

Enhancing Stability of Microgrid with a Novel Multi-Objective Fuzzy Controller for Integration of High Penetration Renewable Energies

Mohammad Tolou Askari, Yousefali Javanighadeikolaie, Meysam Amirahmadi, Majid Babaeinik
Islamic Azad university

Abstract:

Abstract: Frequency load management is a critical challenge in the field of engineering and power system operation. This study introduces a new approach to address this issue using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. By employing a multi-objective cost function, this method optimizes the benefits of state feedback matrix. Additionally, the proposed cost function strategically places the closed-loop system poles within a defined range to accelerate frequency stability and minimize power transfer differentials between regions. To minimize the specified cost function, an optimal teaching-learning-based optimization strategy is adopted. Furthermore, the integration of fuzzy logic techniques for combining essential objective functions is recommended. The evaluation of the proposed method involves applying the controller to a two-area power system while considering governor saturation constraints and comparing the results with those of a traditional PI controller. Simulation results emphasize the effectiveness of the proposed approach, demonstrating improvements in system features such as settling time and peak response time.

Keywords: Virtual Controller Design, Frequency Control, State Feedback Controller, Optimization Algorithm.

Submit date: 2024/05/19
Accepted date: 2024/10/06

Corresponding author's name: Mohammad Tolou Askari
Corresponding author's address: Islamic Azad university, Iran

بهبود کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت با استفاده از ترکیب بازخورد حالت و بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر سیستم استنتاج فازی

نوع مطالعه: پژوهشی

یوسفعلی جوانی قادیکلانی^۱، محمد طلوع عسکری^{۱*}، میثم امیراحمدی، مجید بابایی نیک^۱

^۱ گروه مهندسی برق و الکترونیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

چکیده: این مقاله به بررسی مدیریت بارهای فرکانسی در سیستم‌های قدرت پرداخته و یک روش جدید برای طراحی کنترل‌کننده بار فرکانس ارائه می‌دهد. در این روش، از ترکیب بازخورد حالت و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بهره‌گیری شده است. سیستم استنتاج فازی نیز برای ادغام توابع هزینه مختلف و بهبود دقت بهینه‌سازی به کار رفته است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر روی یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با محدودیت‌های گاورنر غیرخطی نشان می‌دهد که این روش می‌تواند انحرافات فرکانسی را به طور مؤثر کاهش داده و پایداری سیستم را افزایش دهد. نتایج حاکی از بهبود چشمگیر عملکرد دینامیکی سیستم قدرت می‌باشد. این تحقیق از یک روش ترکیبی بازخورد حالت و الگوریتم PSO استفاده کرده است. ابتدا، الگوریتم PSO مقادیر تابع هدف چندگانه را برای هر راه‌حل اختصاص می‌دهد. سپس، این مقادیر به سیستم استنتاج فازی وارد شده و مقدار شایستگی نهایی برای هر راه‌حل محاسبه می‌شود. این رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه را به یک هدف تک‌هدفه تبدیل می‌کند و از توابع عضویت فازی و قوانین استنتاج برای این کار بهره می‌برد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند به طور مؤثر انحرافات فرکانسی را کاهش داده و پایداری سیستم قدرت را بهبود بخشد. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم دو ناحیه‌ای نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های توسعه‌یافته توانسته‌اند عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌های PI مرجع داشته باشند و انعطاف‌پذیری بالایی در برابر تغییرات پارامترهای سیستم از خود نشان دهند.

کلیدواژه‌ها: طراحی کنترل‌کننده مجازی، کنترل فرکانس، کنترل‌کننده بازخورد حالت، الگوریتم بهینه‌سازی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد طلوع عسکری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: گروه مهندسی برق و الکترونیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۱- مقدمه

در دوران معاصر، همانطور که سیستم های قدرت در مقیاس و پیچیدگی رشد می کنند، نیاز مبرمی برای پاسخگویی به مجموعه متنوعی از بارهای مصرف کوچک و بزرگ وجود دارد. این بارها بخش های مختلفی را شامل می شود که حوزه های مسکونی، تجاری و صنعتی را در بر می گیرد. در نتیجه، تمرکز به سمت اطمینان از قابلیت اطمینان و پایداری قوی شبکه برق در میان دینامیک داخلی و اختلالات خارجی تغییر می کند. اهمیت افزایش یافته است. یکی از مهمترین ویژگی های حاکم بر عملکرد سیستم قدرت، ثبات فرکانس سیستم است که نشان دهنده حداقل انحراف در حاشیه های قابل قبول است. به عبارت دیگر، حفظ یک فرکانس ثابت در محدوده های تعریف شده برای بهینه سازی عملکرد سیستم قدرت ضروری است. حفظ فرکانس در مقدار اسمی آن سرعت عملکرد ثابت را برای موتورهای القایی و سنکرون تضمین می کند. این سازگاری برای تأسیسات نیروگاهی گاز، برق آبی و سیکل ترکیبی اهمیت خاصی دارد. علاوه بر این، در یک شبکه، کاهش قابل توجه فرکانس باعث ایجاد جریان های مغناطیسی قوی در موتورهای القایی و ترانسفورماتورها می شود [۱]. تعادل تولید و مصرف توان فعال، ثبات فرکانس را در یک شبکه برق دیکته می کند. با توجه به ماهیت فراگیر فرکانس در سراسر سیستم، تغییرات در تقاضای توان فعال در هر نقطه مشخص به صورت نوسانات فرکانس در سراسر شبکه ظاهر می شود. علاوه بر این، در سیستم های قدرت به هم پیوسته که شامل چندین ناحیه کنترل مجزا هستند، حفظ سطوح انتقال نیرو بین مناطق همسایه در کنار تنظیم فرکانس ناحیه فردی ضروری است. مکانیزم کنترل خودکار، که وظیفه اصلاح ناهماهنگی های بین مصرف و تولید را با تنظیم خروجی ژنراتور، و در نتیجه حفظ مقادیر اسمی فرکانس و توان انتقال در خطوط دارد، کنترل فرکانس (LFC) یا کنترل تولید

خودکار (AGC) نامیده می شود. در سیستم های قدرت، هدف اصلی کنترل بار فرکانس دو مورد است: کاهش انحرافات فرکانس و تنظیم تبادل توان بین مناطق برای به حداقل رساندن ناکارآمدی شبکه.

