



Semnan University



Research Article

Load-Frequency Control of a Hybrid Islanded Microgrid with a Fractional Order Fuzzy PID Controller Optimized by Cheetah Algorithm

Siavash Shirali ^a, Saeed Zolfaghari Moghaddam ^{b,*}, Mortaza Ali Asghary ^c

^a MSc, Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technologies, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

^b Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technologies, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

^c Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technologies, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 18 June 2023
Revised: 09 December 2023
Accepted: 14 February 2024

Keywords:

Load frequency control, Hybrid islanded microgrid, Fractional order fuzzy PID controller, Cheetah optimizer algorithm.

ABSTRACT

Hybrid microgrid is a new concept that has been introduced in recent decades based on the needs of power systems. One of the most important challenges of the islanded microgrid is frequency regulation. In this paper, a fractional order fuzzy PID controller is introduced to stabilize the frequency. The presence of a fractional order in the controller system improves the stability and response speed of the controller in different conditions. Determining the controller coefficients is an important challenge that can be done using different methods. This paper uses Cheetah optimization algorithm because of its important features such as: preventing premature convergence and not getting stuck in the local optimum, which differentiates it from other algorithms. It should be noted that the structure of the proposed controller is a centralized control type, in which the control signal is sent to the units of energy storage sources and diesel generator. For more accurate modeling of energy storage resources, limiting blocks are included in the output of these resources. To evaluate the performance of the proposed controller, its results have been compared with other controllers, namely: classic PID, fractional order PID and fuzzy PID controllers optimized with other optimization algorithms such as PSO, SCA and GA, using several criteria including: IAE, ISE, ITAE and ITSE. The results show that the proposed controller has the lowest error in terms of error measurement criteria and the highest speed of convergence, with optimal and acceptable performance relative to other controllers are mentioned.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.30979.2474>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: s.zolfaghari@uut.ac.ir

How to cite this article:

Shirali, S., Zolfaghari Moghaddam, S., & Ali Asghary, M. (2024). Load-Frequency Control of a Hybrid Islanded Microgrid with a Fractional Order Fuzzy PID Controller Optimized by Cheetah Algorithm. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(78), 217-232. doi: 10.22075/jme.2024.30979.2474

کنترل بار-فرکانس ریزشکه هیبرید جزیره‌ای با استفاده از کنترل کننده فازی PID مرتب‌بندی کسری بهینه شده با الگوریتم Cheetah

سیاوش شیرعلی^۱، سعید ذوالفقاری مقدم^{۲*}، مرتضی علی اصغری^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵	ریزشکه هیبرید مفهوم جدیدی است که در دهه‌های اخیر و بر اساس نیاز سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته معرفی شده است. یکی از مهمترین چالش‌های ریزشکه در حالت جزیره‌ای، تنظیم و تثبیت فرکانس است. در این مقاله، یک کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری برای تثبیت فرکانس معرفی شده است. وجود مرتبه کسری در سیستم کنترل کننده باعث بهبود پایداری و سرعت پاسخگویی کنترل کننده در شرایط مختلف می‌شود. تعیین ضرایب کنترل-کننده چالش مهمی محسوب می‌شود که از روش‌های مختلفی می‌توان برای انجام آن استفاده نمود. در این تحقیق برای تعیین ضرایب کنترل-کننده پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی Cheetah استفاده شده است. این الگوریتم دارای قابلیت‌های مهمی از جمله: جلوگیری از همگرایی زودرس و عدم گرفتاری در بهینه محلی است که باعث تمایز آن نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌شود. لازم به ذکر است که ساختار کنترلی بکار گرفته شده از نوع کنترل متمرکز می‌باشد؛ به گونه‌ای که سیگنال کنترلی به واحدهای منابع ذخیره انرژی و دیزل ژنراتور ارسال می‌گردد. برای مدلسازی دقیق تر منابع ذخیره انرژی، بلوک‌های محدود کننده در خروجی این منابع لحاظ شده است. برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، نتایج حاصل از آن با کنترل کننده‌های دیگری مانند PID کلاسیک، PID مرتبه کسری و فازی PID بهینه شده با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند GA، PSO و SCA با در نظر گرفتن چندین معیار اندازه‌گیری خطا شامل IAE، ISE، ITAE و ITSE مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی با داشتن کمترین مقدار خطا و بیشترین سرعت همگرایی، دارای عملکرد مطلوب و قابل قبول نسبت به دیگر کنترل کننده‌های ذکر شده می‌باشد.
واژگان کلیدی: کنترل بار-فرکانس، ریزشکه هیبرید جزیره‌ای، کنترل کننده فازی PID مرتب‌بندی کسری، الگوریتم بهینه‌ساز Cheetah.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.30979.2474>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه^۱

ریزشکه‌ها^۴، شبکه‌های برق کوچکی هستند که در سطح ولتاژ فشار ضعیف عمل می‌کنند و شامل انواع منابع تولید

پراکنده^۵ (تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر)، سیستم‌های ذخیره-ساز انرژی، انواع بارهای الکتریکی (قابل کنترل و غیرقابل کنترل) و سیستم کنترلی می‌باشند که به دو صورت متصل

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.zofaghari@uut.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده فناوری‌های

صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی

ارومیه، ارومیه، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی

ارومیه، ارومیه، ایران

استناد به این مقاله:

شیرعلی، سیاوش، ذوالفقاری مقدم، سعید، و علی اصغری، مرتضی. (۱۴۰۳). کنترل بار-فرکانس ریزشکه هیبرید جزیره‌ای با استفاده از کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم Cheetah. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۸)، ۲۱۷-۲۳۲. doi: 10.22075/jme.2024.30979.2474

بهینه سازی ARO⁹ برای کنترل کننده های PI و PID برای کنترل بار-فرکانس ریزش شبکه در [۱۲] پیشنهاد شده است. کنترل کننده های دیگری که در این زمینه وجود دارند از نوع مرتبه کسری^{۱۰} هستند که در [۱۶-۱۳] استفاده شده اند. کنترل کننده ارائه شده در مرجع [۱۳] که از نوع PI می باشد، حاشیه تاخیر در انتگرال مرتبه کسری را تحلیل می کند. کنترل کننده بکار گرفته شده در پژوهش [۱۴] نیز از نوع PID مرتبه کسری می باشد که ضرایب آن با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری بهینه می شوند. در مطالعه [۱۵] از یک کنترل کننده نوع PI در کنار یک PD^{۱۱} مرتبه-کسری با فیلتر استفاده و با الگوریتم MPA^{۱۲} بهینه شده است. محققین در [۱۶] برای تثبیت فرکانس ریزش شبکه از کنترل کننده مد پیش بین برای ارسال سیگنال به سیستم ذخیره انرژی استفاده نموده اند. همچنین در این پژوهش برای سیستم دیزل ژنراتور، یک کنترل اولیه لحاظ شده است. پژوهشگران در مراجع [۲۲-۱۷] با استفاده از کنترل کننده های مقاوم جهت تثبیت فرکانس ریزش شبکه راه کارهایی را ارائه داده اند. در [۱۷] برای کنترل اینرسی مجازی از کنترل کننده مقاوم مبتنی بر CDM^{۱۳} استفاده شده است. در [۱۹-۱۸] روش H ∞ برای کنترل بار-فرکانس لحاظ شده است. نویسندگان در مقاله [۲۰] با استفاده از روش H $_{2}/H_{\infty}$ و تعیین ضرایب کنترل کننده با الگوریتم ترکیبی CPSOGSA^{۱۴} به کنترل سیستم پرداخته اند. در [۲۱] محققان یک روش نوین جهت طراحی کنترل کننده مقاوم غیرمتمرکز برای ژنراتورهای به هم پیوسته قوی پیشنهاد نموده اند. همچنین در [۲۲] از الگوریتم QFT^{۱۵} برای تنظیم پارامترهای VSG^{۱۶} جهت بهینه کردن عملکرد آن استفاده شده است. پژوهشگران در [۲۵-۲۳] تحقیقاتی در زمینه روش های مبتنی بر شبکه عصبی برای تثبیت فرکانس ریزش شبکه انجام داده اند. در [۲۳] پارامترهای کنترل کننده PID با استفاده از یک شبکه عصبی پیشخور چندلایه با کمک روش یادگیری عمیق بدست آمده است. در [۲۴] نویسندگان برای بهبود عملکرد سیستم در کنار

به شبکه و منفصل از شبکه (جزیره ای) مورد بهره برداری قرار می گیرند [۱-۲]. زمانیکه ریزش شبکه در حالت جزیره ای قرار می گیرد، عدم تعادل توان بین تولید و مصرف سبب ایجاد انحراف فرکانس و ولتاژ می شود. مهمترین عوامل در عدم تعادل توان می تواند ناشی از تغییرات بار الکتریکی و عدم قطعیت منابع تولید انرژی تجدیدپذیر مانند مولد فتوولتائیک و توربین بادی باشد. بنابراین، این موضوع چالش مهمی برای ریزش شبکه ها محسوب می شود که بایستی به نحو مناسبی برطرف گردد [۳-۴].

