

# Optimal Design of a TID Controller Based on the Minimization of Peak Overshoot of Frequency Deviation and Integral of Time-weighted Absolute Error for Load-Frequency Control of Interconnected Two-area Power Systems with Thermal, Gas, Hydro, Wind, and Solar Generation Sources Considering Governor Dead Band and Generation Rate Constraints

Bita Dastan,<sup>1</sup> Mojtaba Shivaie,<sup>2\*</sup> Mohsen Ghalehnoie<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran  
bita.dastan25@gmail.com

<sup>2</sup> Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran  
shivaie@shahroodut.ac.ir

<sup>3</sup> Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran  
ghalehnoie@shahroodut.ac.ir

---

## Keywords:

integral of the absolute time error  
maximum frequency deviation range  
interconnected two-area power system  
frequency-load control  
TID controller  
genetic algorithm  
wind and solar renewable energy  
sources

**Abstract:** Nowadays, with an increasing demand for electrical energy and the high penetration of renewable energy sources, frequency fluctuations pose a significant challenge to power system operators. In this paper, the frequency-load control problem based on the measures of (i) peak overshoot of frequency deviation and (ii) integral of time-weighted absolute error is explored from a new perspective for an interconnected, two-area power system. To this end, the proposed interconnected two-area power system includes thermal, gas, and hydro power generation sources as well as wind and solar renewable energy sources. Additionally, and from a technical perspective, nonlinear factors including dead-band governor and generation rate constraints are also taken into account for the newly developed interconnected two-area power system. To control the frequency, a fractional-order TID controller is widely employed due to its simple structure and high accuracy, the coefficients of which were optimized by a well-adjusted genetic algorithm. For comparison purposes, the performance of the suggested TID controller is compared with a PID controller in terms of dynamic parameters such as frequency deviation range, settling time, and stability speed. Simulation of the proposed interconnected two-area power system in the MATLAB/SIMULINK environment indicates that under various operating conditions the proposed TID controller exhibits better effectiveness and efficiency compared with the PID controller in terms of improving dynamic parameters.

---

## Original Research Article

Paper History:  
Received: 10/03/2024  
Revise: 30/06/2024  
Accepted: 01/07/2024

---

**How to cite this article:** Dastan, B., Shivaie, M., Ghalehnoie, M. "Optimal Design of a TID Controller Based on the Minimization of Peak Overshoot of Frequency Deviation and Integral of Time-Weighted Absolute Error for Load-Frequency Control of Interconnected Two-Area Power Systems with Thermal, Gas, Hydro, Wind, and Solar Generation Sources Considering Governor Dead Band and Generation Rate Constraints", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 1, PP. 46-59, Spring 2024. <https://doi.org/10.22052/eem.2024.254535.1058>

© 2023 University of Kashan Press.

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



## Introduction

Technically speaking, after a contingency occur, a balance between generation and load demand must be maintained in order to return the power system frequency to a predetermined reference value. This function is known as load frequency control (LFC). In recent years, due to the increasing complexity of power systems and the growing load demand, frequency fluctuations have increased. This has resulted in special importance of the LFC. Additionally, and more importantly, with an increase in openetration of renewable energy sources, the power system's inertia constant reduces as these sources inherently have significant fluctuations and uncertainties. As a consequence, frequency deviations will escalate, impacting power system's stability. With that in mind, modern power systems face not only challenges of imbalance between generation and load demand but also new concerns stemming from the high penetration of renewable energy sources, which affect the security and stability of power systems. Therefore, the LFC is recognized as a promising solution for stabilizing power system frequency. The frequency will remain constant, when there is a balance between generation and load demand. To mitigate the mismatch between the power generation capacity of sources and the power consumption of loads, automatic operation of turbine valves in power plants is widely utilized. This function, based on the LFC, tracks power system load variations in real-time, controls the generator output based on these variations, and, thereby achieves one of the main objectives of power control in the system, that is to maintain frequency within a specific range. Accordingly, in this current paper, the frequency-load control problem according to the measures of (i) peak overshoot of frequency deviation and (ii) integral of time-weighted absolute error is explored from a new point of view for an interconnected two-area power system. The proposed interconnected two-area power system consists of thermal, gas, and hydro power generation sources as well as wind and solar renewable energy sources, aiming at a diverse energy mix. Additionally, from a technical standpoint, nonlinear elements, including both dead-band governor and generation rate constraints are considered in the newly designed interconnected two-area power grid. For frequency regulation, a fractional-order TID controller is designed and used for its uncomplicated design and precise results, with its fine-tuned parameters using a well-optimized genetic algorithm.

## Results

Broadly speaking, the simulation results of the newly developed interconnected two-area power system in the SIMULINK environment of MATLAB platform demonstrated that the TID controller, had better performance and accuracy, compared with the PID controller. The use of this controller also mitigated the settling time and the output frequency deviation range of the interconnected two-area power system while increasing the speed of reaching stability. Additionally, and from another perspective, the TID controller was able to dampen effectively the frequency oscillations caused by the penetration of renewable wind and solar energy sources. As a result, the optimal design of a TID controller may provide an applicable model for frequency control purposes.

## Discussion and Conclusion

This paper initially employed a PID controller to achieve the goals of minimizing the frequency deviation range, to increase the speed of reaching stability, and to reduce absolute errors in an interconnected two-area power system. To attain these targets, a trial-and-error method was applied under multiple scenarios to reach the optimal control conditions for the frequency control of the interconnected two-area power system. In each scenario, the controller coefficients and system control parameters were optimized using a genetic algorithm. After finding the best control conditions with the PID controller, the proposed TID controller was consequently suggested. Through iterative simulation steps and executions, the simulation results illustrated that the TID controller outperformed the PID controller and was capable of optimizing the frequency deviation range up to 97.85 %, speed of reaching stability up to 77 % in a better way.

## طراحی بهینه یک کنترل کننده TID براساس کمینه سازی حداکثر دامنه انحراف فرکانس و انتگرال زمانی قدرمطلق خطا برای کنترل فرکانس بار سیستم های قدرت دوناحیه ای به هم پیوسته با منابع حرارتی، گازی، برق آبی، بادی و خورشیدی در حضور عوامل غیرخطی باند سکون گاورنر و محدودیت های نرخ تولید

بیبا دستان<sup>۱</sup>، مجتبی شیوایی<sup>۲\*</sup>، محسن قلعه نوئی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

bita.dastan25@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

shivaie@shahroodut.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

ghalehnoie@shahroodut.ac.ir

---

واژه های کلیدی:	چکیده: امروزه با توجه به رشد روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی و نفوذ بالای
انتگرال زمانی قدرمطلق خطا	منابع انرژی تجدیدپذیر، نوسانات فرکانس به عنوان یک چالش اساسی پیش روی
حداکثر دامنه انحراف فرکانس	بهره برداران سیستم های قدرت قرار دارد. لذا در این مقاله، با دیدگاهی جدید، مسئله
سیستم قدرت دوناحیه ای به هم پیوسته	کنترل فرکانس-بار براساس شاخص های (۱) حداکثر دامنه انحراف فرکانس و (۲)
کنترل فرکانس-بار	انتگرال زمانی قدرمطلق خطا برای یک سیستم قدرت دوناحیه ای به هم پیوسته مورد
کنترل کننده TID	مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، سیستم مورد مطالعه از منابع تولیدی حرارتی،
الگوریتم ژنتیک	گازی، برق آبی و همچنین، منابع تولیدی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی تشکیل شده
منابع تولیدی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی	است. در ساختار دوناحیه ای به هم پیوسته پیشنهادی، عوامل غیرخطی شامل باند
	سکون گاورنر و محدودیت های نرخ تولید در نظر گرفته شده است. برای کنترل
	فرکانس سیستم مورد مطالعه، از کنترل کننده مرتبه کسری TID به دلیل ساختار ساده و
	دقت بالا استفاده شده که ضرایب آن توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می شوند. به علاوه،
	عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده PID از نظر پارامترهای دینامیکی مانند
	دامنه انحرافات فرکانس، زمان نشست و سرعت رسیدن به پایداری مقایسه شده
	است. نتایج شبیه سازی ساختار پیشنهادی در محیط MATLAB/SIMULINK
	بیانگر این است که کنترل کننده TID دامنه انحراف فرکانس را ۹۷/۸۵٪ و زمان
	نشست را ۷۷٪ نسبت به کنترل کننده PID بهبود داده است و بنابراین، برای اهداف
	کنترل فرکانس تحت شرایط مختلف بهره برداری کارایی مطلوب تری دارد.

