶	۰/۳۵۵۲	۱/۵۵۸۲	۱/۷۶۱۴	۱/۳۰۴۵	۲۷۹	۱/۷۸۹۶	۱/۲۷۰۰	۲/۰۷۱۰	۲/۴۶۲۰	۱/۷۰۶۱	PSO
۲۰۹	۰/۶۲۲۰	۱/۰۳۴۸	۱/۷۷۱۶	۱/۹۱۳۷	۱/۳۹۸۲	۲۴۳	۲/۸۲۹۷	۲/۷۴۱۴	۱/۰۷۲۳	۱/۲۶۱۷	۰/۹۹۷۵	TLBO
۳۲۷	۲/۱۷۱۴	۰/۰۶۸۷	۲/۲۳۹۱	۲/۳۵۵۱	۲/۰۷۷۵	۱۹۴	۲/۰۹۱۵	۲/۵۴۰۳	۱/۷۰۱۳	۱/۹۴۲۸	۱/۳۵۵۰	DE



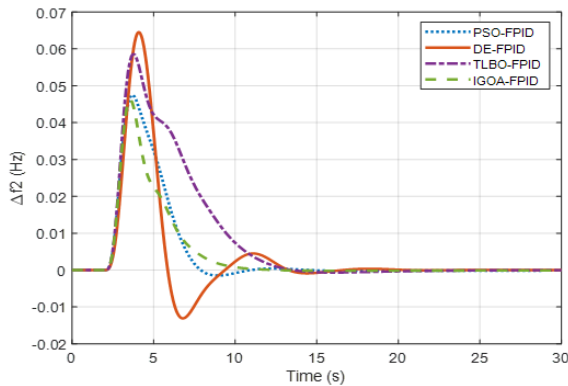
شکل ۱۰: تغییرات تابع هدف مسئله بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر پیشنهادی

۲.۵. سناریو دوم. در این سناریو برخلاف حالت قبل، بار ۱۰ درصد در زمان ۲ ثانیه به یک‌باره کاسته شده است در نتیجه فرکانس شبکه افزایش داشته است. کنترلر FPID بهینه‌شده با روش IGOA به‌خوبی توانسته است نوسانات را میرا نماید که نتایج در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش FPID بهینه‌شده با روش IGOA دارای پاسخ فرکانسی بهتر بوده است و در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم پرندگان (PSO)، الگوریتم تفاضلی (DE) و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش (TLBO) مقدار تابع هدف آن کاهش بیشتری را نشان داده است. پارامترهای بهینه شده در جدول (۷) آورده شده است.

زمان زیرجهش (Ush هرتز)، زمان فراجش (Osh هرتز)، و زمان نشست (Ts ثانیه) پاسخ دینامیکی سیستم مورد مطالعه در جدول (۸) نشان داده شده است. هم‌چنین برخی اطلاعات دیگر نیز هم چون مقدار ITAE و مقدار خطای نهایی سیستم نیز آورده شده است. همان‌گونه که در جدول (۸) نمایش داده شده است روش IGOA دارای زمان نشست $۸/۰۴۹$ ثانیه می‌باشد که در مقایسه با روش‌های دیگر مقدار کمتری است به علاوه مقدار ITAE نیز $۰/۰۴۰۳$ می‌باشد. در هر چهار روش مقدار خطای نهایی نیز در هر سه متغیر توان انتقالی، فرکانس ناحیه یک و دو به صفر رسیده است. یک فراجش ناچیز در پاسخ دینامیکی به دست آمده بر اساس چهار کنترل‌کننده پیشنهادی مشاهده می‌شود. با توجه به افت فرکانس در ناحیه دو، ساختارهای پیشنهادی پاسخ‌های رضایت‌بخشی با برتری روش فازی FPID بهینه‌شده بر اساس IGOA نسبت به سه ساختار دیگر ارائه کرده‌اند.