کنترل بار-فرکانس (LFC^۶) در ریزش شبکه های جزیره ای امری حیاتی در جهت کاهش نوسانات و تثبیت فرکانس محسوب می شود که برای پیاده سازی آن، روش های مختلفی در مراجع متعدد ارائه شده است [۳۶-۵]. در مراجع [۵-۸] برای پایداری فرکانس ریزش شبکه از کنترل کننده PI^۲ استفاده شده است. به طوری که در مرجع [۵] برای کنترل موثر توان اکتیو ریزش شبکه، پارامترهای کنترل کننده با استفاده از روش DPM^۳ بدست آمده است. در [۶] از روش کنترل تطبیقی جهت کنترل هماهنگ بین منابع تجدیدپذیر و EVS^۴ استفاده گردیده است. نویسندگان در مقاله [۷] عملکرد دینامیکی فرکانس ریزش شبکه با سطح نفوذ قابل توجه انرژی باد در شبکه مصر را مورد مطالعه قرار داده اند. در این پژوهش ضرایب کنترل کننده با سه الگوریتم بهینه سازی LUS^۵، HSA^۶ و EO^۷ بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شده اند. در مطالعه [۸] یک کنترل کننده جدید با یک حلقه کنترلی تکمیلی ارائه شده است که جهت تنظیم پارامترهای آن از روش فازی بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات استفاده می شود. در [۹-۱۱] برای کنترل بار-فرکانس ریزش شبکه از کنترل کننده PID^۸ استفاده شده است. برای تعیین ضرایب کنترل کننده در [۹] از الگوریتم سینوسی کسینوس آشوب مبتنی بر نگاشت منطقی سینوسی دو بعدی و در [۱۰] از الگوریتم ازدحام پروانه های ژنتیکی و در [۱۱] از الگوریتم ازدحام ذرات بهره برداری شده است. یک روش تنظیم چند هدفه بر اساس الگوریتم

¹⁰ Fractional Order¹¹ Proportional Derivative¹² Marine Predator Algorithm¹³ Coefficient Diagram Method¹⁴ Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm¹⁵ Quantitative Feedback Theory¹⁶ Virtual Synchronous Generator² Proportional Integral³ D-Partition Method⁴ Electric Vehicles⁵ Local Unimodal Sampling⁶ Harmony Search Algorithm⁷ Equilibrium Optimizer⁸ Proportional Integral Derivative⁹ Artificial Rabbits Optimization

در این مقاله سعی بر آن است که مشکلات موجود در الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر با استفاده از الگوریتم Cheetah برطرف گردد. این الگوریتم جدید از رفتار یوزپلنگ‌ها در طبیعت هنگام شکار الهام گرفته می‌گیرد و دارای ویژگی‌های برتری نظیر عدم گرفتاری در بهینه محلی و جلوگیری از همگرایی زودرس، نسبت به دیگر الگوریتم‌ها می‌باشد [۳۷]. در ضمن به کارگیری کنترل کننده PID نوع مرتبه کسری نسبت به نوع کلاسیک، سبب افزایش کارایی کنترل کننده می‌شود. جهت ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در شرایط واقعی تر، شبیه‌سازی واحدهای ذخیره انرژی بصورت مجهز با بلوک‌های محدودکننده توان و تاخیر در عملکرد در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، با بهینه‌سازی کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری توسط الگوریتم بهینه‌ساز Cheetah، ملاحظه می‌شود که مقدار نوسانات و تغییرات فرکانس در یک ریزش شبکه هیبرید جزیره‌ای^{۲۳} حداقل می‌گردد. در انتها شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام گرفته است که در آنها نتایج حاصل از کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده‌های PID کلاسیک، PID مرتبه کسری و فازی PID کلاسیک^{۲۴} (FPID) مقایسه می‌شود. برای این کار، معیارهای مختلفی جهت اندازه گیری خطا از جمله IAE^{۲۵}، JSE^{۲۶}، ITAE^{۲۷} و ITSE^{۲۸} استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، نتایج حاصل از آن با الگوریتم‌های دیگری مانند PSO^{۲۹}، SCA^{۳۰} و GA^{۳۱} مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه سناریوهای مختلفی برای بار الکتریکی و شرایط مختلف آب و هوایی لحاظ شده است. کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی با داشتن کمترین مقدار خطا و بیشترین سرعت همگرایی، دارای عملکرد مطلوب و قابل قبول نسبت به دیگر کنترل کننده‌های ذکر شده می‌باشد.

ساختار اصلی مقاله در ادامه به ترتیب شامل ۵ بخش می‌باشد. ابتدا در بخش دوم نحوه مدل‌سازی ریزش شبکه

کنترل کننده PI از یک شبکه عصبی LSTM-RNN^{۱۷} برای پیش بینی سرعت باد و تابش خورشید بهره برده‌اند. در مرجع [۲۵] یک شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID در ساختار ریزش شبکه لحاظ شده است. با در نظر گرفتن کنترل کننده فازی برای کنترل بار-فرکانس ریزش شبکه منفصل از شبکه، محققین در [۲۶-۳۶] راه کارهای جدیدی ارائه داده‌اند. در [۲۶] با استفاده از کنترل کننده فازی نوع یک، مقدار ضریب اینرسی مجازی به طور خودکار و بر اساس سیگنال‌های ورودی توان اکتیو منابع تجدیدپذیر تنظیم می‌شود تا انحرافات فرکانس سیستم حداقل شده و از انتخاب‌های نامناسب جلوگیری شود. در نتیجه روش پیشنهادی پاسخ اینرسی سریع‌تری را در مقایسه با روش‌های قبلی ارائه می‌دهد. در [۲۷-۲۹] از یک کنترل کننده فازی PID نوع یک استفاده شده است که در [۲۷] پارامترهای کنترل کننده با الگوریتم جستجوی گرانشی، در [۲۸] با الگوریتم ESSA^{۱۸} و در [۲۹] با الگوریتم MMFO^{۱۹} بهینه‌سازی شده است. در پژوهش [۳۰] از ترکیب PD فازی و TID^{۲۰} استفاده شده است و برای بهینه‌سازی کنترل کننده، محققان الگوریتم جستجوی کلاغ آشفته را پیشنهاد داده‌اند. در مرجع [۳۱] یک کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری نوع یک به همراه الگوریتم جستجوی هارمونی شبه معکوس ارائه شده است. مرجع [۳۲] برای کنترل بار-فرکانس، یک کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری نوع ۱ همراه با فیلتر را پیشنهاد می‌دهد که با استفاده از الگوریتم MSSA^{۲۱} بهینه شده است. پژوهش [۳۳] کنترل کننده فازی PD-PI مرتبه کسری نوع ۲ را پیشنهاد می‌دهد و در [۳۴] فازی TID مرتبه کسری به همراه الگوریتم شاهین هریس پیشرفته ارائه شده است. در مراجع [۳۵-۳۶] از یک کنترل کننده PID فازی مرتبه کسری (FOFPID)^{۲۲} بهینه استفاده شده است؛ به طوری که در مطالعه [۳۵] از الگوریتم ترکیبی پرنده باز هریس و در مرجع [۳۶] از الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته استفاده شده است.

^{۲۵} Integral Absolute Error

^{۲۶} Integral Squared Error

^{۲۷} Integral Time Absolute Error

^{۲۸} Integral Time Square Error

^{۲۹} Particle Swarm Optimization

^{۳۰} Sine Cosine Algorithm

^{۳۱} Genetic Algorithm

^{۱۷} Long Short-Term Memory-Recurrent Neural Network

^{۱۸} Enhanced Salp Swarm Algorithm

^{۱۹} Modified Moth Flame Optimization

^{۲۰} Tilt Integral Derivative

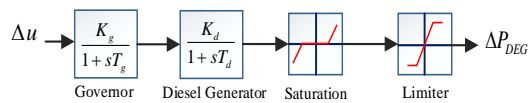
^{۲۱} Modified Slap Swarm Algorithm

^{۲۲} Fractional Order Fuzzy Proportional Integral Derivative

^{۲۳} Hybrid Islanded Microgrid

^{۲۴} Fuzzy Proportional Integral Derivative

خروجی خود را تنظیم می کند و به تابع تبدیل زمان پیوسته دیزل ژنراتور انتقال می دهد [۲۵]. ارتباط سیگنال LFC با توان خروجی دیزل ژنراتور در شکل (۲) مشخص شده است.



شکل ۲- مدل دینامیکی دیزل ژنراتور

در شکل (۲)، ΔP_{DEG} تغییرات توان خروجی دیزل ژنراتور را نشان می دهد، Δu سیگنال ورودی به واحد دیزل ژنراتور می باشد که توسط کنترل کننده ساخته می شود، T_d و T_g به ترتیب ثابت زمانی های گاورنر و دیزل ژنراتور هستند. همچنین در این سیستم از دو بلوک محدود کننده در جهت عملکرد دیزل ژنراتور لحاظ شده است. بلوک Limiter محدودیت نرخ افزایش و کاهش توان و بلوک Saturation محدوده نرخ رمپ توان را مدلسازی می کند. در این پژوهش جهت شبیه سازی این مدل نرخ بلوک Limiter برابر با $0 \pm / 0.01$ و نرخ بلوک Saturation برابر با $0 \pm / 0.01$ در نظر گرفته شده است.