---

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱

## ۱. مقدمه

بزرگ یا عدم قطعیت‌ها زیاد باشد، استفاده شده است. همچنین تأثیر منابع انرژی تجدیدپذیر بر کنترل فرکانس در یک سیستم قدرت دوناچه‌ای در مرجع [۵] بررسی شده است. در مرجع [۱۲]، عملکرد چهار کنترل کننده PID، TID، FOPID و FOTID برای کنترل فرکانس بار سیستم‌های قدرت چندناحیه‌ای شامل نیروگاه حرارتی و فتوولتائیک مقایسه شده است. رویکرد کنترل بهینه تطبیقی مبتنی بر PI برای سیستم‌های قدرت منفرد و به هم پیوسته در مرجع [۱۳] ارائه شده است. تنظیم فرکانس سیستم قدرت دوناچه‌ای با کنترل کننده PID تنظیم خودکار، توسط الگوریتم ژنتیک<sup>۸</sup> و الگوریتم ازدحام ذرات در مرجع [۱۴] بررسی شده است. عملکرد الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی برای طراحی کنترل کننده‌های فرکانس بار در یک سیستم قدرت دوناچه‌ای در مرجع [۱۵] مقایسه شده است. الگوریتم‌های مورد بررسی شامل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم اجتماع مورچگان و الگوریتم تکاملی تفاضلی هستند. در مرجع [۱۶]، کنترل فرکانس - بار سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی مانند باند سکون گاورنر<sup>۹</sup>، محدودیت‌های نرخ تولید<sup>۱۰</sup> و تأخیر زمانی ارتباط<sup>۱۱</sup> با استفاده از GA انجام شده است. در مرجع [۴] نیز اثربخشی کنترل کننده انتگرال مشتق-شیب<sup>۱۲</sup> با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ارشمیدس در یک سیستم قدرت دوناچه‌ای به هم پیوسته با نفوذ RESs بررسی شده است. براساس ادبیات موجود، اگرچه کارهای تحقیقاتی ارزشمندی تاکنون انجام شده، هنوز چندین خلأ تحقیقاتی قابل توجه وجود دارد که به شرح زیر است:

- فقدان مدل‌سازی یک تابع هدف جدید از دیدگاه‌های مختلف تا به طور جامع پارامترهای کنترلی اثربخش سیستم‌های قدرت دوناچه‌ای به هم پیوسته را بهبود دهد.
- تنظیم تعداد محدود پارامترهای کنترلی تأثیرگذار برای کنترل فرکانس سیستم‌های قدرت که می‌تواند به مراتب دقت نتایج به دست آمده را تحت الشعاع قرار دهد.
- کنترل فرکانس سیستم‌های قدرت صرفاً به کمک یک روش بهینه‌سازی و یک کنترل کننده بدون در نظر گرفتن رویکردهای بهبوددهنده از قبیل آنالیز حساسیت پارامترهای کنترلی.

از منظر فنی، پس از وقوع یک پیشامد، باید تعادل بین تقاضا و تولید برقرار گردد تا فرکانس شبکه به یک مقدار مرجع از پیش تعیین شده بازگردد. این عملکرد به عنوان کنترل فرکانس بار<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش پیچیدگی شبکه و رشد روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی، نوسانات فرکانس افزایش پیدا کرده است. این سبب شده است تا LFC از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شود [۱ و ۲]. همچنین با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر<sup>۲</sup>، ثابت اینرسی شبکه کاهش می‌یابد؛ زیرا این منابع به طور ذاتی دارای نوسانات و عدم قطعیت‌های زیادی هستند؛ در نتیجه انحرافات فرکانس بیشتر خواهد شد و پایداری سیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین سیستم‌های قدرت امروزی علاوه بر چالش‌های عدم تعادل بین تولید و تقاضای بار، با مشکلات جدیدی که ناشی از نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیرند، مواجه‌اند. این چالش‌ها بر امنیت و پایداری شبکه برق تأثیر می‌گذارد. به همین سبب، LFC یک راه حل کلیدی برای حفظ فرکانس شبکه شناخته می‌شود. همچنین فرکانس شبکه زمانی ثابت خواهد بود که بین تولید و تقاضای بار تعادل برقرار باشد [۳ و ۴]. برای کاهش عدم تطابق بین تولیدی منابع و توان مصرفی بارها از عملکرد خودکار درجه‌های توربین در نیروگاه‌ها استفاده می‌شود. این عملکرد به کنترل تولید خودکار<sup>۳</sup> موسوم است [۵]. AGC تغییرات بار شبکه را در لحظه ردیابی می‌کند و براساس این تغییرات، خروجی ژنراتور را کنترل می‌کند و از این طریق یکی از اهداف اصلی کنترل توان در شبکه را که حفظ فرکانس سیستم در یک محدوده مشخص است، به انجام می‌رساند [۶ و ۷]. اقدامات اولیه در حوزه LFC با استفاده از گاورنر چرخ طیار<sup>۴</sup> ماشین‌های سنکرون برای کنترل فرکانس سیستم‌های قدرت صورت گرفت [۸]. در مرجع [۹] برای مطالعات LFC، کنترل کننده‌های شیب<sup>۵</sup> مانند TIDF پیشنهاد شده‌اند که از مزایای آن می‌توان به تغییر پارامترهای سیستم حلقه بسته، استحکام و توانایی بالای آن در میراسازی اختلالات اشاره کرد. در مرجع [۱۰]، عملکرد کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی<sup>۶</sup> و در مرجع [۱۱]، از کنترل کننده‌های مرتبه کسری<sup>۷</sup> برای کنترل فرکانس بار یک سیستم قدرت دوناچه‌ای در شرایطی که تغییرات بار

1. Load Frequency Control (LFC)
2. Renewable Energy Sources (RESs)
3. Automatic Generation Control (AGC)
4. Flywheel Governor
5. Tilt
6. Proportional-Integral-Derivative (PID)
7. Fractional Order (FO)

8. Genetic Algorithm (GA)

9. Governor Dead Band (GDB)

10. Generation Rate Constraints (GRC)

11. Communication Time Delay (CTD)

12. Integral Derivative-Tilted (ID-T)

بنابراین اهداف این مقاله به شرح زیرند:

این مقاله به کنترل فرکانس یک سیستم قدرت می‌پردازد که به صورت دوناچه‌ای و به هم پیوسته بوده و نیروگاه‌های سنتی (حرارتی و گازی) را با نیروگاه‌های مدرن (برق‌آبی، بادی، خورشیدی) ترکیب می‌کند. فرکانس سیستم‌هایی که مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیرند، با روش‌های کنترل معمولی، پشتیبانی نمی‌شوند؛ لذا هدف این است که با استفاده از یک کنترل‌کننده با ساختار ساده اما دقت بالا مانند کنترل‌کننده مشتق-انتگرال-شیب<sup>۱</sup>، بتوان در این‌گونه سیستم‌ها، فرکانس را در محدوده مجاز (۰/۲ هرتز) کنترل نمود. ضرایب مطلوب این کنترل‌کننده به وسیله الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، طی مراحل متعدد به دست آمده و عملکرد آن با کنترل‌کننده PID مقایسه شده است. برای حفظ فرکانس سیستم، محدودیت‌های حداقل و حداکثر مقدار انحراف فرکانس، زمان نشست، افزایش سرعت میراسازی خطا یا کاهش زمان رسیدن به پایداری لحاظ شده و براساس این شرایط، تابع هدفی ساخته شده که به صورت همه‌جانبه بتواند این شرایط را ارضا کند. همچنین محدودیت‌های فیزیکی مانند GDB و GRC نیز در این سیستم در نظر گرفته شده‌اند تا مدل سیستم به مدل واقعی نزدیک باشد. از این رو، نوآوری‌های این مقاله به طور خلاصه به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- مدل‌سازی و پیاده‌سازی یک تابع هدف جدید براساس حداکثر دامنه انحراف فرکانس و انتگرال زمانی قدرمطلق خطا به منظور کنترل همزمان پارامترهای دامنه انحراف فرکانس، سرعت همگرایی (زمان نشست) و مقدار خطای خروجی.
- تنظیم همزمان پارامترهای چندگانه کنترلی تأثیرگذار برای کنترل فرکانس سیستم قدرت تحت مطالعه شامل ضرایب کنترل‌کننده TID و به علاوه، ضرایب بایاس فرکانس ناحیه‌های اول و دوم و ضرایب افقی منابع تولیدی حرارتی، گازی و برق‌آبی.
- افزایش دقت، کارآمدی و سرعت تنظیم فرکانس سیستم قدرت تحت مطالعه به کمک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته با آنالیز حساسیت و همچنین، کنترل‌کننده TID با ساختار ساده و منعطف.

سازمان‌دهی این مقاله در ۸ بخش به شرح زیر انجام شده است: در بخش ۲، مدل‌سازی ریاضی واحدهای حرارتی، برق‌آبی و گازی ارائه شده است. در بخش‌های ۳ و ۴، مدل نیروگاه‌های بادی و خورشیدی مطرح شده است. در بخش ۵، دو رویکرد پیاده‌سازی شامل کنترل‌کننده TID و الگوریتم ژنتیک ارائه شدند. در بخش ۶، ویژگی‌ها و

مدل سیستم قدرت تحت مطالعه مطرح شد و در بخش ۷، نحوه تعیین تابع هدف برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی سیستم توضیح داده شده است. همچنین مطالعات انجام‌شده برای کنترل فرکانس در این بخش مطرح و نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه و تحلیل شده است. در بخش ۸ نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از مدل پیشنهادی در این مقاله ارائه شده است.