۱-۱- پیشینه تحقیق

روش های فراوانی تاکنون برای رسیدگی به چالش کنترل بار فرکانس در سیستم های قدرت پیشرفت کرده اند [۱۳-۳]. در میان این رویکردها، کنترل کننده PI کلاسیک به عنوان یک انتخاب رایج در صنعت ظاهر می شود [۲]. این کنترل کننده ها که با یک پارامتر بهره ثابت که در شرایط اسمی تعیین شده است، کار می کنند، وقتی با تغییرات در پارامترهای سیستم، شرایط عملیاتی و عوامل غیرخطی مانند محدودیت های تولید و اشباع گاورنر مواجه می شوند، محدودیت هایی از خود نشان می دهند. در نتیجه، استراتژی های متعددی برای افزایش سازگاری این کنترل کننده ها با دینامیک سیستم در حال تکامل ابداع شده اند. به عنوان مثال، در [۳]، یک کنترل کننده یکپارچه برای از بین بردن خطاهای حالت پایدار و دستیابی به یک پاسخ سریع پیشنهاد شده است. علاوه بر این، [۴] از منطق فازی برای بهینه سازی بهره کنترل کننده انتگرال استفاده می کند. علاوه بر این، افزایش قابل توجهی در کاربرد تکنیک های هوشمند برای طراحی کنترل بار فرکانس در سیستم های قدرت در زمان های اخیر وجود داشته است [۸-۱۳]. این روش شناسی شامل استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی [۸، ۹]، منطق فازی [۱۰، ۱۱] و رویکردهای الهام گرفته از پدیده های بیولوژیکی است [۱۲، ۱۳]. به حداقل رساندن نوسانات ولتاژ و فرکانس در ریزش شبکه هنگام تغییر از حالت اتصال به شبکه به حالت خودپایدار بسیار مهم است. اطمینان از تعادل هماهنگ بین عرضه و تقاضا به عنوان یک معیار اصلی برای ارزیابی کارایی ریزش شبکه در هر دو حالت

عملیاتی است. این تعادل مستلزم حفظ پایدار در هر دو روش است [۱۲،۱۳]. در طول عملیات متصل به شبکه، مسئولیت حفظ تعادل بر عهده شبکه شهری است، در حالی که در حالت جزیره ای، ریزشبهه با تنظیم سطوح تولید یا کاهش مصرف این نقش را بر عهده می گیرد [۱۴،۱۵]. اگر منابع انرژی توزیع شده (DER) در یک ریزشبهه ایزوله برای پاسخگویی به تقاضا کافی نباشد، اجرای اقدامات کاهش بار ضروری می شود [۱۶،۱۷]. پیچیدگی های مدیریت ریزشبهه با اثربخشی و عملکرد مکانیسم های کنترل ترکیب شده است. همانطور که در [۱۷،۱۸] اشاره شد، ریزشبهه ها معمولاً در سطوح کنترل اولیه، ثانویه و ثالث کار می کنند. حتی در حالت جزیره ای، دو ردیف کنترل اولیه وظیفه رسیدگی به نوسانات ولتاژ و فرکانس، همراه با پیکربندی مجدد سیستم در پاسخ به تغییرات بار یا تولید را دارند. لایه کنترل ثالث بر مونتاژ و تنظیم اجزای ریزشبهه نظارت می کند و در عین حال که فاکتورهای اقتصادی و قابلیت اطمینان را در نظر می گیرد، ادغام آنها با شبکه اولیه را دیکته می کند. در حالی که [۱۹،۲۰] از کنترل کننده های غیرمتمرکز در طراحی ریزشبهه دفاع می کنند، [۲۱،۲۲] و [۲۳،۲۴] معماری های کنترل کننده متمرکز و پیکربندی های ریزشبهه ترکیبی را بررسی می کنند. نمونه هایی از سیستم های زمان بندی و مدیریت ریزشبهه شامل تکنیک های قطعی که در [۲۵،۲۶] و رویکردهای بالقوه به تفصیل در [۲۷،۲۸] آمده است. این روش شناسی، مدل سازی دقیق اجزای ریزشبهه را در حالی که عدم قطعیت های مؤثر بر آنها را در نظر می گیرد، اولویت می دهد. استراتژی های مختلفی برای زمان بندی و مدیریت ریزشبهه ها وجود دارد. در [۲۹]، محققان به استراتژی های کنترل ریزشبهه جزیره ای با هدف کاهش نوسانات فرکانس و توان می پردازند، در حالی که [۳۰] روش های کنترل فرکانس هوشمند را برای ریزشبهه های AC با استفاده از ترکیبی از بهینه سازی ازدحام ذرات و منطق فازی بررسی می کنند.

تمرکز [۳۱] به سمت کنترل و پایداری ریزشبهه بود، که شامل ترکیبی از میکروتوربین ها، سلول های سوختی و الکترولیزها بود که همگی توسط یک کنترل کننده فازی تنظیم می شدند [۳۱]. در همین حال، [۳۲] به بررسی پایداری ریزشبهه هیبریدی از طریق روش بازخورد حالت، شامل تعیین مقدار ویژه و تنظیمات پارامتر کنترل کننده برای ارزیابی پایداری سیستم پرداخت. [۳۳] یک استراتژی کنترل فرکانس پیشگام را ارائه می کند که برای ریزشبهه هایی که پائل های خورشیدی و توربین های بادی را یکپارچه می کنند، طراحی شده است. علاوه بر این، [۳۴] کاربرد نمونه برداری اینرسی را در ارتباط با مکانیسم های کنترل مکمل برای دستیابی به تنظیم فرکانس موثر در ریزشبهه ها بررسی می کند. در [۳۵]، محققان به پیچیدگی های کنترل فرکانس بار در یک سیستم قدرت چند منطقه ای دارای ژنراتورهای القایی دوگانه فدرال (DFIG) می پردازند. [۳۶] استفاده از مبدل های پشت سر هم در پیکربندی های ریزشبهه را بررسی می کند. با پرداختن به عدم وجود طراحی کنترل کننده تعیین شده، [۳۷] با چالش مدیریت فرکانس در ریزشبهه های جزیره ای با واحدهای ذخیره سازی انرژی مقابله می کند و عدم قطعیت ها را در نظر می گیرد. با استفاده از روش تکامل دیفرانسیل، [۳۷] یک رویکرد جدید برای تنظیم فرکانس ریزشبهه پیشنهاد می کند. علاوه بر این، [۳۸] کاهش بالقوه انتشار گازهای گلخانه ای را از طریق سرمایه گذاری های استراتژیک در فناوری منابع انرژی توزیع شده (DER) و استراتژی های مدیریت انرژی در ساختمان های با انرژی خالص صفر بررسی می کند.

۲-۱- انگیزه و مشارکت تحقیق

اکثر روش های طراحی ارجاع شده، مدل خطی سیستم های قدرت را در اولویت قرار می دهند در حالی که محدودیت های غیرخطی را نادیده می گیرند. این مطالعه یک رویکرد جدید

عددی روی سیستم قدرت نمونه در بخش پنجم به تفصیل آمده است. در نهایت، بخش ششم به ارائه سخنان نهایی مقاله اختصاص دارد.