۲-۲- ژنراتور توربین بادی و مولد فتوولتائیک

از آنجایی که عملکرد منابع انرژی تجدیدپذیر مانند ژنراتور توربین بادی و مولد فتوولتائیک به شرایط آب و هوایی وابسته است، خروجی توان ژنراتور توربین بادی یعنی ΔP_{WTG} و مولد فتوولتائیک یعنی ΔP_{PV} مکمل یکدیگر می باشند و ماهیت متناوب دارند و از این رو، در حلقه کنترلی LFC در نظر گرفته نمی شوند [۹].

توان باد را می توان به صورت رابطه (۱) ارزیابی کرد که در آن P_m ، C_p ، ρ ، A ، v_w ، λ و β به ترتیب توان خروجی مکانیکی توربین، ضریب عملکرد توربین، چگالی هوا (kg/m^3)، مساحت جاروب شده توربین (m^2)، سرعت باد (m/s)، نسبت سرعت نوک روتور و زاویه گام تیغه می باشند. C_p تابعی از نسبت سرعت نوک و زاویه گام تیغه است.

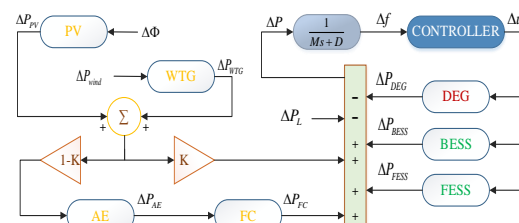
$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

تابع تبدیل ژنراتور توربین بادی را می توان با یک تاخیر مرتبه اول ساده، بدون توجه به تمام ویژگی های غیرخطی، مطابق رابطه (۲) در نظر گرفت [۱۰] که در آن K_{WTG} و

توضیح داده می شود. در بخش سوم، طراحی کنترل کننده پیشنهادی با جزئیات ارائه می شود. در بخش چهارم روش بهینه سازی کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از الگوریتم Cheetah توضیح داده می شود. در بخش پنجم، شبیه سازی ها و مطالعات موردی به ازای سناریوهای مختلف انجام شده است. نهایتاً در بخش ششم، نتایج حاصل از مقاله آمده است.

۲- مدلسازی ریزشبه هیبرید

نمای کلی ریزشبه هیبرید بکار گرفته شده در این مقاله، در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، منابع انرژی تجدیدپذیر بکار گرفته شده عبارتند از: (۱) ژنراتور توربین بادی [۳۲] (۲) مولد فتوولتائیک [۳۳] (۳) الکترولیزر [۳۴] و پیل سوختی [۳۵]. لازم به ذکر است که توان تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر بر اساس تکنیک حداکثر توان و مجزا از ساختار کنترلی می باشند. تنها منبع انرژی تجدیدناپذیر استفاده شده در این مقاله دیزل ژنراتور [۳۶] می باشد. همچنین منابع ذخیره ساز انرژی استفاده شده از دو جزء باتری [۳۷] و چرخ طیار [۳۸] تشکیل شده است. کنترل کننده پیشنهادی از نوع متمرکز انتخاب شده و سیگنال کنترلی آن به واحدهای دیزل ژنراتور، باتری و چرخ طیار ارسال می شود. در ادامه، به تشریح و مدلسازی هر قسمت از اجزای سیستم پیشنهادی پرداخته می شود.



شکل ۱- نمای کلی ریزشبه

۲-۱- دیزل ژنراتور

اگرچه واحدهای دیزلی محیط زیست را آلوده می کنند، اما به دلیل ویژگی های واکنش سریع و کارایی بالا همچنان مورد استفاده قرار می گیرند.

با استفاده از مکانیزم های کنترل توان، دیزل ژنراتور قادر است تغییرات بار را فوراً تشخیص دهد. بر اساس تغییرات ایجاد شده در بار، واحد گاورنر مصرف سوخت و توان

³⁶ Diesel Energy Generator

³⁷ Battery energy storage system

³⁸ Flywheel energy storage system

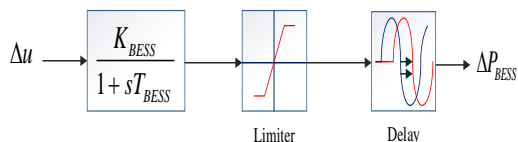
³² Wind Turbine Generator

³³ Photovoltaic

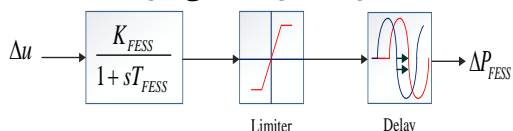
³⁴ Aqua Electrolyzer

³⁵ Fuel Cell

انرژی الکتریکی در باتری به صورت شیمیایی و در چرخ طیار به صورت انرژی جنبشی ذخیره می‌شود. در شکل‌های (۳) و (۴) مدل دینامیکی باتری و چرخ طیار نشان داده شده است [۲].



شکل ۳- مدل دینامیکی باتری



شکل ۴- مدل دینامیکی چرخ طیار

در شکل (۳)، K_{BESS} و T_{BESS} به ترتیب بهره و ثابت زمانی باتری را نشان می‌دهند و همچنین در شکل (۴)، K_{FESS} و T_{FESS} بهره و ثابت زمانی چرخ طیار هستند. همانطور که در شکل‌های (۳) و (۴) مشخص است بلوک‌هایی برای محدود کردن و مدلسازی دقیق‌تر منابع ذخیره‌ساز انرژی در نظر گرفته شده است [۲]. بلوک Limiter محدودیت‌های عملی نرخ کاهش و افزایش توان منابع را مدل می‌کند. بلوک Delay نیز موجب تاخیر زمانی در عملکرد منابع می‌شود. در این پژوهش برای شبیه سازی مدل باتری، نرخ بلوک Limiter برابر با ± 0.2 و برای مدل چرخ طیار برابر با ± 0.9 و نرخ بلوک Delay برای هر دو مدل برابر با ± 0.2 در نظر گرفته شده است.

۲-۵- انحراف فرکانس و توان

در ریزشبه، زمانی که تعادل بین توان تولیدی ΔP و تقاضای بار ΔP_L از بین می‌رود، فرکانس ریزشبه دچار تغییرات و نوسانات می‌شود. هر چقدر انحراف توان بیشتر باشد، نوسان فرکانس نیز بیشتر خواهد بود و بالعکس. بنابراین انحراف فرکانس Δf تابع ذاتی انحراف توان ΔP است که با استفاده از رابطه (۷) در زیر مدلسازی می‌شود [۲۹]:

$$G_{sys}(s) = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1}{Ms + D} \quad (7)$$

در رابطه فوق، D ثابت میرایی ریزشبه هیبرید و M مقادیر اینرسی است که جرم معادل اجزای دوار موجود در ریزشبه هیبرید را نشان می‌دهد [۳۲]. مقدار M و D به ترتیب برابر با 0.4 و 0.3 در نظر گرفته شده است [۳۱].

T_{WTG} به ترتیب بهره و ثابت زمانی ژنراتور توربین بادی هستند.

$$G_{WTG}(s) = \frac{\Delta P_{WTG}}{\Delta P_{wind}} = \frac{K_{WTG}}{1 + sT_{WTG}} \quad (2)$$

توان خروجی سلول فتوولتائیک خورشیدی از طریق رابطه (۳) به شرح زیر نشان داده می‌شود.

$$PV(s) = \eta_{PV} \times A_{PV} \times S \times [1 - 0.0005 \times (T_0 - 25)] \quad (3)$$

که η_{PV} کارایی سیستم فتوولتائیک را تعریف می‌کند، S تابش خورشیدی، A_{PV} مساحت سیستم PV و T_0 دمای سلول است [۱۲]. مدل مولد فتوولتائیک توسط رابطه (۴) مدلسازی شده است، که در آن K_{PV} و T_{PV} به ترتیب بهره و ثابت زمانی مولد فتوولتائیک هستند [۱۴].

$$G_{PV}(s) = \frac{K_{PV}}{1 + sT_{PV}} \quad (4)$$

۲-۳- الکترولایزر و پیل سوختی

پیل سوختی و الکترولایزر آبی در یک مجموعه، برای تولید انرژی عمل می‌کنند. به این صورت که سوخت مورد نیاز برای پیل سوختی هیدروژن است و توسط الکترولایزر تولید می‌شود. بخشی از توان‌های تولید شده توسط مولد فتوولتائیک و ژنراتور توربین بادی به عنوان سوخت در جهت تولید هیدروژن به الکترولایزر داده می‌شود. رفتار دینامیکی این دو منبع به صورت یک سیستم مرتبه اول در روابط (۵) و (۶) نشان داده شده است [۲۴].

$$G_{AE}(s) = \frac{K_{AE}}{1 + sT_{AE}} \quad (5)$$

$$G_{FC}(s) = \frac{K_{FC}}{1 + sT_{FC}} \quad (6)$$

در روابط فوق، K_{AE} و T_{AE} به ترتیب بهره و ثابت زمانی الکترولایزر را نشان می‌دهند و همچنین K_{FC} و T_{FC} بهره و ثابت زمانی پیل سوختی هستند. برای شبیه سازی این مدل مقدار K برابر با 0.7 در نظر گرفته شده است.