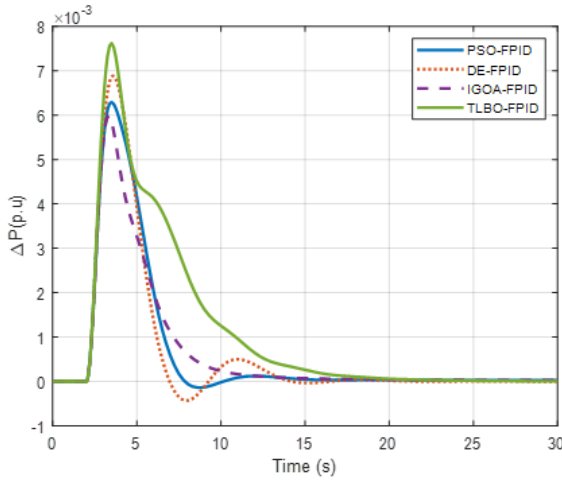
شکل ۱۱: تغییر فرکانس در ناحیه ۱ برحسب (Hz) بعد از کاهش بار



شکل ۱۲: تغییر فرکانس در ناحیه ۲ برحسب (Hz) بعد از کاهش بار

انحراف توان خط اتصال سیستم در شکل (۱۳) نشان داده شده است که در آن برتری روش پیشنهادی بر دیگر کنترل کننده ها مشاهده می شود.

۳.۵. سناریو سوم. در این سناریو هدف بررسی مقاوم بودن روش پیشنهادی برای تنظیم ضرایب کنترلر پیشنهادی می باشد. در این حالت پارامترهای سیستم مورد مطالعه هم چون ثابت زمانی گاورنر، ضریب میرایی سیستم و اینرسی سیستم ۳۰ درصد افزایش داده شده است تا عملکرد کنترلر پیشنهادی بررسی شود. لازم به ذکر است که افزایش میرایی سیستم سبب کاهش انحراف فرکانس می شود، افزایش اینرسی سیستم سبب می گردد تا پاسخ فرکانسی سیستم را کاهش یابد و



شکل ۱۳: تغییر توان خط اتصالی بین دو ناحیه بعد از کاهش بار

جدول ۸: ارزیابی پارامتر مهم در بررسی پاسخ دینامیکی سیستم مورد مطالعه برحسب (Δf)

روش	Ush	Osh	Ts	ITAE	مقدار خطای نهایی
IGOA	-۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۳۸۱	۸/۰۴۹	۰/۰۴۰۳	۰
[۳۰] PSO	-۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۳۷۳	۹/۴۸۹	۰/۰۴۰۷	۰
[۲۰] TLBO	-۰/۰۰۰۰۲۵	۰/۰۰۴۴۶	۱۰/۱۷۸	۰/۰۴۱۱	۰
[۲۹] DE	-۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۳۸۲	۱۱/۷۸۹	۰/۰۴۸۱	۰

نیز افزایش ثابت زمانی گاورنر سبب افزایش انحراف فرکانسی سیستم خواهد شد. در شکل (۱۴) نتایج تغییرات فرکانس و توان عبوری میان دو ناحیه نمایش داده شده است و همان گونه که در شکل دیده می شود کنترلر فازی بهینه شده با IGOA به خوبی توانسته سیستم را پایدار نماید و به علاوه خطای ماندگار سیستم را به صفر برساند، هم چنین میزان فراجهدش سیستم و نیز زمان نشست سیستم نیز در رنج مناسب می باشند. در جدول (۹) نیز مقایسه ای میان روش پیشنهادی بر پایه PID مرسوم و روش FPID انجام شده است که نشان می دهد روش FPID داری پاسخ عالی به تغییرات بار می باشد اما در روش PID زمان بیشتری نیاز خواهد داشت، همچنین در مقابل عدم قطعیت روش

جدول ۹: مقایسه میان روش‌های PID و FPID

مقاومت به عدم قطعیت	پیچیدگی محاسباتی	پاسخ به تغییرات بار	روش
خوب	زیاد	خوب	FPID
ضعیف	کم	متوسط	PID

PID پاسخ مناسبی نخواهد داشت. از لحاظ پیچیدگی محاسبات روش FPID پیچیدگی بیشتری جهت پیاده‌سازی خواهد داشت.