۲- مدل سیستم قدرت دو منطقه‌ای

تحت شرایط عملیاتی استاندارد، سیستم قدرت مدیریت می شود تا با نیازهای توان مناطق مربوطه در فرکانس تعیین شده هماهنگ شود. سیستم مسیریابی فرکانس دو ناحیه ای بر اساس اصل تنظیم شیب خط ارتباطی عمل می کند، یعنی تمایل هر منطقه برای از بین بردن خطای کنترل در منطقه ACE خطای کنترل در هر منطقه به عنوان ادغام خطی انحراف فرکانس و تغییر توان در خط ارتباطی، مطابق با معادله (۱) مشخص می شود.

$$ACE_p = \Delta P_{p1} + B_p \Delta \omega_p \quad (1)$$

ضریب به عمد انتخاب شده است. در این معادلات، ΔP_{p1} نشان دهنده تفاوت بین مبادلات برق برنامه ریزی شده و فعلی است. خطاهای کنترل ناحیه به عنوان سیگنال های تحریک عمل می کنند و تنظیمات را در تنظیمات قدرت مرجع ایجاد می کنند. با رسیدن به تعادل، این خطاها به صفر همگرا می شوند. اجزای خاصی در سیستم کنترل بار فرکانس غیرخطی از خود نشان می دهند که به دلیل تأثیر قابل توجه آنها بر پایداری سیستم، نیاز به بررسی دارد. این اثرات غیرخطی شامل پهنای باند مرده، محدودیت های نرخ تولید و محدودیت های گاورنر می شود. تضمین ایمنی و دوام عملیاتی سیستم قدرت مستلزم گنجاندن محدودیت های گاورنر در مدل سازی است. شکل ۱ یک سیستم LFC دو منطقه ای را نشان می دهد که دارای محدودیت های گاورنر است.

برای طراحی کنترل کننده بار فرکانس معرفی می کند، با هدف کاهش انحرافات فرکانس و افزایش دینامیک سیستم قدرت با حسابداری برای محدودیت های غیرخطی. برای رسیدن به این هدف، یک روش طراحی ترکیبی از بازخورد حالت و الگوریتم بهینه سازی (PSO) پیشنهاد شده است. این روش از یک تابع هزینه چند هدفه و الگوریتم PSO برای بهینه سازی ماتریس کنترل بازخورد حالت استفاده می کند. علاوه بر این، منطق فازی در طراحی ادغام شده است تا هزینه های مورد نظر را ترکیب کند، و امکان تنظیم تأثیر هر جزء بر مشکل کلی را فراهم می کند. شبیه سازی های عددی بر روی یک سیستم قدرت دو ناحیه ای با محدودیت های گاورنر غیرخطی برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی انجام می شود. علاوه بر این، مقایسه با نتایج کنترل کننده PI کلاسیک برای نشان دادن قابلیت های روش پیشنهادی و الگوریتم PSO انجام می شود.

با توجه به مزایای روش پیشنهادی، این روش به دلیل سرعت همگرایی بالای الگوریتم PSO، توانایی بازخورد حالت در کنترل پویایی های سیستم، انعطاف پذیری سیستم استنتاج فازی در ترکیب توابع هدف چندگانه و عملکرد بهتر نسبت به کنترل کننده های سنتی، انتخاب شده است. این ترکیب می تواند به طور مؤثری انحرافات فرکانسی را کاهش داده و پایداری سیستم قدرت را در شرایط مختلف بهبود بخشد.

۳-۱- سازماندهی تحقیق

بخش بعدی دست نوشته یک نمای کلی و در عین حال مختصر از الگوریتم PSO ارائه می دهد. به دنبال این، بخش سوم چارچوب ساختاری یک سیستم قدرت دو منطقه ای را ارائه می دهد که محدودیت های اشباع گاورنر را در بر می گیرد. در بخش بعدی، روش ابداع یک کنترل کننده بازخورد حالت بهینه با استفاده از الگوریتم PSO توضیح داده شده است. علاوه بر این، یافته های شبیه سازی ها و بررسی های

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\tau_{g1}} & 0 & \frac{-1}{R_1 \tau_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau_{T1}} & \frac{-1}{\tau_{T1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_1} & \frac{-D_1}{M_1} & \frac{-1}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{12} & 0 & 0 & 0 & -T_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_{g2}} & 0 & \frac{-1}{R_2 \tau_{g2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau_{T2}} & \frac{-1}{\tau_{T2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_2} & 0 & \frac{-1}{M_2} & \frac{-D_2}{M_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & B_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

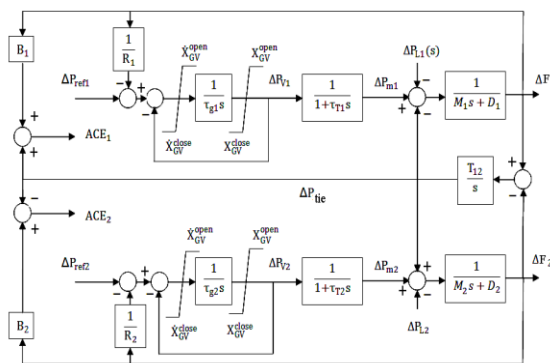
$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau_{g2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W = [0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

بر اساس مدل فضای حالت و مشخصات ماتریس بازخورد حالت، هر پارامتر کاوش شامل ۱۸ بعد است که هر بعد مربوط به وضعیتی در ماتریس بازخورد است. استفاده از بازخورد حالت، همانطور که در معادله (۳) مشخص شده است، در سیستم بار فرکانس نشان داده شده در شکل (۱) اجرا می‌شود.

$$u = [\Delta P_{ref1} \ \Delta P_{ref2}] = -Kx \quad (3)$$



شکل (۱) سیستم قدرت دو ناحیه ای با حد اشباع گاورنر

۳. طراحی بازخورد حالت بهینه با الگوریتم PSO

ایجاد پیکربندی بازخورد حالت برای شبکه قدرت دو منطقه ای مستلزم اطمینان از قرار گرفتن قطب های سیستم حلقه بسته در محدوده مشخص شده است که از طریق دستکاری ماتریس بازخورد حاصل می‌شود. هر دو نمایش غیر خطی نشان داده شده در شکل ۱ و مدل فضای حالت خطی سیستم فرکانس بار دو ناحیه ای باید گنجانده شوند. بیان شکل خطی سیستم فرکانس فرکانس، که در شکل (۱) نشان داده شده است، مستلزم حذف محدودیت های گاورنر در حالی که متغیرهایی نماینده حالت مورد نظر هستند را در بر می‌گیرد.