۲-۴- باتری و چرخ طیار

منابع ذخیره‌ساز انرژی نقش مهمی را در ریزشبه‌های جزیره‌ای بر عهده دارند. در شرایط اضطراری یا در حالتی که منابع تولید انرژی تجدیدپذیر در حداکثر توان خود نباشند، ریزشبه با وجود منابع ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند عملکرد مناسبی را در تثبیت فرکانس سیستم از خود نشان دهد.

تابع تبدیل سیستمی که مشخصه دینامیکی آن با استفاده از معادلات دیفرانسیل مرتبه کسری بیان شده باشد، دارای مرتبه کسری از s می‌باشد. با استفاده از روش تخمین CRONE، کنترل کننده مقاوم مرتبه کسری بصورت رابطه (۱۲) فرموله می‌شود [۳۲].

$$S^\alpha \approx G \prod_{n=1}^N \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z,n}}}{1 + \frac{s}{\omega_{p,n}}} \quad (12)$$

در رابطه فوق، G نشان دهنده بهره متغیر است. در حالت کلی، کنترل کننده مرتبه کسری بصورت $PI^\lambda D^\mu$ بیان می‌شود که تابع تبدیل آن در رابطه (۱۳) نشان داده شده است.

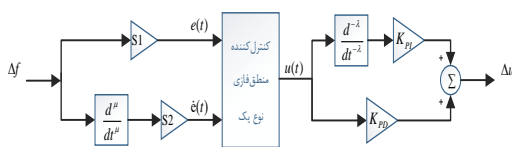
$$G(s) = K_p + K_D s^\mu + \frac{K_I}{s^\lambda} \quad (13)$$

در رابطه فوق، K_p ، K_D و K_I بیان کننده ضرایب کنترل کننده PID و λ و μ بترتیب نشان دهنده مرتبه انتگرال گیر و مرتبه مشتق گیر می‌باشند. باید توجه داشت مقادیر مرتبه کسری بین صفر و یک هستند در صورتی که توان s کنترل کننده PID کلاسیک در (۱۳) دارای مقادیر صحیح یک هستند.

در مرجع [۳۶] نشان داده می‌شود که عملکرد کنترل کننده $PI^\lambda D^\mu$ از نظر سرعت پاسخگویی و نیز پایداری بهتر، از کنترل کننده PID معمولی است.

۳-۳ کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری

نمای کلی کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است، کنترل کننده دارای دو ورودی و یک خروجی می‌باشد [۳۱].



شکل ۵- نمای کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری ورودی‌های کنترل کننده فازی به ترتیب خطا و مشتق مرتبه کسری خطا هستند. ضرایب $S1$ و $S2$ برای مقیاس گذاری ورودی‌های کنترل کننده فازی در نظر گرفته شده‌اند. با قرار دادن بلوک‌های بهره و انتگرال مرتبه کسری در خروجی کنترل کننده فازی، همان $u(t)$ نشان داده شده در شکل، ساختار کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری بدست می‌آید.

۳- طراحی کنترل کننده پیشنهادی

در این بخش توضیح دقیقی در مورد ساختار و اجزای کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری ارائه می‌گردد.

۳-۱- مبانی حساب دیفرانسیل و انتگرال مرتبه کسری

به انتگرال و دیفرانسیل متوالی مرتبه n هر تابع تصادفی که در آن، n یک مقدار حقیقی است، حساب دیفرانسیل و انتگرال کسری گفته می‌شود. در حساب کسری، معمولاً از عملگر انتگرال-دیفرانسیل (که به صورت ${}_a D_b^\alpha$ نشان داده می‌شود) برای ترکیب عملگرهای دیفرانسیل و انتگرال استفاده می‌شود که در آن a و b به ترتیب نشان دهنده حد بالا و پایین هستند و $\alpha \in \mathbb{R}$ نشان دهنده ترتیب عملگرهای متفاوت است. تعریف این عملگر در رابطه (۸) ارائه شده است که هم مشتق کسری و هم انتگرال کسری را به صورت مجزا نشان می‌دهد [۳۱].

$${}_a D_b^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & R(\alpha) > 0 \\ 1 & R(\alpha) = 0 \\ \int_a^b (dt)^{-\alpha} & R(\alpha) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

طبق توضیحات ریمان-لیوویل (RL)، مشتق و انتگرال کسری از مرتبه α بترتیب طبق روابط (۹) و (۱۰) بیان می‌شوند که در آن n یک عدد صحیح و $\Gamma(\cdot)$ عبارت گامای اولیر است [۳۲].

$${}_a D_b^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_0^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} f(\tau) d\tau \quad (9)$$

$$n-1 \leq \alpha \leq n$$

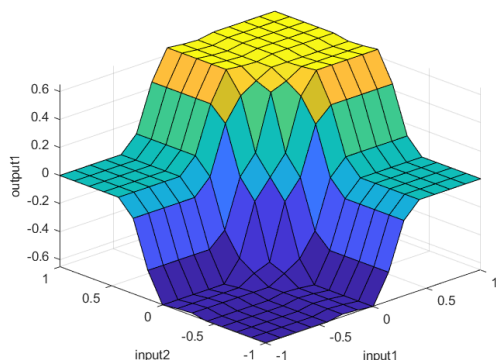
$${}_a D_b^{-\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t (t-\tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau \quad (10)$$

۳-۲ کنترل کننده PID مرتبه کسری

بیان مرتبه کسری توسط Oustaloup ارائه شده است که اصل نظم کسری را در ریاضیات نشان می‌دهد. در سال ۱۹۹۷ با استفاده از مبانی اصل مرتبه کسری و در راستای اصلاح کنترل کننده PID معمولی، کنترل کننده PID مرتبه کسری $FOPID$ ^{۳۹} طراحی شده است [۳۶]. با اعمال تبدیل لاپلاس به معادله (۱۰) و با در نظر گرفتن شرایط اولیه صفر، معادله (۱۱) به دست می‌آید.

$$L\{{}_a D_b^\alpha f(t)\} = s^\alpha F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^k {}_a D_b^{\alpha-k-1} f(t)|_{t=0} \quad (11)$$

^{۳۹} Fractional Order Proportional Integral Derivative



شکل ۷-۳ بعدی تغییرات ورودی‌ها بر خروجی

نکته مهم در کنترل کننده فازی PID مرتبه کسری، تعیین ضرایب S_1 , S_2 , μ , λ , K_{PD} و K_{PI} می‌باشد. برای انجام این کار می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری و فرا ابتکاری مانند الگوریتم جستجوی گرانشی، ازدحام سالپ و غیره استفاده نمود [۲۷-۲۹]. در این مقاله به دلیل وجود ویژگی‌هایی خاص الگوریتم Cheetah شامل عدم گرفتاری در بهینه محلی و جلوگیری از همگرایی زودرس در جهت بهینه‌سازی کنترل کننده پیشنهاد و تعیین ضرایب آن استفاده شده است که در بخش ۴ به تفصیل توضیح داده خواهد شد [۳۷].

۴- بهینه‌سازی کنترل کننده فازی PID مرتبه - کسری با الگوریتم Cheetah

الگوریتم بهینه‌ساز Cheetah که با نام اختصاری CO معرفی شده است همانند بیشتر الگوریتم‌های فراابتکاری از نوع هوش مصنوعی بوده و از رفتار یوزپلنگ‌ها در طبیعت نشأت گرفته است. هنگامی که یک یوزپلنگ در حال گشت زنی یا بررسی محیط اطراف خود است، امکان تشخیص طعمه وجود دارد. یوزپلنگ با دیدن طعمه ممکن است در جای خود بنشیند و منتظر بماند تا طعمه به آن نزدیک شود و سپس حمله را آغاز کند. حالت حمله شامل مراحل شتاب گرفتن است. یوزپلنگ ممکن است به دلایل مختلفی مانند محدودیت انرژی، فرار سریع طعمه و غیره از شکار دست بکشد. سپس ممکن است برای استراحت به خانه برگردد و شکار جدیدی را شروع کند. بنابراین یوزپلنگ با ارزیابی طعمه، وضعیت، منطقه و فاصله او با طعمه، ممکن است یکی از روش‌ها و فعالیت‌های ۱ تا ۴ را، که در زیر بیان شده‌اند، انتخاب کند [۳۷]:

(۱) جستجو

مقادیر فازی‌سازی شده از ورودی‌های $e(t)$ و $\dot{e}(t)$ با استفاده از پایگاه قواعد به موتور استنتاج فازی ارسال می‌شوند و مقدار خروجی در قسمت نافازی‌ساز با استفاده از نتیجه بدست آمده از موتور استنتاج فازی محاسبه می‌شود. پایگاه قواعد فازی عملیات اساسی منطق فازی برای نگاشت سیگنال ورودی به سیگنال خروجی را انجام می‌دهد. پایگاه قواعد به کار گرفته شده در جدول ۲، از ۲۵ قانون بر اساس دانش و تجربیات عملی کنترل تشکیل شده است. پایگاه قواعد سیستم فازی از قواعد (اگر-آنگاه) استفاده می‌کند و به صورت (۱۴) بیان می‌شود.