۶. نتیجه‌گیری

کنترل فرکانس بار یک جنبه حیاتی در عملکرد سیستم قدرت است. هدف آن حفظ فرکانس سیستم و مبادلات برق خطوط متصل میان نواحی مختلف شبکه قدرت در محدوده قابل قبول است. انحرافات فرکانس به دلیل تغییرات بار، قطع شدن واحد تولید و سایر اختلالات رخ می‌دهد. از این رو به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های PID مناسب جهت به صفر رساندن تغییرات فرکانسی امری مهم می‌باشد. در این مقاله از یک روش ترکیبی فازی و PID بهینه‌شده براساس الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبود داده‌شده جهت تنظیم کردن پارامترهای کنترلر پیشنهادی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده نشان داد که پاسخ‌های حالت پایدار با کنترل‌کننده‌های پیشنهادی مشابه هستند، زیرا تغییرات فرکانس در هر دو ناحیه و انحراف توان خط اتصالی بین دو ناحیه به صفر خواهد رسید. با این حال، از نظر پاسخ گذرا، کمترین افت در فرکانس و توان انتقالی بعد از اعمال یک اغتشاش بار، بر اساس ساختار فازی FPID ارائه‌شده به دست آمده است. به‌علاوه روش پیشنهادی در مقابل تغییرات بار در مقایسه با حالت بدون فازی عملکرد سریع‌تر و نوسانات کمتری را نمایش می‌دهد. همچنین کنترل‌کننده پیشنهادی در مقابل عدم قطعیت در پارامترهای سیستم نیز ارزیابی گردید که به‌خوبی توانست نوسانات را میرا نماید.

مراجع

- [1] Dewangan S, Prakash T, Pratap Singh V. Design and performance analysis of elephant herding optimization based controller for load frequency control in thermal interconnected power system. *Optim Control Appl Meth.* 2021; 42.
- [2] Mishra, R.N.; Chaturvedi, D.K.; Kumar, P. Recent Philosophies of AGC Techniques in Deregulated Power Environment. *J. Inst. Eng. Ser. B* 2020, 101, 417–433.

- [3] Khan, I.A.; Mokhlis, H.; Mansor, N.N.; Illias, H.A.; Jamilatul Awal, L.; Wang, L. New Trends and Future Directions in Load Frequency Control and Flexible Power System: A Comprehensive Review. *Alex. Eng. J.* 2023, 71, 263–308
- [4] Ghasemi-Marzbali, A. Multi-Area Multi-Source Automatic Generation Control in Deregulated Power System. *Energy* 2020, 201, 117667.
- [5] Sumit Nema, Vivek Prakash, Hrvoje Pandžić, The role of thermostatically controlled loads in power system frequency management: A comprehensive review, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol 42, 2025.
- [6] Stankovic, A. M., G. Tadmor, and T. A. Sakharuk, "On Robust Control Analysis and Design for Load Frequency Regulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, no. 2, pp. 481-489, May 1998.
- [7] Trinh, H. and Aldeen, M. "Decentralized Load-Frequency Control of Interconnected Power Systems," *IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, Vol. 2, pp. 815-820, 1991.
- [8] Aldeen, M. "Interaction Modeling Approach to Distributed Control with Application to Power Systems," *International Journal Control*, Vol. 53, pp. 1035-1054, 1991.
- [9] Parveen Dabur, Naresh Kumar Yadav, Ram Avtar. "Matlab Design and Simulation of AGC and AVR For Single Area Power System with Fuzzy Logic Control," *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*. January 2012.
- [10] Hoseinpour, A., Rahmatikakhkha, P. harmonic distortion Improvement and power factor increasing by modifying the hybrid filter structure by using fuzzy multi-objective meta-heuristic algorithms. *Fuzzy Systems and its Applications*, 2023; 6(2): 149-166. doi: 10.22034/jfsa.2024.394284.1174.
- [11] Hiroi, K.; Togari, Y. Two Degrees of Freedom PID Algorithm with Compound Filter. *Trans. Soc. Instrum. Control. Eng.* 1991, 27, 402–408.
- [12] Sahu, R.K.; Panda, S.; Rout, U.K. DE optimized parallel 2-DOF PID controller for load frequency control of power system with governor dead-band nonlinearity. *Int. J. Electr Power Energy Syst.* 2013, 49, 19–33.
- [13] Soundarrajan, A., Sumathi, S., Sundar, C.: "Particle swarm optimization based LFC and AVR of autonomous power generating system," *Int. J. Comput. Sci.*, 2009, 37, (1).
- [14] Qian, K, Z Hou, J Liang, R Liu, D Sun. Interior Sound Quality Prediction of Pure Electric Vehicles Based on Transfer Path Synthesis. *Applied Sciences*. 2021.
- [15] Wang, S., Dong, Z. Y., Luo, F. K. Meng, and Y. Zhang, "Stochastic collaborative planning of electric vehicle charging stations and power distribution system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, pp. 321-331, 2018.