$$\{\dot{x} = Ax + Bu + W\Delta P_L, y = Cx \quad (2)$$

جایی که:

$$u = [\Delta P_{ref1} \ \Delta P_{ref2}]$$

$$x =$$

$$[\Delta P_{v1} \ \Delta P_{m1} \ \Delta \omega_1 \ \Delta P_{tie} \ \Delta P_{v2} \ \Delta P_{m2} \ \Delta \omega_2 \ \Delta A_1 \ \Delta A_2]$$

$$J_1 = \int_{t=0}^{t=t_f} t(C_1 |\Delta P_{tie}|) dt \quad (4)$$

$$J_2 = \int_{t=0}^{t=t_f} t(C_2 |\Delta \omega_1| + C_3 |\Delta \omega_2|) dt$$

$$J_c = J_1 + J_2 \quad (5)$$

برای قرار دادن قطب های سیستم در منطقه تعیین شده، یک معیار اضافی در تابع هزینه که در رابطه (۴) مشخص شده است، ادغام می شود که تعداد قطب های واقع در منطقه مورد نظر را نشان می دهد. در نتیجه، در هر تکرار الگوریتم، پس از محاسبه تابع استاندارد، قطب های سیستم با استفاده از مدل فضای حالت سیستم مشتق می شوند. پس از ارزیابی قرارگیری قطب ها در منطقه مشخص شده، تعداد قطب های واقع در خارج از این منطقه مشخص می شود:

$$J_{location} = J_c \times 0.01 \times (\text{number of poles at out of region}) \quad (6)$$

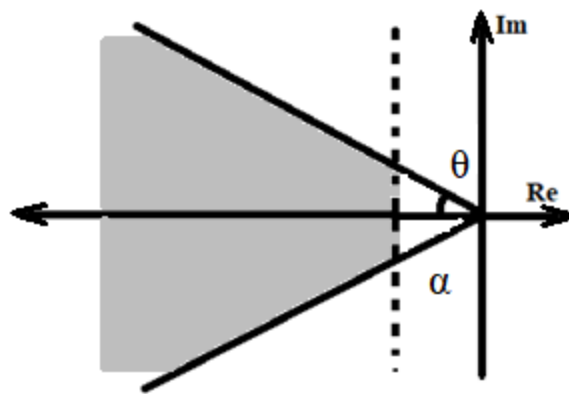
سپس تابع معیار طبق رابطه (۲۱) تعریف می شود.

$$J_{feedback} = J_{location} + J_1 + J_2 \quad (7)$$

۴- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات پیشرفته (PSO)

در این مقاله از الگوریتم PSO به دلیل پتانسیل زیاد آن برای یافتن راه حل بهینه برای مسائل غیرخطی استفاده شده است. این الگوریتم اصلاح شده بدترین موقعیت (B_{mn}^k) را در هر جستجو پیدا می کند و الگوریتم را قادر می سازد در تکرارهای بعدی از این موقعیت ها اجتناب کند [۲۰]. در نتیجه، راه حل بهینه ممکن سریعتر با تکرارهای کمتر پیدا می شود. رابطه (۸) مقدار اولیه سرعت ذره n و بعد m را در تکرار جریان

اولین محدودیت در این مسئله بر روی مقادیر عناصر ماتریس بازخورد است. برای شبیه سازی، مقدار k_{ij} هر عنصر فرض می شود $L_{ij} \leq k_{ij} \leq U_{ij}$. هدف این است که با اعمال بازخورد حالت به مقادیر $\Delta \omega_1$ ، $\Delta \omega_2$ و ΔP_{tie} بعد ΔP_{L1} به سمت صفر، و همچنین قرار دادن قطب های سیستم حلقه بسته با بازخورد حالت در ناحیه مورد نظر شکل ۲، طراحی شود.



شکل (۲) ناحیه مورد نظر برای موقعیت قطب های سیستم

قرار دادن قطب های سیستم در ناحیه مورد نظر شکل (۲) باعث افزایش تضعیف (تسریع انحراف فرکانس صفر)، بهبود پایداری سیستم در برابر تغییر پارامترهای سیستم و افزایش سرعت پاسخ گذرا سیستم می شود. تابع هزینه در نظر $\Delta \omega_2$ گرفته شده برای مسئله بهینه سازی ترکیبی از $\Delta \omega_1$ و ΔP_{tie} . این تابع در رابطه (۳) بیان شده است. برای محاسبه این تابع از مدل سیستم بار فرکانسی دو ناحیه ای با حد اشباع گاورنر در شکل ۱ استفاده شده است.

$$c_1^g(t) = (c_{1,start}^g - c_{1,end}^g) \times \tan\left(0.875 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.6}\right)\right) + c_{1,end}^g \quad (14)$$

$$c_2(t) = (c_{2,start} - c_{2,end}) \times \arctan\left(2.8 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.4}\right)\right) + c_{2,end} \quad (15)$$

بر خلاف الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی، PSO فقط برای دیدن نقطه بهینه نمی‌رود. به جای آن، در یک فضای جستجو دو بعدی به دنبال بهینه‌سازی به صورت هماهنگ و تعاملی بین پارامترهای عددی رفتار می‌کند. به این ترتیب، ویژگی اصلی PSO تعاملی بودن بین ذرات است. یکی از برتری‌های PSO در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر، سرعت همگرایی آن است. با توجه به تعامل و هماهنگی بین ذرات، الگوریتم PSO به سرعت به نقطه بهینه همگرا می‌شود. این در حالی است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر معمولاً توسط مشکلات مانند بدون خروج از گرفتاری و یا به اشتراک گذاشتن نقطه بهینه بین جمعیت در جایگاه الکتروپایه‌های خاص خود کاهش سرعت همگرایی خود را تجربه می‌کنند. همچنین، PSO می‌تواند برای مسائل بهینه‌سازی گسترده به کار برود، چرا که کارایی و کاربرد آن برای بهبود بهینه‌سازی در بسیاری از مسائل کاربرد دارد. همچنین، PSO نسبتاً ساده است در حالی که الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر مثل الگوریتم‌های ژنتیک و سیموله‌شده، پیاده‌سازی و استفاده آن‌ها دشوارتر است. در کل، برتری PSO در الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر به دلیل سرعت همگرایی، قابلیت کاربرد گسترده، سادگی و کاربردی بودن آن می‌باشد. شکل (۳) نشان‌دهنده فلوچارت الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