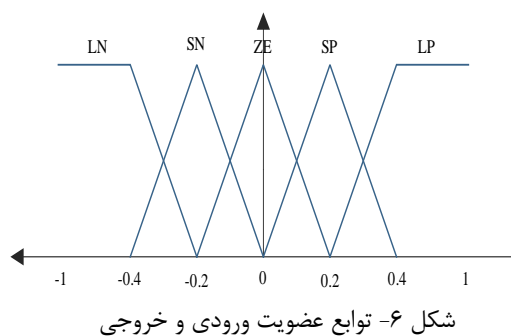
If Input 1 is A and Input 2 is B, Then (۱۴)
output is C

که در آن A , B و C به معنای متغیرهای زبانی منطق فازی در مجموعه‌های مربوطه است.

جدول ۲- قواعد فازی

$e(t)$ / $\dot{e}(t)$	LN	SN	ZE	SP	LP
LN	ZE	SP	LP	LP	LP
SN	SN	ZE	SP	LP	LP
ZE	LN	SN	ZE	SP	LP
SP	LN	LN	SN	ZE	SP
LP	LN	LN	LN	SN	ZE

توابع عضویت ورودی‌ها $e(t)$ و $\dot{e}(t)$ و خروجی u در شکل (۶) ارائه شده‌اند. متغیرهای زبانی منطق فازی شامل LN, SN, ZE, SP و LP به ترتیب نماد منفی بزرگ، منفی کوچک، صفر، مثبت کوچک و مثبت بزرگ هستند. همچنین در شکل (۷) اثر تغییرات ورودی‌ها بر خروجی منطق فازی بصورت شکل ۳ بعدی رسم شده است.



شکل ۶- توابع عضویت ورودی و خروجی

براساس ماهیت غیر قابل پیش‌بینی بار شبکه و نیز عدم قطعیت موجود در توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، سه سناریوی مختلف به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

سناریوی ۱: تغییرات بار بدون تغییرات توان منابع تجدیدپذیر

سناریوی ۲: تغییرات توان منابع تجدیدپذیر بدون تغییرات بار

سناریوی ۳: تغییرات بار و توان منابع تجدیدپذیر. هدف اصلی کنترل‌کننده موجود در ریزشبه، کنترل فرکانس ریزشبه و حداقل نمودن تغییرات آن می‌باشد. در تمام سناریوها، نتایج مربوط به عملکرد چهار کنترل‌کننده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. کنترل‌کننده‌های در نظر گرفته شده عبارتند از:

کنترل‌کننده PID کلاسیک (PID)

کنترل‌کننده PID مرتبه‌کسری (FOPID)

کنترل‌کننده فازی - PID (FPID)

کنترل‌کننده پیشنهادی: کنترل‌کننده فازی - PID مرتبه-کسری (FOFPID)

لازم به ذکر است که برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده‌های مفروض از الگوریتم بهینه‌سازی CO استفاده شده است. همچنین برای بررسی میزان تاثیر تغییرات پارامترهای سیستم بر روی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، از آنالیز حساسیت استفاده شده است. نهایتاً با اعمال الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگری مانند GA [۳۹]، PSO [۲۵] و SCA [۴۰] به کنترل‌کننده پیشنهادی، دقت و عملکرد قابل قبول الگوریتم CO در تثبیت فرکانس ریزشبه نشان داده می‌شود.

۵-۱- سناریوی ۱: تغییرات بار بدون تغییرات توان منابع تجدیدپذیر

در این بخش تاثیر اعمال تغییرات بار الکتریکی بر روی تغییرات فرکانس ریزشبه بررسی می‌شود. برای این کار فرض بر آن است که تغییرات بار ریزشبه مطابق شکل (۸) باشد.

مقدار اختلاف فرکانس ایجاد شده در ریزشبه با در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌های بیان شده در شکل (۹) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده پیشنهادی، در مقایسه با دیگر کنترل‌کننده‌ها، از نظر سرعت پاسخ و میزان فراجهد عملکرد مطلوب‌تری دارد.

(۲) نشست و انتظار
(۳) حمله: این عمل دارای دو مرحله اساسی شتاب و گرفتن است

(۴) شکار را رها کند و به خانه برگردد.

در حالت کلی می‌توان گفت که الگوریتم بهینه‌سازی CO، عبارتست از استفاده هوشمندانه از روش‌های ذکر شده فوق در طول دوره‌های شکار بطوری که تابع هدف موردنظر مساله را به بهترین حالت بهینه کند. توابع هدف متفاوتی برای پیاده‌سازی الگوریتم CO می‌توان به کار گرفت که عبارتند از [۳۸]:

انتگرال قدرمطلق خطا (IAE)

انتگرال قدرمطلق خطا ضرب شده در زمان (ITAE)

انتگرال مربعات خطا (ISE)

انتگرال مربعات خطا ضرب شده در زمان (ITSE)

مطالعات گذشته نشان داده‌اند که تابع هدف ITAE زمان نشست را کمتر از دو معیار ISE و IAE ارائه می‌دهد و این معیار بهترین تابع هزینه در مطالعات کنترل بار فرکانس می‌باشد [۳۸]. بنابراین در این مقاله، تابع هدف انتخاب شده برای ریزشبه هیبرید تک ناحیه‌ای، ITAE است که به صورت رابطه (۱۵) در زیر بیان می‌شود.

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t. |\Delta f|. dt \quad (15)$$

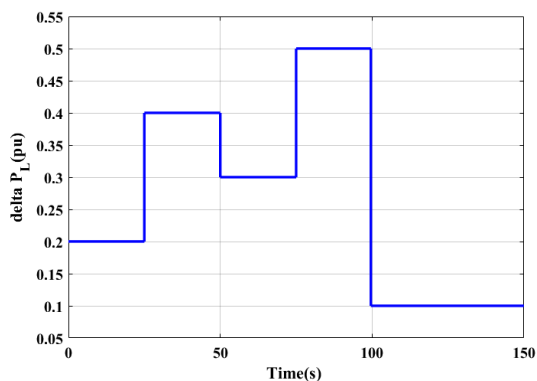
در رابطه فوق، t_{sim} بترتیب نشان دهنده انحراف فرکانس (خطا) و زمان شبیه‌سازی می‌باشند.

۵- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش به شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی به ریزشبه نشان داده شده در شکل (۱) پرداخته می‌شود. مقادیر پارامترهای ریزشبه در جدول ۱ به شرح زیر بیان شده است [۳۱].

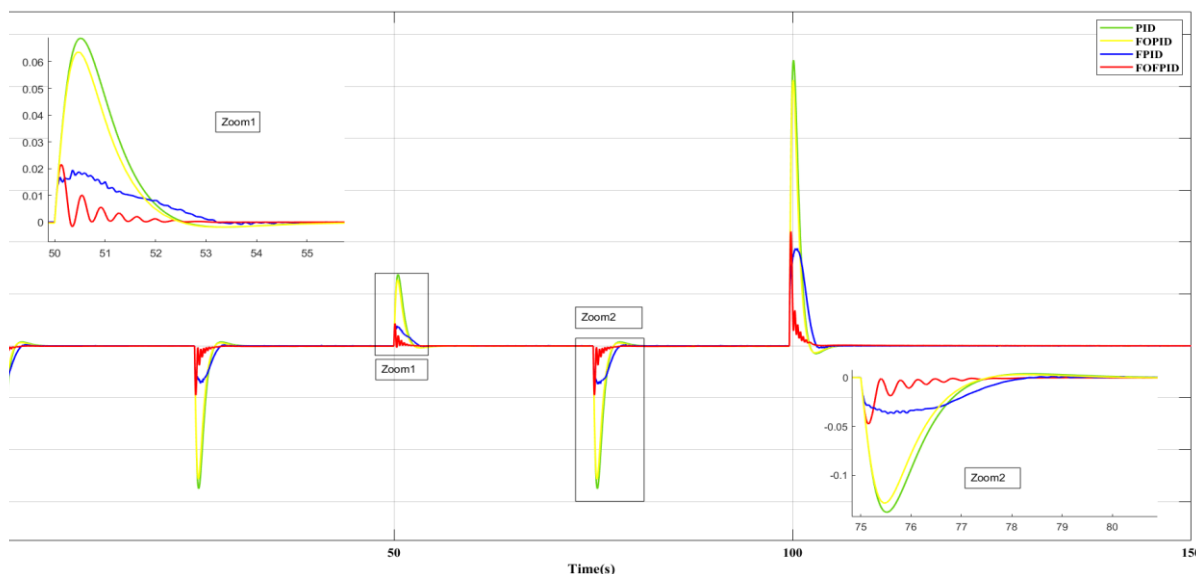
جدول ۱- پارامترهای ریزشبه

منابع ریزشبه	بهره	ثابت زمانی	نرخ توان
WTG	۳	۱/۵	۱۰۰ kW
PV	۲	۱/۸	۱۰۰ kW
AE	۰/۰۲	۰/۵	۱۰۰ kW
FC	۰/۰۲	۴	
Governor	۰/۰۵	۱	۲۰۰ kW
Diesel Generator	۰/۰۶	۱	
BESS	-۰/۰۰۳	۰/۱	۲۰۰ kWh
FESS	-۰/۰۱	۰/۱	۲۰۰ kW