- [16] Panda, R.K., Pradhan, S, 'A novel firefly algorithm and pattern search technique for automatic generation control of multi-area power system', *Electr. Power Energy Syst.*, 2015, 64, pp. 9–23.
- [17] Sahu, B.K., Pati, S., Mohanty, P.K., et al.: 'Teaching–learning based optimization algorithm based fuzzy-PID controller for automatic generation control of multi-area power system', *Appl. Soft Comput.*, 2015, 27, pp. 240–249.
- [18] Guha, D., Roy, P. K., Banerjee, S. (Load frequency control of large scale power system using quasi-oppositional grey wolf optimization algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2016,19(4), 1693 1713.
- [19] Chen G, Li Z, Zhang Z, Li S, An improved ACO algorithm optimized fuzzy PID controller for load frequency control in multi area interconnected power systems. *IEEE Access* 8:6429–6447,2020.
- [20] Sidhartha Panda, "Design and analysis of fuzzy PID controller with derivative filter for AGC in multi-area interconnected power system," *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, Vol. 10, Iss. 15, pp. 3764–3776 The Institution of Engineering and Technology 2016.
- [21] Gottapu K, Chennamsetty DP, Isukapalli KK, Gorle PK, Nakka S, Chinta DP Load frequency control of interconnected power system with renewables using improved fractional integral controller. *Int J Renew Energy Res*,13(1):392–400,2023.
- [22] Saadat, H. *Power system analysis*: McGraw-Hill.1999.
- [23] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich. *Fuzzy Control*. California, USA: Addison Wesley Longman Inc. 1998.
- [24] Bezdec, J. C. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press, 1981.
- [25] Shahrzad Saremi, Seyedali Mirjalili, Andrew Lewis, *Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application*, *Advances in Engineering Software*, Volume 105,2017, Pages 30-47.
- [26] Qin, P., Hu, H. Yang, Z. The improved grasshopper optimization algorithm and its applications. *Sci Rep* 11, 23733, 2021.
- [27] Panda, S., Mohanty, B., Hota, P.K.: 'Hybrid BFOA–PSO algorithm for automatic generation control of linear and nonlinear interconnected power systems', *Appl. Soft Comput.*, 2013, 13, pp. 4718–4730.
- [28] Rout, U.K., Sahu, R.K., Panda, S.: 'Design and analysis of differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power system', *Ain Shams Eng. J.*, 2013, 4, pp. 409–421.
- [29] Ghosal, S.P. , Application of GA/GA-SA based fuzzy automatic generation control of a multi-area thermal generating system. *Electr Power Syst Res*, 70 (2) (2004), pp. 115-127.
- [30] Abumeteir HA, Vural AM. Design and Optimization of Fractional Order PID Controller to Enhance Energy Storage System Contribution for Damping Low-Frequency Oscillation in Power Systems Integrated with High Penetration of Renewable Sources. *Sustainability*. 2022; 14(9):509.