$\mathcal{F}_{mn}^k$ نشان می‌دهد. برای $k = 1$ ، سرعت اولیه طبق رابطه (۹) صفر است و موقعیت اولیه به طور تصادفی از فضای جستجو (SS) انتخاب می‌شود. رابطه (۱۰) رابطه به روز رسانی سرعت در تکرار $k + 1$ است. رابطه (۱۰) نیز موقعیت جدید ذرات را در تکرار $k + 1$ نشان می‌دهد. در رابطه (۹)، r اعداد تصادفی در محدوده $\{0, 1\}$ را نشان می‌دهد. وزن اینرسی w از (۱۱) محاسبه می‌شود. در (۱۱) w_{min} و w_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر ضریب وزن اینرسی هستند، t تعداد تکرارها، d وزن اینرسی اولیه پس از جستجوی اولیه، و به ترتیب $l_1(t)$ و $l_2(t)$ یک تابع غیر خطی و یک تابع خطی می‌باشد. مقادیر $l_1(t)$ و $l_2(t)$ از (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شوند، که t_{max} حداکثر تعداد تکرار است. پارامترهای $c_1^g(t)$ و $c_2(t)$ به صورت پویا با استفاده از تابع مماس (۱۴) و (۱۵) تنظیم می‌شوند تا بین جستجوهای سراسری و محلی تعادل بهتری برقرار کنند [۲۴].

$$\mathcal{F}_{mn}^k = 0, \mathcal{X}_{mn}^k = rand\{ss\} \quad (8)$$

$$\mathcal{F}_{mn}^{k+1} = w\mathcal{F}_{mn}^k + c_1^g r_1 (\mathcal{A}_{mn}^k - \mathcal{X}_{mn}^k) + c_1^b r_2 (\mathcal{X}_{mn}^k - \mathcal{B}_{mn}^k) + c_2 r_3 (\mathcal{D}_{mn}^k - \mathcal{X}_{mn}^k) \quad (9)$$

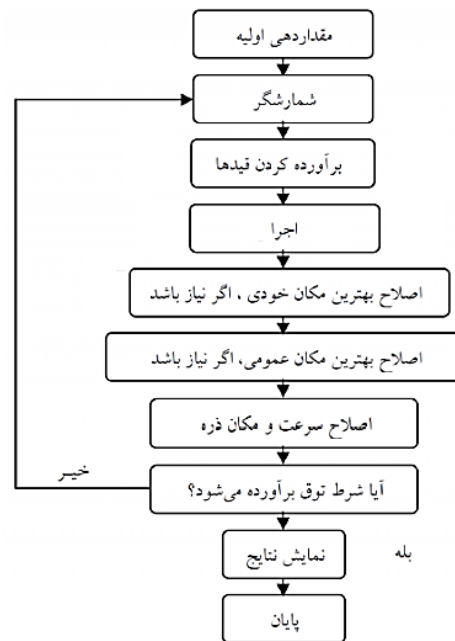
$$\mathcal{X}_{mn}^{k+1} = \mathcal{X}_{mn}^k + \mathcal{F}_{mn}^{k+1} \quad (10)$$

$$w = \begin{cases} w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \times l_1(t), & t < k \\ 2w_{min} + 2(d - w_{min}) \times l_2(t), & t \geq k \end{cases} \quad (11)$$

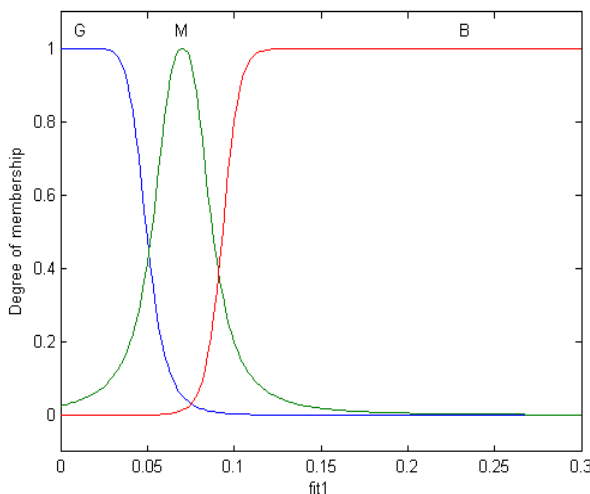
$$l_1(t) = e^{-30 \times (t/t_{max})^{15}} \quad (12)$$

$$l_2(t) = -\frac{t}{t_{max}} \quad (13)$$

بین ورودی ها و خروجی ها (عملکرد هدف نهایی که باید بهینه شود) برقرار می شود. در این روش، به کارگیری توابع مختلف عضویت و مجموعه قوانین منجر به توابع هدف نهایی متفاوت می شود و در نتیجه نتایج متنوعی را به همراه دارد. این رویکرد، با استفاده از متغیرهای زبانی-کلامی برای ادغام اهداف، درک و کاربرپسندی بیشتری را در مقایسه با اهداف وزن دهی ارائه می دهد. شایان ذکر است که، مشابه رویکرد وزن دهی هدف، این روش تنها به سمت تعداد محدودی از نتایج ناموفق همگرا می شود. توابع عضویت برای ورودی ها و خروجی های سیستم فازی در شکل های (۴) تا (۷) نشان داده شده است.



شکل (۳) فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



شکل (۴) تابع عضویت اولین هزینه (J1)

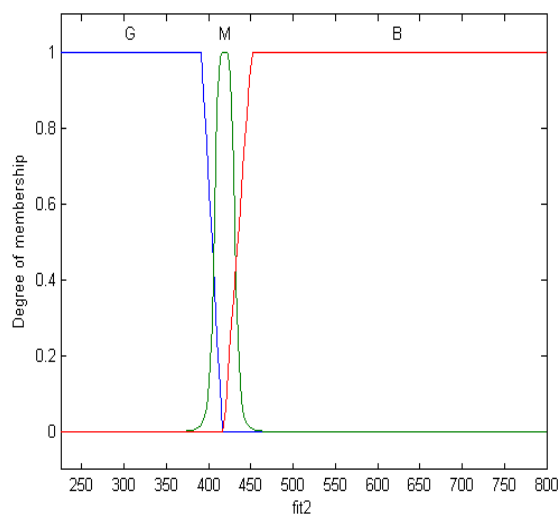
در بخش بعدی نتایج مربوط به شبیه سازی ارائه می گردد.