## ۲. مدل‌سازی ریاضی سیستم مورد مطالعه

### ۱.۲. منبع تولید توان حرارتی

الف) باند سکون گاورنر

فرمول‌های غیرخطی GDB را می‌توان به صورت تابعی از تغییرات و نرخ‌های تغییر سرعت ساده‌سازی کرد. با استفاده از سری فوریه، تابع انتقال یک GDB با لقی ۰/۵٪ به صورت زیر به دست می‌آید [۱۷].

$$GDB = \frac{N_1 + N_2 S}{T_{sg} S + 1} \quad (1)$$

ب) بازگرمایش<sup>۲</sup>

بازگرمایش با استفاده از یک تابع انتقال مرتبه اول مدل‌سازی می‌شود. ثابت گرمایش مجدد توربین بخار  $K_r$  معادل ۰/۳ و ثابت زمانی گرمایش مجدد توربین بخار  $T_r$  معادل ۱۰/۲ ثانیه [۱۷].

$$Reheat = \frac{K_r T_r S + 1}{T_r S + 1} \quad (2)$$

ج) توربین با GRC

محدودیت نرخ تولید برای واحد حرارتی روی ۱۰٪ پروینیت بر دقیقه (۰/۰۱۷ پروینیت در مگاوات بر ثانیه) تنظیم شده است. این محدودیت برای هر دو حالت افزایش و کاهش نرخ تولید و با در نظر گرفتن ثابت زمانی توربین بخار معادل ۰/۳ ثانیه اعمال می‌شود [۱۷].

### ۲.۲. منبع تولید توان برق‌آبی

الف) گاورنر

گاورنر با استفاده از یک تابع انتقال مرتبه اول مدل‌سازی می‌شود. ثابت زمانی این تابع انتقال برای گاورنر توربین آبی، برابر با ۰/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است [۱۷].

$$Governor = \frac{1}{T_{gh} S + 1} \quad (3)$$

ب) جبران ضریب افقی گذرا<sup>۳</sup>

افت گذرای فرکانس با استفاده از یک تابع انتقال مرتبه اول مدل‌سازی می‌شود. این تابع انتقال دو پارامتر کلیدی دارد:

2. Reheat

3. Transient Droop Compensation (TDC)

1. Tilted Integral Derivative (TID)

و  $Yg$  هستند که مقادیر آنها به ترتیب  $۰/۶$  و  $۱/۱$  ثانیه در نظر گرفته شده اند [۱۷].

$$Speed\ governor = \frac{X_g S + 1}{Y_g S + 1} \quad (۷)$$

(ج) واکنش های سوخت و احتراق<sup>۱</sup> واکنش های سوخت و احتراق با استفاده از تابع انتقال مرتبه اول با تأخیر زمانی واکنش احتراق توربین گازی  $T_{cr}$  و ثابت زمانی سوخت توربین گازی  $T_f$  به ترتیب  $۰/۱$  و  $۰/۲۳۹$  ثانیه مدل سازی می شوند [۱۷].

$$Fuel\ and\ combustion\ reaction = \frac{-T_{cr} S + 1}{T_f S + 1} \quad (۸)$$

(د) خروجی کمپرسور خروجی کمپرسور با استفاده از تابع انتقال مرتبه اول با ثابت زمانی حجم خروجی کمپرسور  $T_{cd}$  معادل  $۰/۲$  ثانیه مدل سازی می شود [۱۷].

$$Compressor\ discharge = \frac{1}{T_{cd} S + 1} \quad (۹)$$

### ۳. واحد تولید توان بادی

واحد تولید باد در محیط MATLAB/SIMULINK با یک بلوک نويز سفید مدل سازی می شود که به عنوان یک سرعت تصادفی عمل می کند و با سرعت جریان باد تقویت می شود [۴]. بلوک نويز سفید یک سیگنال تصادفی را به ورودی سرعت باد سیستم AGC تزریق می کند. این سیگنال نشان دهنده تلاطم یا نوساناتی است که به طور طبیعی در سرعت باد رخ می دهد. این بلوک، یک سیگنال تصادفی با چگالی طیفی توان ثابت در تمام فرکانس ها تولید می کند. این بدان معناست که انرژی سیگنال به طور مساوی در تمام فرکانس ها توزیع می شود. این سیگنال تصادفی سپس در یک ضریب بهره ضرب می شود تا دامنه آن تنظیم شود. این عامل، شدت تلاطم شبیه سازی شده در سرعت باد را تعیین می کند. سیگنال تصادفی مقیاس شده سپس به ورودی سرعت باد پایه اضافه می شود. این اثر ترکیبی، سرعت باد ثابت و نوسانات تصادفی ناشی از تلاطم را شبیه سازی می کند. در اصل، بلوک نويز سفید به عنوان یک منبع اغتشاش عمل می کند که تغییر پذیری واقعی را به ورودی سرعت باد وارد می کند. این موضوع کمک می کند تا شبیه سازی سیستم AGC بیش از پیش مبین شرایط دنیای واقعی باشد که در آن سرعت باد ثابت نیست. ضریب مشارکت واحد تولید توان بادی  $PF_{WT} = 0.025$  است [۱۷] و به صورت شکل (۱) طراحی می شود [۴].

رفتار توان نوسانی توربین بادی به صورت شکل (۲) نمایش داده می شود. توان خروجی توربین بادی ( $P_w$ ) را می توان از رابطه (۱۰) به

• زمان نشست سرعت گاورنر توربین آبی ( $T_{rs}$ ): این پارامتر نشان دهنده مدت زمانی است که طول می کشد تا سرعت توربین به حالت اولیه خود بازگردد. پس از اعمال یک تغییر در سرعت، مقدار این پارامتر در این مدل  $۴/۹$  ثانیه است.

• ثابت زمانی افت گذرای فرکانس ( $T_{rh}$ ): این پارامتر نشان دهنده سرعت بازیابی فرکانس سیستم قدرت پس از یک افت ناگهانی در بار است. مقدار این پارامتر در این مدل  $۲۸/۷۴۹$  ثانیه است [۱۷].

$$TDC = \frac{T_{rs} S + 1}{T_{rh} S + 1} \quad (۴)$$

(ج) لوله هدایت آب با در نظر گرفتن GRC توربین هیدرولیکی با لوله هدایت آب با استفاده از یک تابع انتقال مرتبه اول مدل سازی می شود. این مدل شامل زمان راه اندازی آب در توربین هیدرولیکی ( $T_w$ ) به عنوان یک پارامتر کلیدی است که در این مورد برابر با  $۱/۱$  ثانیه در نظر گرفته شده است [۱۷].

$$Penstock = \frac{-T_w S + 1}{0.5 T_w S + 1} \quad (۵)$$

GRC نیروگاه برق آبی به ترتیب برای افزایش و کاهش نرخ تولید، برابر با  $۲۷۰\%$  پر یونیت بر دقیقه ( $۰/۰۴۵$  پر یونیت در مگاوات بر ثانیه) و  $۳۶۰\%$  پر یونیت بر دقیقه ( $۰/۰۶$  پر یونیت در مگاوات بر ثانیه) در نظر گرفته شده است [۱۷].

### ۳.۲. منبع تولید توان گازی

الف. تنظیم کننده وضعیت دریچه تنظیم کننده وضعیت دریچه با استفاده از یک تابع انتقال مرتبه اول مدل سازی می شود. این مدل شامل دو پارامتر کلیدی است:

• ثابت زمانی تنظیم کننده وضعیت دریچه ( $B_g$ ): این پارامتر نشان دهنده سرعت پاسخ تنظیم کننده دریچه به تغییرات در سیگنال ورودی است. مقدار این پارامتر در مدل برای شیر معمولی  $۰/۰۴۹$  ثانیه در نظر گرفته شده است.

• ثابت زمانی تنظیم کننده دریچه در توربین گازی ( $C_g$ ): این پارامتر نشان دهنده سرعت پاسخ موقعیت یاب شیر مخصوص توربین گازی به تغییرات در سیگنال ورودی است. مقدار این پارامتر در مدل  $۱$  ثانیه در نظر گرفته شده است [۱۷].

$$Valve\ positioner = \frac{1}{B_g S + C_g} \quad (۶)$$

(ب) سرعت گاورنر سرعت گاورنر با استفاده از یک تابع انتقال مرتبه اول مدل سازی می شود. ثابت های زمانی پیشرو و پسرو برای گاورنر توربین گازی به ترتیب  $Xg$

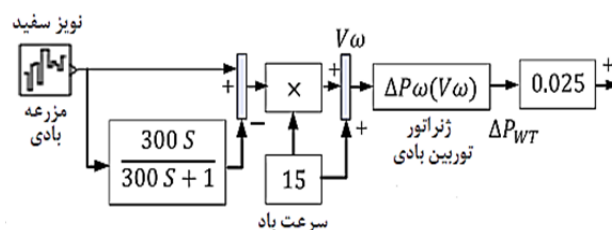
دست آورد [۴].

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_T V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (10)$$

که در آن،  $\rho$  چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $A_T$  مساحت جاروب شده توسط روتور در متر مربع،  $V_w$  سرعت نامی باد برحسب متر بر ثانیه و  $C_p$  پارامتر پره‌های روتور را نشان می‌دهد و از رابطه (۱۱) به دست می‌آید [۴].