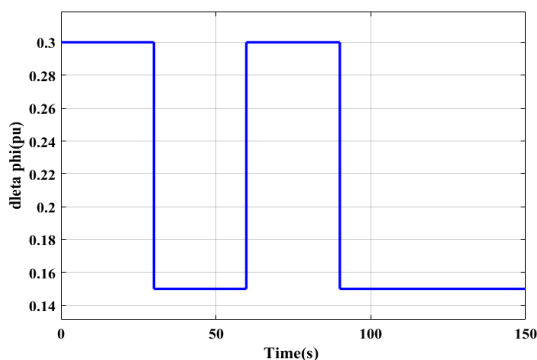
شکل ۸- تغییرات بارالکتریکی

جدول ۴، مقادیر معیارهای مختلف اندازه‌گیری خطا را برای کنترل کننده‌های در نظر گرفته شده در سناریوی اول را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، کنترل کننده پیشنهادی FOPPID از نظر معیار ITAE، که بهینه‌سازی بر مبنای آن انجام شده است، نسبت به کنترل کننده‌های PID، FOPID و FPID دارای بهبود ۸۹/۸۱٪، ۷۹/۹۹٪ و ۶۱/۲۵٪ می‌باشد. با دقت در مقادیر دیگر معیارهای خطا نیز ملاحظه می‌شود که کنترل کننده پیشنهادی دارای خطای کمتر و عملکرد مطلوبتری نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها می‌باشد.



شکل ۹- تغییرات فرکانس در سناریوی ۱

برای کنترل کننده‌های مفروض در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همچنین جدول ۵، مقادیر معیارهای مختلف اندازه‌گیری خطا را برای چهار کنترل کننده نشان می‌دهد. بار دیگر ملاحظه می‌شود که کنترل کننده پیشنهادی نسبت به سایر کنترل کننده‌ها از نظر دینامیکی و معیارهای مختلف خطا دارای عملکرد مطلوبتری می‌باشد.



شکل ۱۰- تغییرات شدت تابش نور خورشید

جدول ۴- مقادیر معیارهای مختلف اندازه‌گیری خطا در

سناریوی ۱

کنترلر / معیار	PID	FOPPID	FPID	FOFPID
IAE	۰/۸۹۰۷	۰/۸۰۶۲	۰/۴۱۶۳	۰/۱۶۱۳
ISE	۰/۱۰۹۹	۰/۰۸۸۴۶	۰/۰۱۷۵۴	۰/۰۰۴۸۰۵
ITSE	۷/۸۰۸	۶/۲۷۳	۱/۴۰۸	۰/۳۷۹۷
ITAE	۵۳/۳	۴۸/۲۷	۲۷/۰۲	۱۰/۷

۵-۲- سناریوی ۲: تغییرات توان منابع تجدیدپذیر

بدون دخالت تغییرات بار

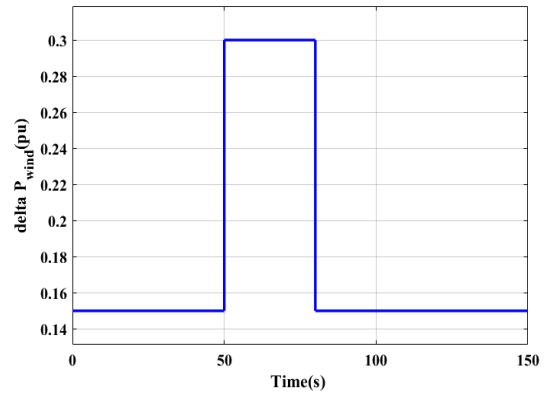
در این سناریو، تغییرات شرایط آب و هوایی شامل شدت نور خورشید و سرعت باد، بصورت نشان داده شده در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، در نظر گرفته شده است و از تغییرات بار الکتریکی صرف نظر می‌گردد. مقدار تغییرات فرکانس ایجاد شده به ازای تغییرات شرایط آب و هوایی در نظر گرفته شده

۳-۵- سناریوی ۳: تغییرات بار و توان منابع تجدیدپذیر

در این سناریو، تمامی تغییرات نشان داده شده در شکل‌های (۸)، (۱۰) و (۱۱) به ریزش شبکه اعمال می‌شوند. شکل (۱۳) تغییرات فرکانس ریزش شبکه را در برابر نوسانات بار و توان منابع تجدیدپذیر با استفاده از چهار کنترل کننده مفروض نشان می‌دهد. مقادیر معیارهای مختلف اندازه‌گیری خطا برای چهار کنترل کننده در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده موید عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده‌های دیگر از نظر دینامیکی و مقدار خطا می‌باشد.

جدول ۶- مقادیر معیارهای مختلف اندازه‌گیری خطا در سناریوی ۳

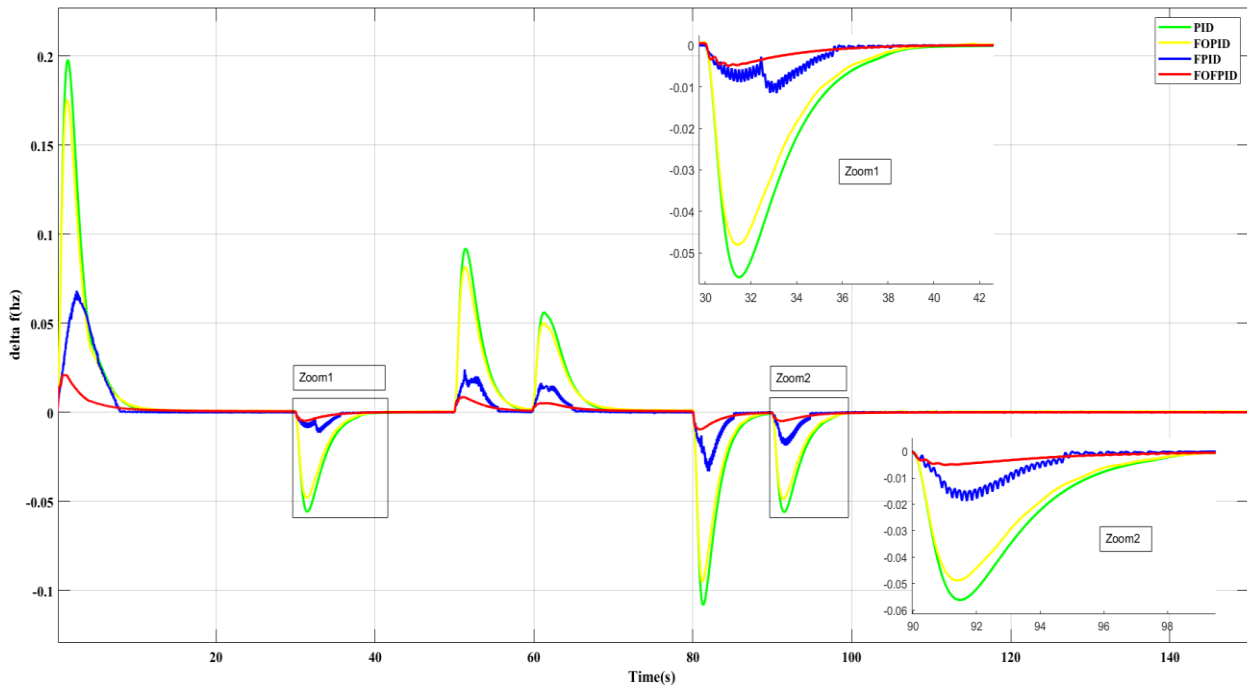
کنترلر معیار	PID	FOPID	FPID	FOFPID
IAE	۲/۱۷۶	۱/۹۵۲	۰/۸۰۹۴	۰/۳۱۸۸
ISE	۰/۱۹۹۲	۰/۱۵۷۴	۰/۰۲۸۰۱	۰/۰۰۵۶۶۱
ITSE	۱۱/۴۸	۹/۰۹۷	۱/۷۵۵	۰/۴۱۶۲
ITAE	۱۱۸/۵	۱۰۶/۷	۴۴/۳۱	۱۸/۴۸