۴- نتایج شبیه سازی

تابع هدف مسئله به حداقل رساندن تابع معیار بیان شده در معادله (۷) است. برای دستیابی به این امر، و با تشخیص ماهیت چند وجهی مسئله همانطور که در معادله (۷) ترسیم شده است، از نظریه فازی برای هماهنگ کردن اهداف یا هزینه های مختلف و تعیین دقیق راه حل بهینه استفاده می شود. از طریق این رویکرد، با استفاده از دانش متخصص، همه توابع هدف در یک سیستم استنتاج فازی ادغام می شوند و در نتیجه مسئله بهینه سازی چند هدفه را به یک هدف تک هدفه تبدیل می کنند. برای شروع این فرآیند، محدوده مقدار خروجی هر هدف، که به عنوان ورودی برای سیستم استنتاج فازی عمل می کند، از طریق توابع عضویت فازی به چندین ناحیه تقسیم می شود. متعاقباً، با به کارگیری قوانین مناسب، همبستگی

شکل (۷) خروجی سیستم فازی (هزینه کل (Feedback)).

نمادهای نشان داده شده در شکل‌های قبل نشان دهنده متغیرهای زبانی مانند ضعیف (P)، مناسب (F)، عالی (E)، بسیار ضعیف (VP)، خیلی خوب (VG)، بسیار عالی (VE)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و استثنایی (X). این متغیرهای زبانی به ترتیب درجات متفاوتی از عملکرد را از ضعیف تا استثنایی نشان می‌دهند. علاوه بر این، قوانین فازی که در جداول (۱) تا (۳) مشخص شده اند ارائه شده است. این سیستم فازی از عملگرهایی شامل حداقل چرخش، حداکثر فصل، استنتاج بخش (حداقل)، حداکثر ترکیب و فاز زدایی مرکز ثقل استفاده می‌کند.

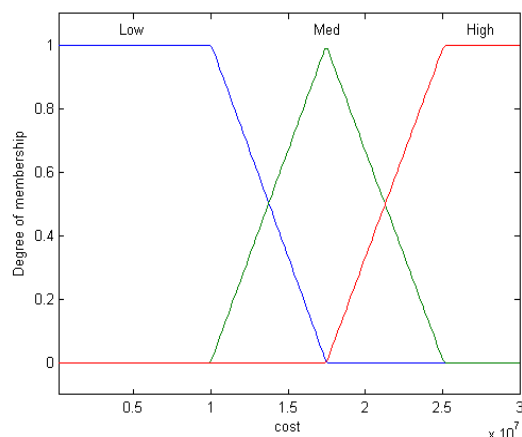


شکل (۵) تابع عضویت هزینه دوم (J₂)

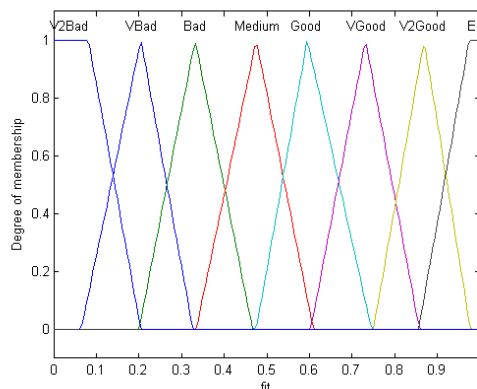
جدول (۱) قوانین فازی			
f			
	خوب	متوسط	بد
J ₁	خوب	خیلی خوب	خیلی بد
	متوسط	خیلی خوب	خیلی بد
	بد	خیلی خوب	خیلی بد

جدول (۲) قوانین فازی			
f			
	خوب	متوسط	بد
J ₂	خوب	خیلی خوب	خیلی بد
	متوسط	خیلی خوب	خیلی بد
	بد	خیلی بد	خیلی بد

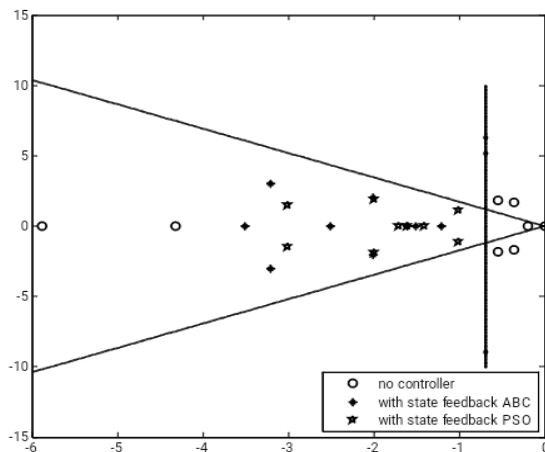
جدول (۳) قوانین فازی			
اف			
	خوب	متوسط	بد
J _{location}	خوب	خوب	خیلی بد
	متوسط	متوسط	خیلی بد
	بد	بد	خیلی بد



شکل (۶) تابع عضویت از هزینه سوم (J_{location})



سازی می شود. شکل (۸) موقعیت قطب های سیستم حلقه بسته را قبل و بعد از اجرای کنترلر نشان می دهد. بدیهی است که قطب ها در منطقه تعیین شده قرار دارند. به منظور ارزیابی انعطاف پذیری رویکرد پیشنهادی در برابر تغییرات پارامترهای سیستم از مقادیر اسمی آنها، تأثیر تنظیمات پارامتر بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می گیرد. در نتیجه، عملکرد رویکرد پیشنهادی تحت افزایش ۲۰ درصدی پارامترهای مدل سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. شکل (۹) و (۱۰) نتایج شبیه سازی را نشان می دهد. علیرغم افزایش ۲۰ درصدی پارامتر، کنترل کننده پیشنهادی عملکرد قابل ستایشی را در مقایسه با کنترل کننده PI معمولی از خود نشان می دهد.



شکل (۸) قطب های سیستم پس از اعمال کنترل کننده بازخورد حالت

فرآیند به روش بعدی آشکار می شود: در ابتدا، الگوریتم PSO مقادیری را به توابع هدف سه گانه برای هر راه حل اختصاص می دهد. متعاقباً، این مقادیر تابع هدف به سیستم استنتاج فازی وارد می شود، که مقدار شایستگی نهایی را برای هر راه حل بر اساس توابع عضویت ورودی-خروجی و قوانین ابداع شده توسط کارشناسان محاسبه می کند. در نهایت، مشکل با استفاده از الگوریتم PSO حل می شود.

برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی، نتایج شبیه سازی برای سیستم دو ناحیه ای نشان داده شده در شکل (۱) با در نظر گرفتن پارامترهای بعدی، افشا شده است. پارامترهای منطقه بهینه برای قطب های سیستم به شرح زیر در نظر گرفته می شوند:

$$\theta = \pi/3, \alpha = -0.7$$

همچنین معیار توقف برای الگوریتم ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. پس از اجرای الگوریتم در ۱۰۰ تکرار، ماتریس بازخورد و هزینه به دست آمده از رابطه (۲۱) برای هر ماتریس بازخورد به شرح زیر است (محدودیتی وجود دارد ۱۰۰ $k_{ij} \leq$ در اجزای ماتریس بازخورد).

$$K_{MOA} = \begin{bmatrix} 0.1252 & 2.5870 & 19.3345 & 12.7689 \\ -0.0138 & 0.1783 & -12.5405 & 68.049 \\ -0.2380 & -0.5460 & -2.8634 & 5.9481 & -4.8657 \\ 10.069 & 3.8103 & 17.9481 & -5.9261 & -0.0751 \end{bmatrix}$$

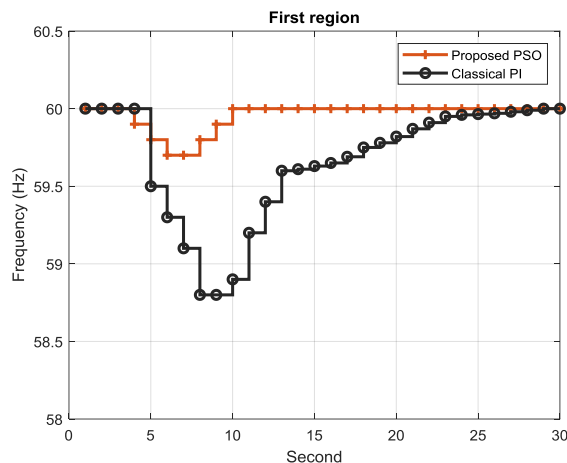
$$J_{c(MOA)} = 0.0398$$

برای ارزیابی اثربخشی کنترل کننده های توسعه یافته، هم کنترل کننده های طراحی شده و هم یک کنترل کننده PI با مقادیر از پیش تعریف شده از مرجع [۱] به سیستم دو ناحیه ای نشان داده شده در شکل (۱)، با استفاده از پارامترهای اسمی اعمال می شوند. سپس سیستم به مدت ۳۰ ثانیه شبیه

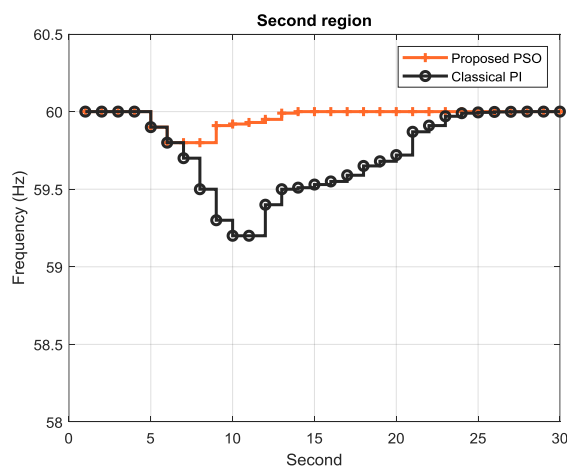
ترکیب بازخورد حالت و PSO منجر به بهبود قابل توجهی در پایداری دینامیکی سیستم قدرت شده است. این ترکیب توانسته است در مواجهه با تغییرات ۲۰ درصدی پارامترهای سیستم، عملکرد سیستم را حفظ کند و انحرافات فرکانس را به حداقل برساند. استفاده از سیستم استنتاج فازی برای ترکیب اهداف چندگانه، انعطاف‌پذیری بالایی را فراهم کرده و توانسته است دقت بهینه‌سازی را افزایش دهد. این سیستم با استفاده از متغیرهای زبانی-کلامی، توانسته است اهداف مختلف را به طور مؤثر ادغام کرده و نتایج متنوعی ارائه دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که کنترل‌کننده پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌های PI سنتی دارد. این بهبود در کاهش انحرافات فرکانس و افزایش پایداری سیستم مشاهده شده است. در مجموع، روش پیشنهادی با ترکیب الگوریتم PSO، بازخورد حالت و سیستم استنتاج فازی، یک راه‌حل مؤثر و نوآورانه برای کنترل بار فرکانس در سیستم‌های قدرت ارائه می‌دهد که می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد و پایداری این سیستم‌ها را بهبود بخشد.

مراجع

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control: McGraw-Hill, 1994.
- [2] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, and A. Jalili, "Load Frequency Control Strategies: A State-of-the-Art Survey for the Researcher," Energy Conversion and Management, Vol. 50, 2009, pp. 344-353.
- [3] Y. H. Moon, H. S. Ryu, J. G. Lee, K. B. Song, and M. C. Shin, "Extended Integral Control for Load Frequency Control with the Consideration of Generation-Rate Constraints," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 24, 2002, pp. 263-269.
- [4] J. Talaq and F. Al-Basri, "Adaptive fuzzy gain scheduling for load frequency control," IEEE Trans. on Power and Systems, Vol. 14, 1999, pp. 145-150.



شکل (۹) تغییرات فرکانس در ناحیه اول برای افزایش ۲۰ درصدی



شکل (۱۰) تغییرات فرکانس در ناحیه دوم برای افزایش ۲۰ درصدی

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه یک روش نوآورانه برای بهبود کنترل بار فرکانس در سیستم‌های قدرت ارائه می‌دهد که شامل ترکیب بازخورد حالت و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به همراه سیستم استنتاج فازی است. استفاده از PSO به دلیل سرعت همگرایی بالا، سادگی در پیاده‌سازی و توانایی جستجوی مؤثر در فضای بزرگ راه‌حل‌ها، توانسته است پارامترهای کنترل‌کننده را به طور مؤثر بهینه‌سازی کند و عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مرسوم نشان دهد.