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \times \left( \frac{C_2}{\lambda_I} - C_3\beta - C_4\beta^2 - C_5 \right) \times e^{\left( \frac{C_6}{\lambda_I} \right)} + C_7\lambda_T \quad (11)$$

که  $C_1$  تا  $C_7$  پارامترهای توربین،  $\beta$  زاویه گام و  $\lambda$  نشان‌دهنده نسبت بهینه سرعت نوک پرها<sup>۱</sup> است و از رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۴]:



شکل (۱): مدل واحد تولید بادی [۴]

$$\lambda_T = \lambda_T^{OP} = \frac{\omega_T \times r_T}{V_w} \quad (12)$$

که  $r_T$  نشان‌دهنده شعاع روتور و  $\lambda_T$  نشان‌دهنده TSR متناوب است و از رابطه زیر به دست می‌آید: [۴]

$$\frac{1}{\lambda_I} = \frac{1}{\lambda_T + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (13)$$

مقادیر اسمی پارامترهای مورد استفاده در واحد تولید باد، در

جدول (۱) آورده شده است.

#### ۴. واحد تولید توان خورشیدی

شرایط آب‌وهوایی به شدت بر خروجی سیستم PV تأثیر می‌گذارد و باعث نامنظم شدن آن می‌شود. بنابراین، پایداری سیستم به دلیل انحرافات زیاد فرکانس ناشی از توان خروجی PV تهدید می‌شود و نیاز به استراتژی‌های کنترلی برای کاهش این نوسانات و حفظ پایداری سیستم است. لذا انحراف تابش یکنواخت و غیریکنواخت هنگام تخمین توان خروجی سیستم PV در نظر گرفته می‌شود. این خروجی توسط بلوک نویز سفید در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی می‌شود. سیستم PV در

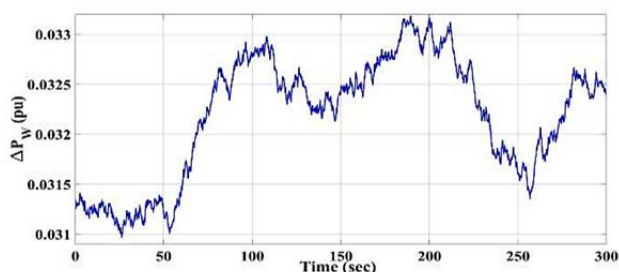
محیط SIMULINK به صورت شکل (۳) شبیه‌سازی می‌شود [۴]. مقدار توان اولیه، نقطه شروع مشارکت واحد تولید توان خورشیدی در شبیه‌سازی را مشخص می‌کند. در اینجا روی ۱ تنظیم می‌شود که یک مقدار نرمال است. مقدار اولیه سیستم PV می‌تواند به طور قابل توجهی بر پاسخ سیستم AGC و دینامیک توان کلی در شبیه‌سازی تأثیر بگذارد. ضریب مشارکت واحد PV برابر  $PF_{PV} = 0.015$  است [۱۷] و توان خروجی آن از رابطه (۱۴) به دست می‌آید [۴]:

$$\Delta P_{Solar} = 0.6\sqrt{P_{Solar}} \quad (14)$$

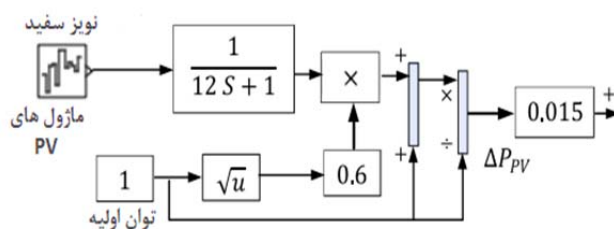
همچنین توان نوسانی خروجی از سیستم PV به صورت شکل (۴) است.

جدول (۱): مقادیر اسمی پارامترهای مورد استفاده در واحد تولید باد [۱۷]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$P_w$	۷۵۰ kw	$C_2$	۱۱۶
$V_w$	۱۵ m/s	$C_3$	۰/۴
$r_T$	۲۲/۹ m	$C_4$	۰
$\rho$	۱/۲۲۵ kg/m <sup>3</sup>	$C_5$	۵
$A_T$	۱۶۸۴ m <sup>2</sup>	$C_6$	۲۱
$\lambda_T$	۲۲/۵ rpm	$C_7$	۰/۱۴۰۵
$C_1$	-۰/۶۱۷۵		



شکل (۲): رفتار توان نوسانی توربین بادی [۴]



شکل (۳): مدل سیستم PV [۴]

در ادامه، اضافه شدن منابع انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به سیستم قدرت دوناچه‌ای به هم پیوسته، به صورت شکل (۵) خواهد بود.

## ۵. مکانیزم پیاده سازی

### ۱.۵. طراحی کنترل کننده TID

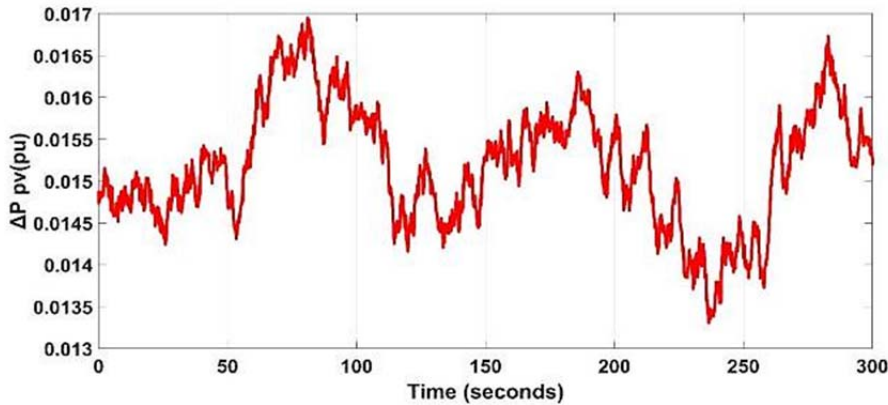
به ترتیب نشان دهنده ضرایب شیب، انتگرالی و مشتقی کنترل کننده TID هستند و  $\frac{1}{n}$  عددی حقیقی است که در بازه (۰,۱) قرار دارد. این مؤلفه فرایند تنظیم را ساده می کند و توانایی سیستم در مواجهه با اختلالات را بهبود می بخشد و همچنین، استحکام آن در برابر عدم قطعیت پارامترهای سیستم را افزایش می دهد [۴ و ۱۸].

$$u(t)_{TID} = \left( \frac{K_t}{S\left(\frac{1}{n}\right)} + \frac{K_I}{S} + K_D S \right) e(t) \quad (15)$$

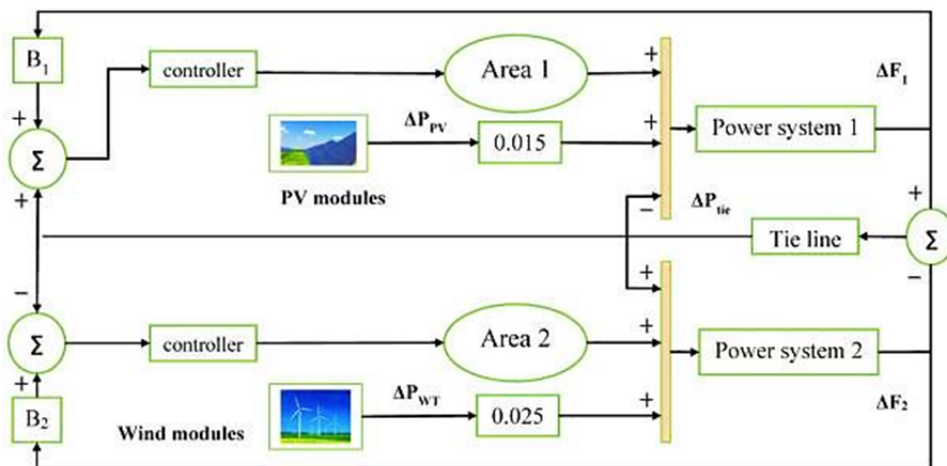
### ۲.۵. روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک

تنظیم ضرایب کنترل کننده های مرتبه کسری به روش های کلاسیک به ویژه در حضور سیستم های غیرخطی چالش برانگیز است.