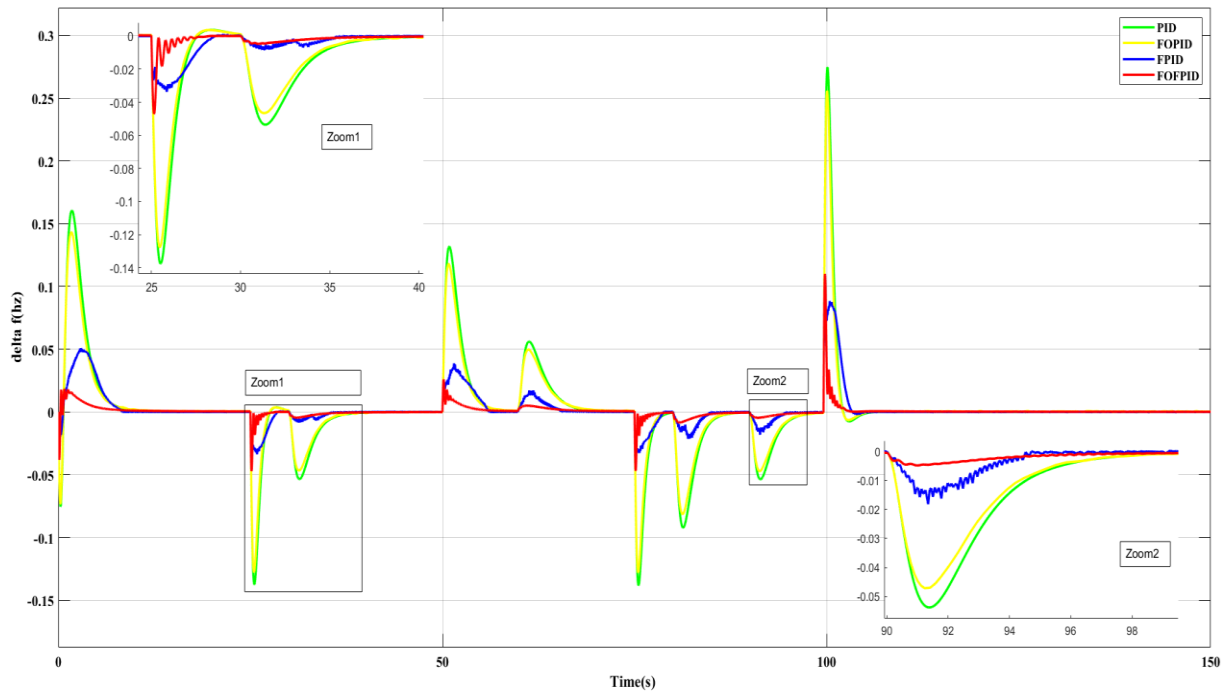
شکل ۱۱- تغییرات سرعت باد

جدول ۵- مقادیر معیارهای مختلف اندازه‌گیری خطا در سناریوی ۲

کنترلر معیار	PID	FOPID	FPID	FOFPID
IAE	۱/۷۷	۱/۶۰۴	۰/۵۴۲۲	۰/۲۳۵۵
ISE	۰/۱۳۴	۰/۱۰۳۵	۰/۰۱۶۰۹	۰/۰۰۱۵۵۱
ITSE	۴/۲۰۹	۳/۲۱۷	۰/۲۸۷	۰/۰۴۲۵۴
ITAE	۷۹/۴۱	۷۲/۷۶	۱۹/۱۷	۱۰/۲۸



شکل ۱۲- تغییرات فرکانس در سناریوی ۲



شکل ۱۳- تغییرات فرکانس در سناریو ۳

جدول ۷- نتایج آنالیز حساسیت

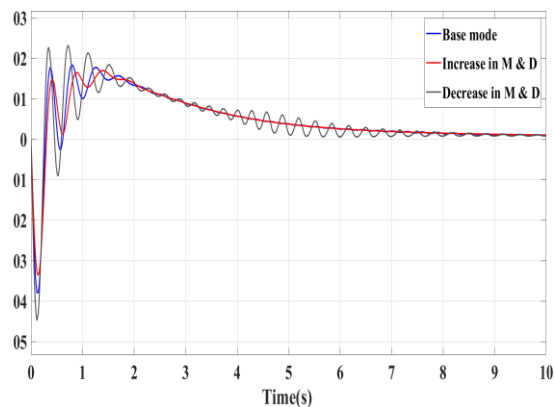
کنترلر / معیار	حالت پایه	D و M، ۲۰٪	
		افزایش	کاهش
IAE	۰/۰۶۲۰۲	۰/۰۶۱۱۶	۰/۰۶۲۴۴
ISE	۰/۰۰۰۷۵۷۳	۰/۰۰۰۷۰۷۵	۰/۰۰۰۸۶۵۶
ITSE	۰/۰۰۱۱۶۲	۰/۰۰۱۱۵۴	۰/۰۰۱۱۸۳
ITAE	۰/۱۶۸۸	۰/۱۶۹۱	۰/۱۵۶۵

۴-۵ آنالیز حساسیت

در این بخش، از آنالیز حساسیت برای بررسی تاثیر تغییرات پارامترهای شبکه بر عملکرد کنترل کننده استفاده شده است. برای این کار، فرض بر آن است که مقادیر M و D مربوط به ریزشکه به اندازه ۲۰ درصد کاهش و یا افزایش داده شوند. شبیه‌سازی‌ها برای سناریوی ۳ و با در نظر گرفتن کنترل کننده پیشنهادی تا زمان ۱۵ ثانیه صورت گرفته است. شکل (۱۴)، مقدار اختلاف فرکانس را برای حالت پایه و حالت‌های مربوط به اعمال تغییرات یاد شده نشان می‌دهد. مقدار خطاهای بدست آمده در جدول ۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود به ازای اعمال ۲۰٪ افزایش / کاهش در مقادیر D و M، معیار ITAE بترتیب به اندازه ۰/۱۷٪ و ۷/۳٪ تغییر می‌کند.

۵-۵ مقایسه عملکرد الگوریتم CO با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی

همانگونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد، در این مقاله برای تثبیت فرکانس ریزشکه از کنترل کننده FOPID و برای تعیین پارامترهای آن از الگوریتم بهینه‌سازی CO استفاده شده است. مشخصا الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگری نیز برای انجام این کار می‌توان استفاده نمود. لذا به منظور نمایش کارایی بهتر الگوریتم CO، در این بخش به مقایسه نتایج مربوط به این الگوریتم با سه الگوریتم دیگر شامل: PSO، GA و SCA پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی‌ها برای سناریوی ۱ انجام شده است. شکل (۱۵) نمودار همگرایی را به ازای اعمال الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف نشان می‌دهد. نهایتا مقدار تابع هدف مربوط به الگوریتم‌های فوق در جدول ۷ نشان داده شده است.



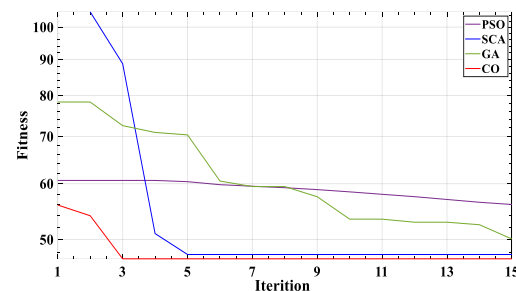
شکل ۱۴- آنالیز حساسیت

شبکه، یک کنترل کننده پیشنهاد شده است که در آن، از ترکیب منطق فازی با کنترل کننده PID مرتبه کسری استفاده می شود. تعیین پارامترهای کنترل کننده، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی CO و با در نظر گرفتن معیار انتگرال قدرمطلق خطای ضرب شده در زمان (ITAE) بعنوان تابع هدف صورت گرفته است. برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده است که در آن ها نتایج مربوط به کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده های دیگر مقایسه شده است. همچنین برای بررسی میزان تاثیر تغییرات پارامترهای شبکه بر عملکرد کنترل کننده پیشنهادی از آنالیز حساسیت استفاده شده است. نهایتاً برای نمایش میزان کارایی الگوریتم CO بکار گرفته شده در کنترل کننده پیشنهادی، نتایج حاصل از آن با سه الگوریتم بهینه سازی دیگر شامل PSO، GA و SCA مقایسه شده است. نتایج بدست آمده، نشان می دهد که استفاده از کنترل کننده پیشنهادی از نظر دامنه نوسان فرکانس ریزش شبکه و مقدار تابع هدف، عملکرد بهتری در مقایسه با دیگر کنترل کننده ها از خود نشان می دهد. همچنین ملاحظه شد که الگوریتم CO در مقایسه با الگوریتم های بهینه سازی دیگر، منجر به سرعت همگرایی بالاتر و مقدار تابع هدف کمتر می شود.

بر اساس نتایج بدست آمده، ملاحظه می شود که استفاده از الگوریتم CO در مقایسه با دیگر الگوریتم های بهینه سازی، باعث سرعت همگرایی بالاتر و مقدار تابع هدف کمتر می شود.