- mechanical design optimization problems", Computer-Aided Design, Vol. 43, No. 3, pp. 303-315, 2011.
- [15] Hassan, M.A.M.; Worku, M.Y.; Abido, M.A. Optimal Design and Real Time Implementation of Autonomous Microgrid Including Active Load. *Energies* 2018, 11, 1109
- [16] Lidula, A.N.W.; Rajapakse, A. Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, 15, 186–202.
- [17] Shahidehpour, M.; Khodayar, M. Cutting Campus Energy Costs with Hierarchical Control: The Economical and Reliable Operation of a Microgrid. *IEEE Electr. Mag.* 2013, 1, 40–56.
- [18] Che, L.; Shahidehpour, M. DC Microgrids: Economic Operation and Enhancement of Resilience by Hierarchical Control. *IEEE Trans. Smart Grid* 2014, 5, 2517–2526.
- [19] Hassan, M.; Aleem, S.H.E.A.; Ali, S.G.; Abdelaziz, A.Y.; Ribeiro, P.F.; Ali, Z.M. Robust Energy Management and Economic Analysis of Microgrids Considering Different Battery Characteristics. *IEEE Access* 2020, 8, 54751–54775.
- [20] Sidong Xian, Xu Feng, "Meerkat optimization algorithm: A new meta-heuristic optimization algorithm for solving constrained engineering problems," *Expert Systems with Applications*, Volume 231, 120482, 2023.
- [21] Verma, P.; Gupta, P. Proactive stabilization of grid faults in DFIG based wind farm using bridge type fault current limiter based on NMPC. *Energy Sources Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 2020, 1–20.
- [22] Mohssine, C.; Nasser, T.; Essadki, A. Contribution of Variable Speed Wind Turbine Generator based on DFIG using ADRC and RST Controllers to Frequency Regulation. *Int. J. Renew. Energy Res. (IJRER)* 2021, 11, 320–331.
- [23] Ribó-Pérez, D.; Bastida-Molina, P.; Gómez-Navarro, T.; Hurtado-Pérez, E. Hybrid assessment for a hybrid microgrid: A novel methodology to critically analyse generation
- [5] M. Azzam, "Robust Automatic Generation Control," *Energy Conversion and Management*, Vol. 40, 1999, pp. 1413-1421.
- [6] Z. Q. Wang and M. Sznaiar, "Robust control design for load frequency control using μ -synthesis," in *Southcon/94, Conference Record*, Orlando, FL, USA, 1994, pp. 186-190.
- [7] A. Khodabakhshian and M. Edrisi, "A New Robust PID Load Frequency Controller," *Control Engineering Practice*, Vol. 16, 2008, pp. 1069-1080.
- [8] K. Sabahi, M. A. Nekoui, M. Teshnehlal, M. Aliyari, and M. Mansouri, "Load Frequency Control in Interconnected Power System Using Modified Dynamic Neural Networks," *Control & Automation*, Vol. 1, 2007.
- [9] A. Y. Abdelaziz, M. A. L. Badr, and A. H. Younes, "Artificial Neural Network for Load Modeling of an Egyptian Primary Distribution System," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 34, 2006, pp. 1099-1119.
- [10] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, and A. Jalili, "Multi-Stage Fuzzy PID Power System Automatic Generation Controller in Deregulated Environments," *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, 2006, pp. 2829-2845.
- [11] S. Pothiya, Issarachai Ngamroo, "Optimal fuzzy logic-based PID controller for load-frequency control including superconducting magnetic energy storage units", *Energy Conversion and Management*, Vol.49, 2008, pp. 2833–2838.
- [12] R. Hemmati, M. S. Boroujeni, H. Delafkar, A. S. Boroujeni, "PID Controller Adjustment using PSO for Multi Area Load Frequency Control ", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 5, 2011, pp. 295-302.
- [13] S.A. Taher, R. Hematti, A. Abdolalipour, H. Tabe, "Optimal Decentralized Load Frequency Control Using HPSO Algorithms in Deregulated Power Systems", *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 5, 2008, pp.1167-1174.
- [14] R.V. Rao, V.J. Savsani, D.P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained

- Distribution Networks Conference (EPDC), Zahedan, Iran, 28–29 April 2015.
- [33] Mauricio, J.M.; Marano, A.; Gómez-Expósito, A.; Ramos, J.L. Frequency Regulation Contribution Through Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Trans. Power Syst.* 2009, 24, 173–180.
- [34] Morren, J.; de Haan, S.W.H.; Kling, W.L.; Ferreira, J.A. Wind Turbines Emulating Inertia and Supporting Primary Frequency Control. *IEEE Trans. Power Syst.* 2006, 21, 433–434.
- [35] Ahmadi, R.; Sheikholeslami, A.; Nabavi Niaki, A.; Ranjbar, A. Dynamic participation of doubly fed induction generator in multi-area load frequency control. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2015, 25, 1130–1147.
- [36] Alayi, R.; Zishan, F.; Mohkam, M.; Hoseinzadeh, S.; Memon, S.; Garcia, D. A Sustainable Energy Distribution Configuration for Microgrids Integrated to the National Grid Using Back-to-Back Converters in a Renewable Power System. *Electronics* 2021, 10, 1826.
- [37] Li, H.; Wang, X.; Xiao, J. Differential Evolution-Based Load Frequency Robust Control for Micro-Grids with Energy Storage Systems. *Energies* 2018, 11, 1686.
- [38] Stadler, M.; Siddiqui, A.; Mamay, C.; Aki, H.; Lai, J. Control of greenhouse gas emissions by optimal DER technology investment and energy management in zero-net-energy buildings. *Eur. Trans. Electr. Power* 2011, 21, 1291–1309.
- technologies for hybrid microgrids. *Renew. Energy* 2020, 157, 874–887.
- [24] Sadat, S.A.; Faraji, J.; Babaei, M.; Ketabi, A. Techno-economic comparative study of hybrid microgrids in eight climate zones of Iran. *Energy Sci. Eng.* 2020, 8, 3004–3026.
- [25] Borghei, M.; Ghassemi, M. Optimal planning of microgrids for resilient distribution networks. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2021, 128, 106682.
- [26] Parol, M.; Wójtowicz, T.; Księżyk, K.; Wenge, C.; Balishevski, S.; Arendarski, B. Optimum management of power and energy in low voltage microgrids using evolutionary algorithms and energy storage. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2020, 119, 105886.
- [27] Zhou, Q.; Shahidehpour, M.; Paaso, A.; Bahramirad, S.; Alabdulwahab, A.; Abusorrah, A. Distributed Control and Communication Strategies in Networked Microgrids. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2020, 22, 2586–2633.
- [28] Zhou, B.; Zou, J.; Chung, C.Y.; Wang, H.; Liu, N.; Voropai, N.; Xu, D. Multi-microgrid Energy Management Systems: Architecture, Communication, and Scheduling Strategies. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2021, 9, 463–476.
- [29] Mohamed, N.; Aymen, F.; Ali, Z.; Zobia, A.; Aleem, S.A. Efficient Power Management Strategy of Electric Vehicles Based Hybrid Renewable Energy. *Sustainability* 2021, 13, 7351.
- [30] Bevrani, H.; Habibi, F.; Babahajyani, P.; Watanabe, M.; Mitani, Y. Intelligent Frequency Control in an AC Micro grid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach. *IEEE Trans. Smart Grid* 2012, 3, 1935–1944.
- [31] Li, X.; Song, Y.J.; Han, S.B. Frequency control in micro grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller. *J. Power Sources* 2018, 180, 468–475.
- [32] Mahmoudi, M.; Jafari, H.; Jafari, R. Frequency control of Micro-grid Using State Feedback with Integral Control. In *Proceedings of the 20th Conference on Electrical Power*