کنترل کننده TID ساختاری مشابه با کنترل کننده PID دارد. با این تفاوت که به جای مؤلفه تناسبی از مؤلفه مرتبه کسری شیب با تابع انتقال  $\frac{1}{S\left(\frac{1}{n}\right)}$  بهره می گیرد. بدین ترتیب، نه تنها قابلیت های کنترل کننده PID معمولی، بلکه قابلیت های حسابان مرتبه کسری را نیز به همراه خواهد داشت. در واقع، کنترل کننده های مرتبه کسری با افزودن حافظه به سیستم، می توانند مزایای متعددی از جمله میرایی بهتر، سرعت پاسخ سریع تر، پایداری بیشتر و مقاومت بالاتر در برابر تغییرات پارامتری به همراه داشته باشند. در صورتی که ورودی کنترل کننده سیگنال  $e(t)$  باشد، خروجی ناشی از این کنترل کننده به صورت رابطه (۱۵) خواهد بود که در آن،  $K_I$ ،  $K_D$  و  $K_t$



شکل (۴): رفتار توان نوسانی سیستم PV [۱۷]



شکل (۵): مدل سیستم قدرت با حضور RESs [۱۷]

ضریب افتی نیروگاه های حرارتی، برق آبی و گازی و همچنین، ضریب بایاس فرکانس در هر ناحیه نیز باید بهینه شوند که اهمیت استفاده از الگوریتم های فراابتکاری را دوچندان می کند. در این مقاله، از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک بدین منظور استفاده می شود. شکل (۶) عملکرد

بنابراین در این موارد استفاده از راهکارهایی نظیر به کارگیری الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری در کنار تعریف یک تابع هدف مناسب، مورد توجه محققان قرار دارد. در این مقاله، علاوه بر ضرایب کنترل کننده موجود در هر ناحیه، پارامترهای کنترلی دیگری شامل



سیستم قدرت تحت مطالعه، هیچ‌گاه نباید انحراف فرکانس از مقدار مشخصی تجاوز نماید که تابع هدف قبل چنین محدودیتی را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، برای نیل به این موضوع، بایستی تابع هدف به صورت رابطه (۱۸) منظور گردد.

$$\omega_1 \int_0^{t_{final}} t|e(t)| dt + \omega_2 \max|e(t)| \quad (18)$$

که  $\omega_1$  و  $\omega_2$  مصالحه‌ای است مابین سرعت همگرایی و حداقل خطا در مقابل حداکثر انحراف فرکانس که بایستی به صورت سعی و خطا به دست آیند. از آنجاکه سیستم قدرت تحت مطالعه شامل دو ناحیه است، تابع هدف نهایی به صورت رابطه (۱۹) خواهد بود که سیگنال  $e(t)$  در این سیستم، همان انحراف فرکانس خروجی است.

$$f = \omega_1 \int_0^{t_{final}} t|\Delta f_1(t)| dt + \omega_2 \max|\Delta f_1(t)| + \omega_1 \int_0^{t_{final}} t|\Delta f_2(t)| dt + \omega_2 \max|\Delta f_2(t)| \quad (19)$$

## ۶. ویژگی‌ها و مدل سیستم قدرت تحت مطالعه

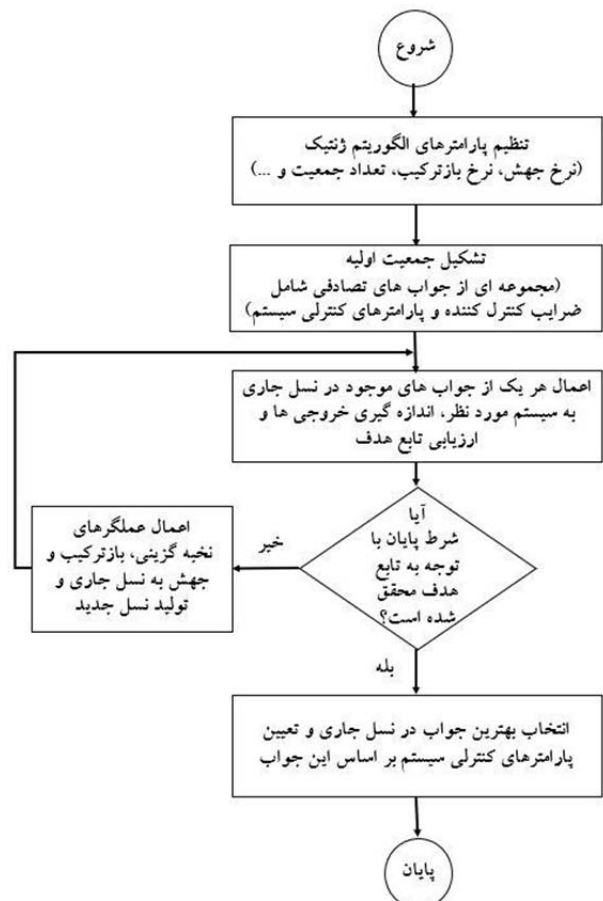
در این مقاله، از یک سیستم قدرت دوناچه‌ای به‌هم‌پیوسته برای کنترل فرکانس بار استفاده شده است. هر ناحیه کنترلی دارای توان نامی ۲۰۰۰ مگاوات و بار اسمی ۱۷۴۰ مگاوات، شامل یک نیروگاه حرارتی با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات، یک نیروگاه گازی با ظرفیت ۲۴۰ مگاوات و یک نیروگاه برق‌آبی با ظرفیت ۵۰۰ مگاوات است. همچنین یک سیستم PV با توان نامی ۵۰ مگاوات به ناحیه ۱ و یک نیروگاه بادی با توان نامی ۷۰ مگاوات به ناحیه ۲ متصل می‌شود. در این سیستم، عوامل غیرخطی مثل GDB و GRC در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، یک بار پله<sup>۲</sup> به اندازه ۰/۱ پریونیت (معادل ۱۷۴ مگاوات) برای اعمال تغییرات مصرف شبکه به هر ناحیه اعمال می‌گردد [۴]. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، سیستم فوق از دو ناحیه تشکیل شده و نیروگاه‌های حرارتی، برق‌آبی و گازی به ترتیب از بالا به پایین قرار گرفته‌اند. مجموع توان تولیدی این نیروگاه‌ها توسط تابع تبدیل  $\frac{K_{ps}}{T_{ps}S+1}$  به فرکانس خروجی تبدیل می‌گردد.  $\Delta f_1$  و  $\Delta f_2$  به ترتیب فرکانس خروجی ناحیه اول و دوم هستند که با ضرایب افقی  $\frac{1}{R_{th}}$ ،  $\frac{1}{R_{hyd}}$  و  $\frac{1}{R_g}$  فیدبک گرفته شده و به خروجی کنترل‌کننده اعمال می‌شوند.  $\Delta P_{D1}$  و  $\Delta P_{D2}$  نیز تغییرات بار

الگوریتم ژنتیک در این مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که بیان شد، برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده و دیگر پارامترهای کنترلی سیستم قدرت دوناچه‌ای به‌هم‌پیوسته تحت مطالعه، از الگوریتم ژنتیک به همراه یک تابع هدف استفاده می‌شود. در صورتی که هدف کاهش زمان نشست و کاهش خطای ممکن باشد، رایج است که از شاخص انتگرال زمانی قدرمطلق خطا<sup>۱</sup> استفاده گردد که رابطه آن به صورت زیر است:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (16)$$

بنابراین، براساس این شاخص، تابع هدف سیستم مورد مطالعه به صورت رابطه (۱۷) خواهد بود:

$$\int_0^{t_{final}} t|e(t)| dt \quad (17)$$



شکل (۶): طرح‌واره عملکرد الگوریتم ژنتیک

که در آن  $e(t)$  سیگنال خطای خروجی است. اما شایان ذکر است که علاوه بر اهداف کمترین زمان نشست و کمترین خطای خروجی، در

۶. ضریب افتی نیروگاه گازی در ناحیه دوم؛
۷. ضریب تناسبی کنترل کننده PID در ناحیه اول؛
۸. ضریب انتگرالی کنترل کننده PID در ناحیه اول؛
۹. ضریب مشتقی کنترل کننده PID در ناحیه اول؛
۱۰. ضریب تناسبی کنترل کننده PID در ناحیه دوم؛
۱۱. ضریب انتگرالی کنترل کننده PID در ناحیه دوم؛
۱۲. ضریب مشتقی کنترل کننده PID در ناحیه دوم؛
۱۳. ضریب بایاس فرکانس در ناحیه اول؛
۱۴. ضریب بایاس فرکانس در ناحیه دوم.

در تلاش اول، با در نظر گرفتن  $\omega_1 = \omega_2 = 1$  (به عبارت دیگر، در نظر گرفتن یکسان تأثیر هر دو جمله در تابع هدف) و پس از طراحی شبیه سازی و اجرای آن، نمودار انحراف فرکانسی مربوط به این مرحله به صورت شکل (۸) است. مقدار تابع هدف  $f$  نیز برابر با  $۰/۵۳۶۳$  به دست آمده است. همان طور که مشاهده می شود، نمودار فوق از بازه مجاز انحراف فرکانس ( $۰/۲$  هرتز) تجاوز نموده و همچنین زمان نشست طولانی برای رسیدن به پایداری را طی می کند.