جدول ۷- نمایش تابع هدف

تابع هدف الگوریتم	ITAE
PSO	۵۶/۰۶۰۳
GA	۵۰/۰۹۳۲
SCA	۴۷/۶۱۸۵
CO	۴۶/۹۵۵



شکل ۱۵- نمودار همگرایی مربوط به الگوریتم های مختلف

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، برای تثبیت فرکانس ریزش شبکه هیبرید جدا از

مراجع

- [1] M. Chandel, J. Ulamai, and A.J. Irani. "Frequency load control based on the improved phase controller in a microgrid with the presence of thermoelectric." *Scientific-Research Journal of Energy Engineering and Management* 12. no. 2 (2022): 26-37. (in Persian)
- [2] F. Amiri and A. Hatami. "Microgrid Load-Frequency Control Based on Nonlinear Model Using Fractional-Order PID Method Optimized with HCRPSO-PS Hybrid Algorithm." *Journal of Iranian Electrical and Electronic Engineering Association* 17. no. 2 (2019): 135-148. (in Persian)
- [3] M.N.H. Shazon, and A. Jawad. "Frequency control challenges and potential countermeasures in future low-inertia power systems: A review." *Energy Reports* 8 (2022): 6191-6219.
- [4] K.S. Rajesh, S.S. Dash, and R. Rajagopal. "Load frequency control of microgrid: A technical review." *Green Buildings and Sustainable Engineering: Proceedings of GBSE* (2020): 115-138.
- [5] A.J. Veronica, N.S. Kumar, and F. Gonzalez-Longatt. "Design of load frequency control for a microgrid using D-partition method." *International Journal of Emerging Electric Power Systems* 21. no. 1(2020): 20190175.
- [6] P. Jampeethong, and S. Khomfoi. "Coordinated control of electric vehicles and renewable energy sources for frequency regulation in microgrids." *IEEE Access* 8 (2020): 141967-141976.
- [7] M.H. Soliman, H.E. Talaat, and M.A. Attia. "Power system frequency control enhancement by optimization of wind energy control system." *Ain Shams Engineering Journal* 12. no. 4(2021):3711-3723.
- [8] A. Al-Hinai, H. Alyammahi, and H.H. Alhelou. "Coordinated intelligent frequency control incorporating battery energy storage system, minimum variable contribution of demand response, and variable load damping coefficient in isolated power systems." *Energy Reports* 7 (2021): 8030-8041.
- [9] B. Khokhar, S. Dahiya, and K.S. Parmar. "Load frequency control of a microgrid employing a 2D Sine Logistic map based chaotic sine cosine algorithm." *Applied Soft Computing* 109 (2021): 107564.

- [10] E.A. Mohamed, E. Gouda, and Y. Mitani. "Impact of SMES integration on the digital frequency relay operation considering High PV/Wind penetration in micro-grid." *Energy Procedia* 157 (2019): 1292-1304.
- [11] G. Magdy, G. Shabib, A.A. Elbaset, T. Kerdphol, Y. Qudaih, H. Bevrani, and Y. Mitani. "Tustin's technique based digital decentralized load frequency control in a realistic multi power system considering wind farms and communications delays." *Ain Shams Engineering Journal* 10. no. 2 (2019): 327-341.
- [12] A.E. Khalil, T.A. Boghdady, M.H. Alham, and D.K. Ibrahim. "Enhancing the Conventional Controllers for Load Frequency Control of Isolated Microgrids Using Proposed Multi-Objective Formulation Via Artificial Rabbits Optimization Algorithm." *IEEE Access* 11 (2023): 3472-3493.
- [13] V. Çelik, M.T. Özdemir, and K.Y. Lee. "Effects of fractional-order PI controller on delay margin in single-area delayed load frequency control systems." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 7. no. 2 (2019): 380-389.
- [14] F. Amiri, and M.H. Moradi. "A new control strategy for controlling isolated microgrid." *Engineering and Energy Management* 10. no. 4 (2023): 60-73.
- [15] P.K. Pathak, A.K. Yadav, S.Padmanaban, and I. Kamwa. "Fractional Cascade LFC for Distributed Energy Sources via Advanced Optimization Technique Under High Renewable Shares." *IEEE Access* 10 (2022): 92828-92842.
- [16] M.R. Chen, G.Q. Zeng, Y.X. Dai, K.D. Lu, and D.Q. Bi. "Fractional-order model predictive frequency control of an islanded microgrid." *Energies* 12. no. 1 (2018): 84.
- [17] H. Ali, G. Magdy, B. Li, G. Shabib, A.A. Elbaset, D. Xu, and Y. Mitani. "A new frequency control strategy in an islanded microgrid using virtual inertia control-based coefficient diagram method." *IEEE Access* 7 (2019): 16979-16990.
- [18] A. Fathi, Q. Shafiee, and H. Bevrani. "Robust frequency control of microgrids using an extended virtual synchronous generator." *IEEE Transactions on Power Systems* 33. no. 6 (2018): 6289-6297.
- [19] D. Kumar, H.D. Mathur, S. Bhanot, and R.C. Bansal. "Modeling and frequency control of community microgrids under stochastic solar and wind sources." *Engineering Science and Technology. an International Journal* 23. no. 5 (2020): 1084-1099.
- [20] Y. Zou, J. Qian, Y. Zeng, S. Ismail, F. Dao, Z. Feng, C. Nie, and H. Mei. "Optimized Robust Controller Design Based on CPSOGSA Optimization Algorithm and H₂/H_∞ Weights Distribution Method for Load Frequency Control of Micro-Grid." *IEEE Access* 9 (2021): 162093-162107.
- [21] M. Shojaee, and S.M. Azizi. "Decentralized Robust Controller Design for Strongly Interconnected Generators." *IEEE Access* 11 (2023): 16085-16095.
- [22] A. Rafiee, Y. Batmani, F. Ahmadi, and H. Bevrani. "Robust load-frequency control in islanded microgrids: Virtual synchronous generator concept and quantitative feedback theory." *IEEE Transactions on Power Systems* 36. no. 6 (2021): 5408-5416.
- [23] S.K. Akula, and H. Salehfar. "Frequency control in microgrid communities using neural networks." *In 2019 North American Power Symposium* (2019): 1-6.
- [24] D. Kumar, H.D. Mathur, S. Bhanot, and R.C. Bansal. "Forecasting of solar and wind power using LSTM RNN for load frequency control in isolated microgrid." *International Journal of Modelling and Simulation* 41. no. 4 (2021): 311-323.
- [25] A. Safari, F. Babaei, and M. Farrokhifar. "A load frequency control using a PSO-based ANN for micro-grids in the presence of electric vehicles." *International Journal of Ambient Energy* 42. no. 6 (2021): 688-700.
- [26] T. Kerdphol, M. Watanabe, K. Hongesombut, and Y. Mitani. "Self-adaptive virtual inertia control-based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration." *IEEE Access* 7 (2019): 76071-76083.
- [27] N.E.Y. Kouba, M. Menaa, M. Hasni, and M. Boudour. "A new robust fuzzy-PID controller design using gravitational search algorithm." *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology* 11. no. 3 (2019): 331-360.
- [28] S. Nayak, S.K. Kar, S.S. Dash, P. Vishnuram, S.B. Thanikanti, and B. Nastasi. "Enhanced Salp Swarm Algorithm for Multimodal Optimization and Fuzzy Based Grid Frequency Controller Design." *Energies* 15. no. 9 (2022): 3210.

- [29] D. Mohanty, and S. Panda. "A modified moth flame optimization technique tuned adaptive fuzzy logic PID controller for frequency regulation of an autonomous power system." *International Journal of Sustainable Energy* 40. no. 1 (2021): 41-68.
- [30] B. Khokhar, S. Dahiya, and K.S. Parmar. "A novel hybrid fuzzy PD-TID controller for load frequency control of a standalone microgrid." *Arabian Journal for Science and Engineering* 46 (2021): 1053-1065.
- [31] T. Mahto, H. Malik, V. Mukherjee, M.A. Alotaibi, and A. Almutairi. "Renewable generation-based hybrid power system control using fractional order-fuzzy controller." *Energy Reports* 7 (2021): 641-653.
- [32] D. Mohanty, and S. Panda. "Modified salp swarm algorithm-optimized fractional-order adaptive fuzzy PID controller for frequency regulation of hybrid power system with electric vehicle." *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 32. no. 2 (2021): 416-438.
- [33] G. Sahoo, R.K. Sahu, N.R. Samal, and S. Panda. "Analysis of type-2 fuzzy fractional-order PD-PI controller for frequency stabilisation of the micro-grid system with real-time simulation." *International Journal of Sustainable Energy* 41. no. 5 (2022): 412-433.
- [34] P. Jekan, and C. Subramani. "The performance analysis of type-2 fuzzy fractional-order tilt integral derivative controller with enhanced Harris hawks optimization." *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 43. no. 12 (2021): 2818-2834.
- [35] S.K. Govindaraju, and R. Sivalingam. "Design, analysis, and real-time validation of type-2 fractional order fuzzy PID controller for energy storage-based microgrid frequency regulation." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 31. no. 3 (2021): 12766.
- [36] P.C. Sahu, R.C. Prusty, and S. Panda. "Improved-GWO designed FO based type-II fuzzy controller for frequency awareness of an AC microgrid under plug in electric vehicle." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 12 (2021): 1879-1896.
- [37] M.A. Akbari, M. Zare, R. Azizipanah-Abarghooee, S. Mirjalili, and M. Deriche. "The cheetah optimizer: A nature-inspired metaheuristic algorithm for large-scale optimization problems." *Scientific Reports* 12. no. 1(2022): 10953.
- [38] A. Akbari-Majd, H. Shayqi, H. Mohammadnejad, and A. Younisi. "Frequency Load Adaptive Resistive Controller Based on Reinforcement Learning for an Interconnected Power System Including SMES." *Electrical Engineering Journal of Tabriz University* 47. no. 2 (2016): 381-390. (in Persian)
- [39] S. Mirjalili. "Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications." Springer (2018).
- [40] S. Mirjalili. "SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems." *Knowledge-Based Systems* 96 (2016): 120-133.