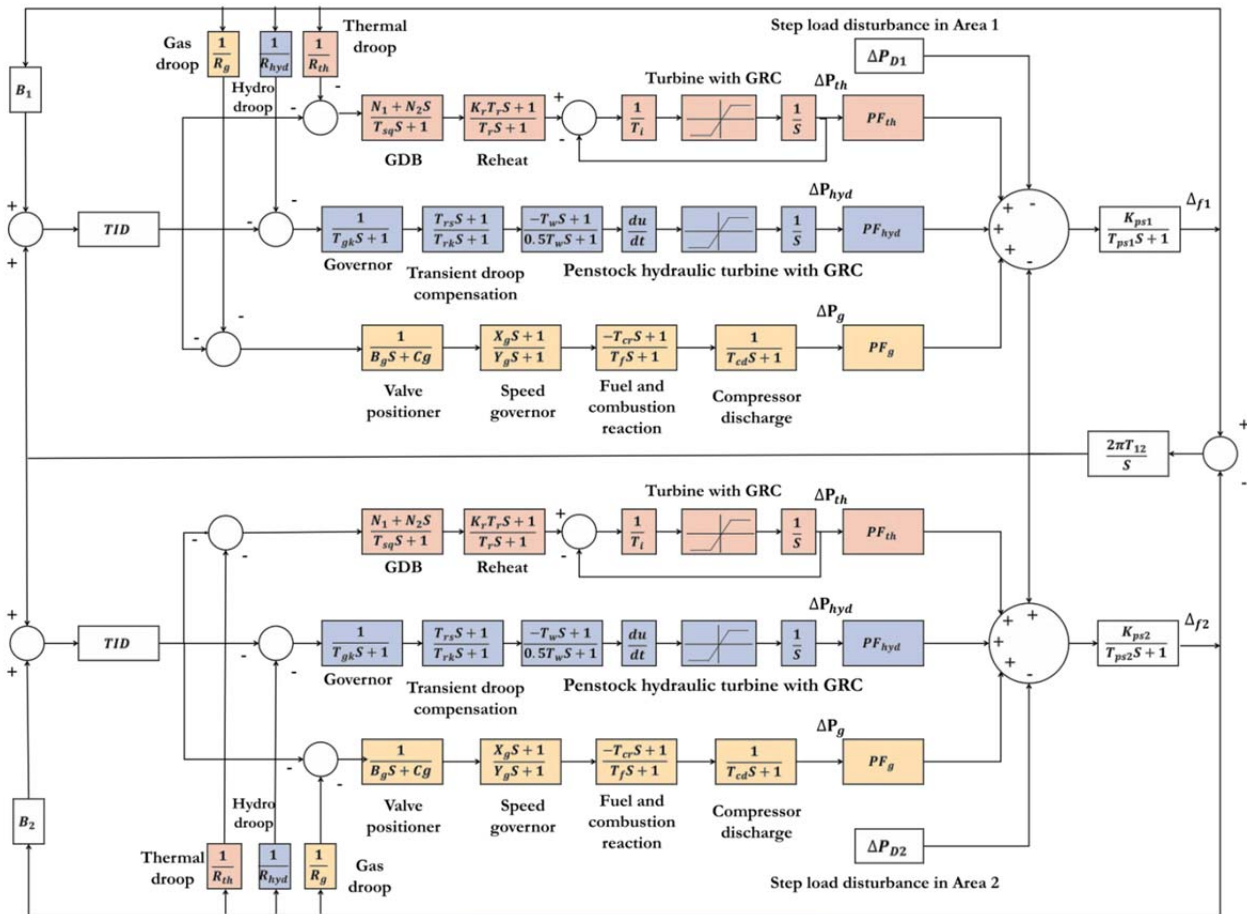
مصرفی به ترتیب در ناحیه ۱ و ۲ هستند [۴]. مقادیر اولیه پارامترهای شبیه سازی سیستم قدرت تحت مطالعه به شرح جدول (۲) است.

## ۷. مطالعات عددی و تحلیل نتایج شبیه سازی

### ۷.۱. پیاده سازی و به کارگیری از کنترل کننده PID

در این مرحله، سیستم قدرت دوناحیه ای به هم پیوسته با حضور نیروگاه های حرارتی، برق آبی و گازی در هر ناحیه، با استفاده از کنترل کننده PID بررسی می شود. علاوه بر انتخاب نوع کنترل کننده، تعیین ضرایب کنترل کننده نیز از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به همین منظور از روش بهینه سازی فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به مقادیر بهینه از پارامترها استفاده شده است. لذا هر یک از اعضای جمعیت در هر نسل از الگوریتم ژنتیک شامل پارامترهای کنترلی زیر است:

۱. ضریب افتی نیروگاه حرارتی در ناحیه اول؛
۲. ضریب افتی نیروگاه برق آبی در ناحیه اول؛
۳. ضریب افتی نیروگاه گازی در ناحیه اول؛
۴. ضریب افتی نیروگاه حرارتی در ناحیه دوم؛
۵. ضریب افتی نیروگاه برق آبی در ناحیه دوم؛

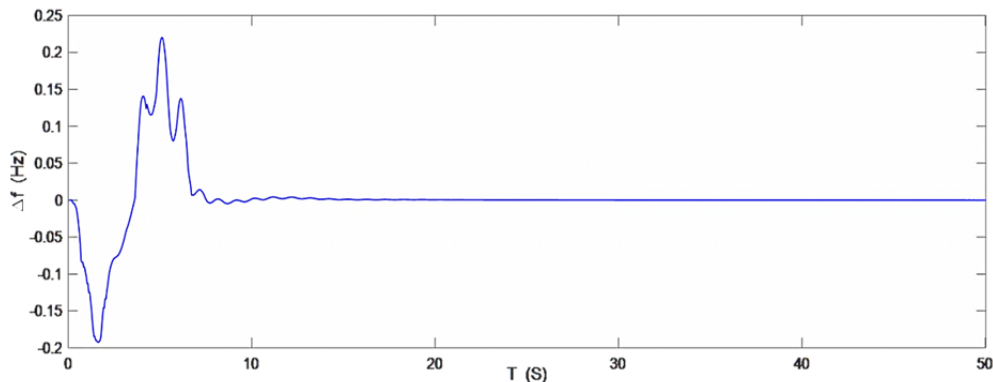


شکل (۷): مدل سیستم قدرت تحت مطالعه

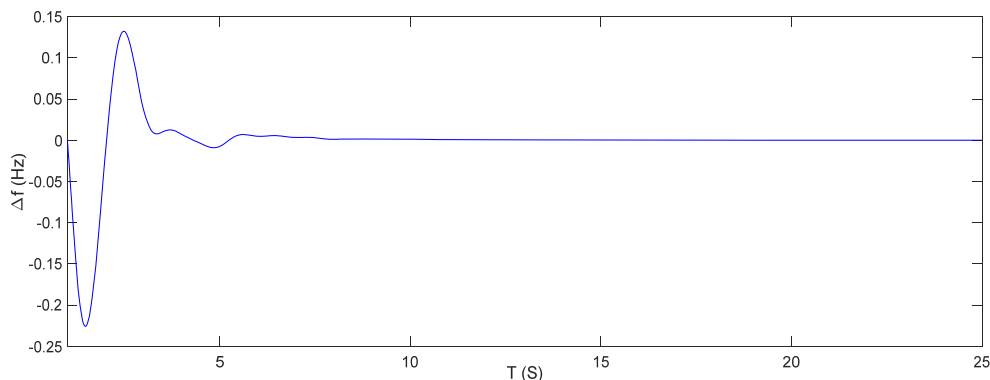
$T_f$	۰/۲۳۹	ثابت زمانی سوخت توربین گازی
$T_{cr}$	۰/۰۱	تأخیر زمانی احتراق توربین گازی
$T_{rs}$	۴/۹	زمان تنظیم مجدد سرعت توربین آبی
$B_1$ و $B_2$	۰/۴۳۱۲	ضرایب بایاس فرکانس
$PF_{pv}$	۰/۰۱۵	ضریب مشارکت سیستم pv
$PF_{WT}$	۰/۰۲۵	ضریب مشارکت توربین بادی

این نمودار رفتار دینامیکی مطلوبی نداشته و بایستی در ساختار تابع هدف بازبینی شود. لذا برای کاهش دامنه انحراف فرکانس که از مهم‌ترین اهداف کنترل فرکانس بار است، باید به جملات تابع هدف وزن‌های متفاوتی داده شود تا اهمیت هر بخش مشخص گردد و بهترین حالت برای رفتار دینامیکی فرکانس خروجی سیستم پیدا شود که ضمن حفظ سرعت رسیدن به پایداری و کاهش مقدار خطای خروجی، بتواند دامنه انحراف فرکانس را در محدوده مجاز حفظ کند. پس از سعی و خطاهای فراوان، مقدار  $\omega_1$  و  $\omega_2$  به ترتیب برابر ۰/۴ و ۰/۱ به دست آمده است. نمودار انحراف فرکانس خروجی از سیستم تحت مطالعه، پس از ارزش‌گذاری به جملات تابع هدف در این مرحله، به صورت شکل (۹) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه انحراف فرکانس و زمان نشست نسبت به حالت قبلی کاهش پیدا کرده و شرایط مطلوب‌تری را به خود اختصاص داده، اما هنوز هم نیاز به کنترل دقیق‌تری است.

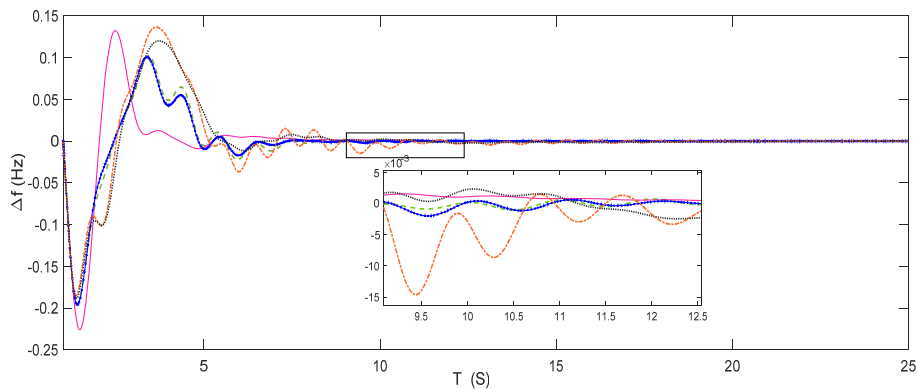
جدول (۲): مقادیر اولیه پارامترهای شبیه‌سازی مدل [۴]		
پارامتر	مقدار اولیه	تعریف
$R_{TH}$	۲/۴	پارامتر تنظیم سرعت گاورنر نیروگاه گازی
$N_1$	۰/۸	ضریب فوریه در تابع انتقال GDB
$N_2$	-۰/۰۶۳	ضریب فوریه در تابع انتقال GDB
$T_{rh}$	۲۸/۷۴۹	ثابت زمانی افت گذرا
$T_{sg}$	۰/۰۶	ثابت زمانی گاورنر توربین بخار
$T_t$	۰/۳	ثابت زمانی توربین بخار
$T_w$	۱/۱	زمان شروع آب در توربین آبی
$K_r$	۰/۳	ثابت توربین بخار بازگرمایش
$T_r$	۱۰/۲	ثابت زمانی توربین بخار بازگرمایش
$T_{PS1}, T_{PS2}$	۱۱/۴۹	ثابت زمانی‌های سیستم قدرت
$k_{PS1}, k_{PS2}$	۶۸/۹۶۵۵	بهره‌های سیستم قدرت
$T_{12}$	۰/۰۴۳۳	ضریب سنکرونیسم
$PF_{hyd}$	۰/۲۸۷۳	ضریب مشارکت نیروگاه برق‌آبی
$PF_g$	۰/۱۳۸	ضریب مشارکت نیروگاه گازی
$PF_{Th}$	۰/۵۷۴۷	ضریب مشارکت نیروگاه حرارتی
$X_g$	۰/۶	ثابت زمانی پس‌فاز گاورنر توربین گازی
$Y_g$	۱/۱	ثابت زمانی پیش‌فاز گاورنر توربین گازی
$B_g$	۰/۰۴۹	ثابت زمانی تنظیم‌کننده موقعیت
$T_{gh}$	۰/۲	ثابت زمانی گاورنر توربین برق‌آبی
$T_{cd}$	۰/۲	ثابت زمانی تخلیه کمپرسور
$C_g$	۱	موقعیت ولو توربین گازی



شکل (۸): انحراف فرکانس سیستم با کنترل‌کننده PID



شکل (۹): انحراف فرکانس سیستم با وزن‌دهی به تابع هدف



شکل (۱۰): نتایج آنالیز حساسیت

RESs بررسی خواهد شد. مدل نیروگاه بادی و سیستم PV همان طور که در بخش ۳ و ۴ مطرح شد، به صورت شکل (۱۲) در سیستم قدرت تحت مطالعه ادغام می شوند. اکنون، تأثیر کنترل کننده TID بر کاهش انحرافات فرکانسی و پایداری سیستم قدرت در شرایطی که منابع انرژی تجدیدپذیر همراه با عدم قطعیت های آنها به شبکه اعمال می شوند، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. شایان ذکر است که در این مرحله از همان تابع هدف مطلوب در بخش قبل استفاده می شود. پس از اجرای شبیه سازی مربوطه، نمودار انحراف فرکانسی حاصل از این شبیه سازی به صورت شکل (۱۳) به دست آمده است. هرچند که دامنه انحراف فرکانس نسبت به حالتی که منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه ادغام نشده بودند (بخش ۲.۷)، افزایش یافته و زمان رسیدن به پایداری نیز به علت وجود عدم قطعیت های ناشی از منابع تجدیدپذیر افزایش یافته، در حالت کلی رفتار دینامیکی فرکانس سیستم مطلوب است و کنترل کننده پیشنهادی به خوبی توانسته است انحرافات فرکانس ناشی از نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر را میرا کند و سیستم را در محدوده مجاز پایدار نماید. مقدار تابع هدف در این مرحله برابر با  $0/1005$  به دست آمده است.

### ۸. جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد کنترل کننده پیشنهادی TID برای حل مسئله کنترل فرکانس بار در یک سیستم قدرت دوناچه ای به هم پیوسته شامل منابع تولیدی حرارتی، گازی، برق آبی، بادی و خورشیدی بررسی شده است. این کنترل کننده در معیارهای دینامیکی مختلف مانند زمان صعود، زمان نشست، مقدار دامنه انحراف فرکانس در تغییرات بار پله ای و حضور غیرخطی هایی مثل GDB و GRC، عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده PID نشان داده است.

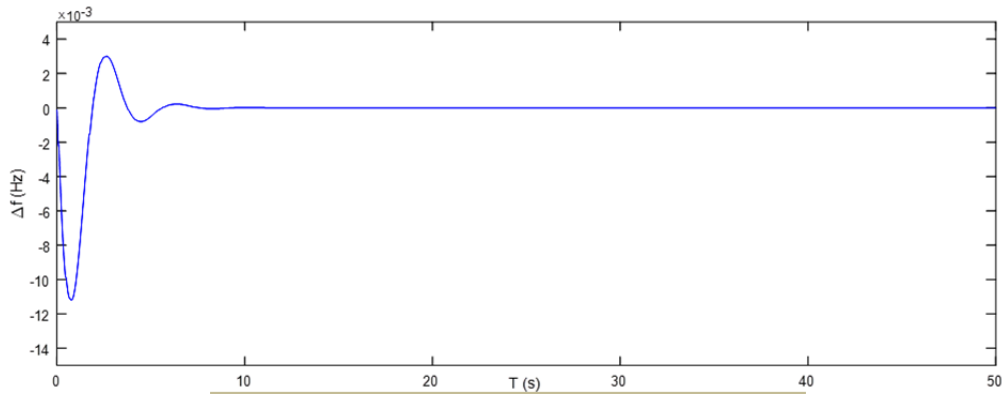
مقدار تابع هدف در این مرحله برابر  $0/2906$  به دست آمده است. نمودار فوق از بین مجموعه نمودارهای حاصل از آنالیز حساسیت در هر مرحله از سعی و خطا انتخاب شد که بهترین رفتار دینامیکی را نسبت به بقیه حالات دارد. چند حالت از نتایج آزمایش های آنالیز حساسیت در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

### ۲.۷. پیاده سازی و به کارگیری از کنترل کننده TID

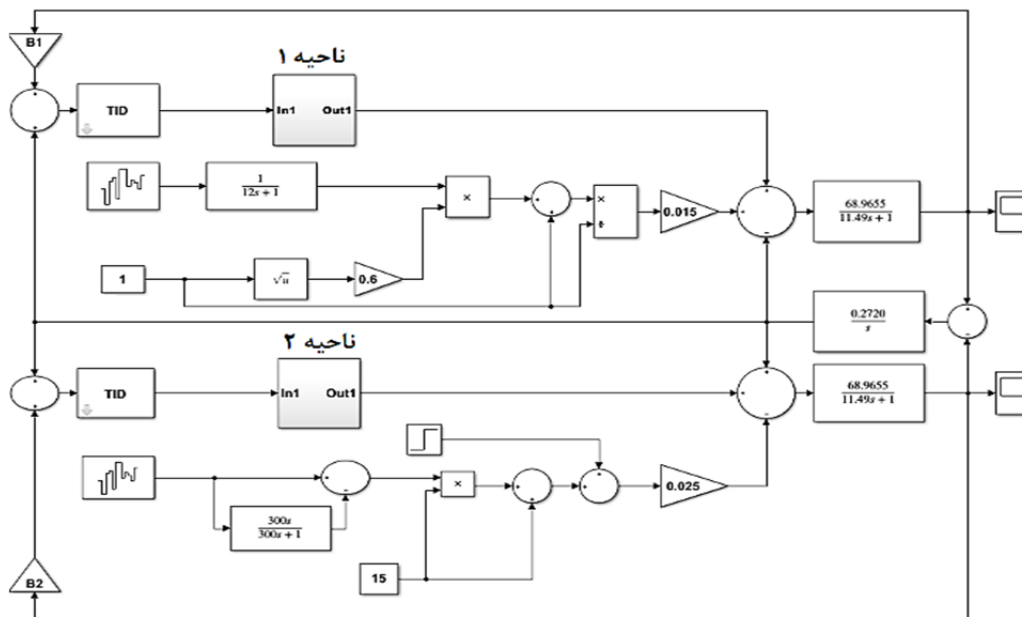
در این مرحله به جای کنترل کننده PID از کنترل کننده TID پیشنهادی برای کنترل فرکانس سیستم قدرت استفاده می شود که یک کنترل کننده مرتبه کسری است و انتظار می رود که به مراتب نتایج مطلوب تری را برای مسئله بهینه سازی فراهم کند. لذا با در نظر گرفتن همان تابع هدف بخش قبل و روش مشابه، اقدام به طراحی سیستم با وجود کنترل کننده TID خواهیم کرد. تنها تفاوت در این است که هر عضو جمعیت الگوریتم ژنتیک علاوه بر پارامترهای بیان شده در بخش ۱.۷، شامل دو پارامتر  $n$  مربوط به قسمت مرتبه کسری از کنترل کننده TID نیز هست. پس از اجرای شبیه سازی با این کنترل کننده، نمودار انحراف فرکانسی به صورت شکل (۱۱) به دست آمده است. همان طور که مشاهده می شود، دامنه انحراف فرکانس به  $0/003$  هرگز کاهش پیدا کرده و همچنین، زمان رسیدن به پایداری نیز کوتاه تر شده است که در مقایسه با حالت های قبلی، این شرایط بسیار مطلوب است. بنابراین، کنترل کننده TID توانایی بالایی در پایداری سازی سیستم قدرت دوناچه ای به هم پیوسته دارد و پارامترهای کنترلی آن را به خوبی بهینه می کند. مقدار تابع هدف نیز در این مرحله برابر با  $0/0660$  به دست آمده است.

### ۳.۷. بهره برداری از RESs در شبکه

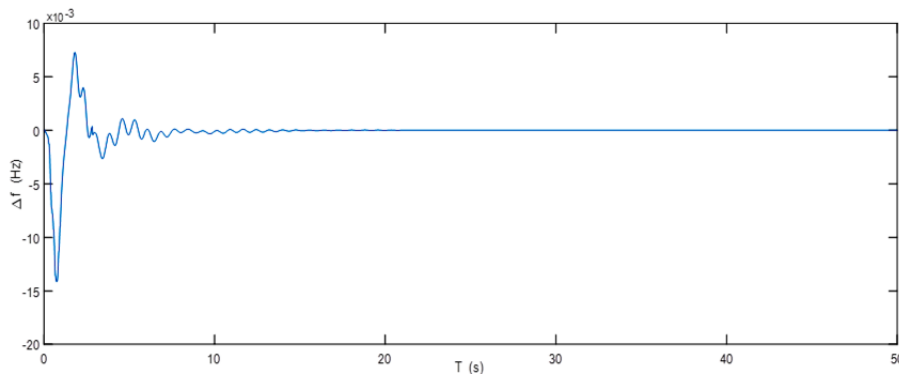
در این مرحله منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین بادی و سیستم PV به شبکه ادغام شده و عملکرد کنترل کننده پیشنهادی TID تحت نوسانات



شکل (۱۱): نمودار فرکانس خروجی سیستم با وجود کنترل کننده TID



شکل (۱۲): شبیه سازی سیستم تحت مطالعه با نفوذ RESs



شکل (۱۳): نمودار فرکانس خروجی سیستم با نفوذ RESs

کاهش زمان رسیدن به پایداری، مقدار تابع هدف کاهش چشمگیری داشته که بسیار مطلوب است. لذا این کنترل کننده برای رسیدن به اهداف پایداری در سیستم های قدرت به هم پیوسته مناسب است. گفتنی است که پس از ورود منابع انرژی تجدیدپذیر که ذاتاً همراه با عدم قطعیت هستند، دامنه انحراف فرکانس و زمان نشست نسبت به حالت قبلی افزایش یافته اند.

جدول (۳) عملکرد این کنترل کننده را در مقایسه با کنترل کننده PID تحت شرایط یکسان نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، کنترل کننده TID اثربخشی بهتری برای کنترل فرکانس سیستم های قدرت به هم پیوسته از خود نشان داده و دامنه انحراف فرکانس را که یکی از پارامترهای مهم کنترلی است، به شدت کاهش داده است. همچنین ضمن

اما با توجه به تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از منابع تولیدی تجدیدپذیر، این گونه رفتار دینامیکی پذیرفته است و همچنان فرکانس سیستم در محدوده مجاز خود حفظ شده است؛ در نتیجه، پایداری شبکه با استفاده از این کنترل کننده، قابل تضمین خواهد بود.

جدول (۳): مقایسه عملکرد کنترل کننده‌های PID و TID

مقدار تابع هدف f	زمان نشست (ثانیه)	دامنه انحراف فرکانس (هرتز)	کنترل کننده
۰/۲۹۰۶	۹	۰/۱۴	PID
۰/۰۶۶۰	۷	۰/۰۰۳	TID
۰/۱۰۰۵	۱۵	۰/۰۰۸	TID با حضور RESs

## مراجع

- [1] Kumer, J., "AGC Simulator for Price-based Operation-Part I: A Model", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 527-532, 1997. <https://doi.org/10.1109/59.589593>.
- [2] Raineri, R., Rios, S., Schiele, D., "Technical and economic aspects of ancillary services markets in the electric power industry: an international comparison", Energy policy, Vol. 34, No. 13, pp. 1540-1555, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.11.015>.
- [3] Oshnoei, S., Oshnoei, A., Mosallanejad, A., Haghjoo, F., "Novel load frequency control scheme for an interconnected two-area power system including wind turbine generation and redox flow battery", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 130, Art. No. 107033, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107033>.
- [4] Ahmed, M., Magdy, G., Khamies, M., Kamel, S., "Modified TID controller for load frequency control of a two-area interconnected diverse-unit power system", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 135, Art. No. 107528, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107528>.
- [5] Peddakapu, K., Mohamed, M., Srinivasarao, P., Arya, Y., Leung, P., Kishore, D., "A state-of-the-art review on modern and future developments of AGC/LFC of conventional and renewable energy-based power systems", Renewable Energy Focus, Vol. 43, pp. 146-171, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.09.006>.
- [6] Arya, Y., Dahiya, P., Çelik, E., Sharma, G., Gözde, H., Nasiruddin, I., "AGC performance amelioration in multi-area interconnected thermal and thermal-hydro-gas power systems using a novel controller", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 24, No. 2, pp. 384-396, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.015>.
- [7] Qiu, Y., Lin, J., Liu, F., Dai, N., Song, Y., "Continuous random process modeling of AGC signals based on stochastic differential equations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 36, No. 5, pp. 4575-4587, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3058681>.
- [8] Prasad, S., Purwar, S., Kishor, N., "Load frequency regulation using observer based non-linear sliding mode control", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 104, pp. 178-193, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.06.035>.
- [9] Elmelegi, A., Mohamed, E.A., Aly, M., Ahmed, E.M., Mohamed A.A.A., Elbaksawi, O., "Optimized tilt fractional order cooperative controllers for preserving frequency stability in renewable energy-based power systems", IEEE Access, Vol. 9, pp. 8261-8277, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049782>.
- [10] Ikhe, A., Kulkarni, A., "Load frequency control for two area power system using different controllers", International Journal of Advances in Engineering & Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 1796-1802, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICACRS55517.2022.10029090>.
- [11] Alomoush, M.I., "Load frequency control and automatic generation control using fractional-order controllers", Electrical Engineering, Vol. 91, No. 7, pp. 357-368, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00202-009-0145-7>.
- [12] Naik, A.K., Jena, N.K., Sahoo, S., Sahu, B.K., "Optimal Design of Fractional Order Tilt-Integral Derivative Controller for Automatic Generation of Power System Integrated with Photovoltaic System", Electrica, Vol. 24, No. 1, pp. 140-153, 2024. <https://doi.org/10.5152/electrica.2024.23044>.
- [13] Soni, M., Mittal, A., Soomar, A.M., Sahoo, P., Markam, K., Singh, S., "Load Frequency Control Scheme Controller Design for Isolated and Conventional Two Area Power Systems", Fourth International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT), pp. 1-6, 2024. <https://doi.org/10.1109/ICAECT60202.2024.10468698>.
- [14] Jain, D., Bhaskar, M., "Optimization of controllers using soft computing technique for load frequency control of multi-area deregulated power system", International Journal of Applied, Vol. 13, No. 1, pp. 52-65, 2024. <https://doi.org/10.11591/ijape.v13.i1.pp52-65>.
- [15] Hajiakbari Fini, M., Yousefi, G.R., Haes Alhelou, H., "Comparative study on the performance of many-objective and single-objective optimisation algorithms in tuning load frequency controllers of multi-area power systems", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 12, pp. 2915-2923, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1334>.
- [16] Rasolomampionona, D., Klos, M., Cirit, C., Montegiglio, P., De Tuglie, E.E., "A new method for optimization of Load Frequency Control parameters in multi-area power systems using Genetic Algorithms" IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), pp. 1-9, 2022. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854535>.
- [17] Khudhair, M., Ragab, M., AboRas, K.M., Abbasy, N. H., "Robust control of frequency variations for a multi-area power system in smart grid using a newly wild horse optimized combination of PID2 and PD controllers", Sustainability, Vol. 14, No. 13, Art. No. 8223, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14138223>.
- [18] Malik, M.Z., Zhang, S., Chen, G., Alghaythi, M. L., "Robust Tilt-Integral-Derivative Controllers for Fractional-Order Interval Systems", Mathematics, Vol. 11, No. 12, Art. No. 2763, 2023. <https://doi.org/10.3390/math11122763>.