

## Load Frequency Control in a Hybrid Power System Considering Renewable Energy Sources and Electric Vehicles Using Fractional Order PID Controller Based on Wavelet Neural Network

Abbas-Ali Zamani<sup>1</sup>, Assistant Professor, Seyed Mohamad Kargar<sup>2,3</sup>, Assistant Professor, Alireza Reisi<sup>1</sup>, Assistant Professor

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering- Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>3</sup>Smart Microgrid Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran  
a-zamani@tvu.ac.ir, areisi@tvu.ac.ir, kargar@pel.iaun.ac.ir

### Abstract

Restructuring of power systems and integration of different renewable energy sources with complex dynamic behaviors and high structural uncertainties has made the issue of load frequency control more important. For a hybrid power system that includes a thermal power plant taking into account nonlinear limitations such as the governor dead band and generator rate constraints and renewable energy sources including a wind turbine, solar-thermal power plant, electrolyzer, fuel cell, and plug-in electric vehicle, this paper proposes an adaptive wavelet neural network fractional order PID controller (AWNNFOPID) based on self-recursive wavelet neural networks and fractional order PID controller. To compare the performance of the proposed AWNNFOPID controller, four different scenarios are considered and the simulation results are compared with traditional I, PI, and PID controllers as well as with the optimized FOPID controller. The simulation results show that the proposed AWNNFOPID controller has better performances than the other control strategies used for the studied hybrid power system based on performance indicators such as settling time, rise time, maximum overshoot, maximum undershoot, integral time absolute error (ITAE), and integral absolute error (IAE).

**Keywords:** fractional order PID controller, load frequency control, plug-in electric vehicle, solar-thermal power plant, wind turbine,

**Received:** 22 July 2022

**Revised:** 7 September 2022

**Accepted:** 12 November 2022

**Corresponding Author:** Dr. Abbas-Ali Zamani

**Citation:** A.A. Zamani, S.M. Kargar, A. Reisi, "Load frequency control in a hybrid power system considering renewable energy sources and electric vehicles using fractional order PID controller based on wavelet neural network", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 58, pp. 45-66, September 2024 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.58.4.5>

مقاله پژوهشی

## کنترل بار فرکانس در یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای با مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروی الکتریکی با استفاده از کنترل کننده PID مرتبه کسری مبتنی بر شبکه عصبی موجک

عباسعلی زمانی<sup>۱</sup>، استادیار، سید محمد کارگر دهنوی<sup>۲،۳</sup>، استادیار، علیرضا رئیسی<sup>۱</sup>، استادیار

۱- گروه مهندسی برق- دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۳- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

a-zamani@tvu.ac.ir, kargar@pel.iaun.ac.ir, areisi@tvu.ac.ir

**چکیده:** با تجدید ساختار سیستم قدرت و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف با رفتار دینامیکی پیچیده و عدم قطعیت‌های عملکردی زیاد، مبحث کنترل بار فرکانس، پیچیدگی‌های بیشتری پیدا کرده است. در این مقاله برای یک سیستم قدرت ترکیبی دو ناحیه‌ای که شامل نیروگاه حرارتی با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی مانند باند مرده گاورنر و محدودیت میزان تولید و منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین بادی، نیروگاه خورشیدی-حرارتی، الکترولایزر، پیل سوختی و خودرو برقی پلاگین است، یک ساختار کنترل بار فرکانس تطبیقی مرتبه کسری، مبتنی بر شبکه‌های عصبی موجک خود بازگشتی و کنترل کننده مرتبه کسری با نام کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) مرتبه کسری مبتنی بر شبکه عصبی موجک (AWNNFOPID) پیشنهاد شده است. برای مقایسه عملکرد کنترل کننده AWNNFOPID پیشنهادی چهار سناریو متفاوت در نظر گرفته شده و نتایج با کنترل کننده‌های سنتی انتگرال گیر (I)، متناسب-انتگرال گیر (PI)، PID و همچنین با کنترل کننده PID مرتبه کسری (FOPID) بهینه مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب کنترل کننده AWNNFOPID پیشنهادی بر اساس شاخص‌های عملکردی زمان نشست، زمان صعود، حداکثر فراجهدش، حداکثر فروجهش، انتگرال زمانی قدر مطلق خطا (ITAE) و انتگرال قدر مطلق خطا (IAE) در مقایسه با سایر کنترل کننده به کار رفته برای سیستم قدرت مورد مطالعه است.

**کلمات کلیدی:** توربین بادی، خودرو الکتریکی، شبکه عصبی موجک، کنترل بار فرکانس، کنترل کننده PID مرتبه کسری، نیروگاه خورشیدی-حرارتی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۴/۳۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۶/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عباسعلی زمانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- میدان ونک- خیابان برزیل شرقی- پلاک ۴- ساختمان مرکزی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

## ۱- مقدمه

تأمین انرژی به نوعی چالش اصلی در میان تمام چالش‌هایی است که دنیای امروز با آن مواجه است. کاهش مداوم سوخت‌های فسیلی، تقاضای فزاینده انرژی و افزایش آلودگی، توجه جهان را به تنظیم مصرف برق و تنوع بخشیدن به فرآیند تولید آن جلب می‌کند. حل بحران تأمین انرژی الکتریکی می‌تواند به ریشه‌کنی فقر و بهبود توسعه زیرساخت‌ها کمک کند. در یک سیستم قدرت متصل به هم، پایداری فرکانس یکی از مسائل مهم برای اپراتورهای سیستم قدرت است. ظهور نوسانات فرکانس در داخل سیستم نشانه عدم تعادل بین تولید و تقاضای بار است، که نیاز به کنترل دارد. در مطالعه سیستم قدرت، بارهای الکتریکی به طور مکرر تغییر می‌کنند که نمی‌توان آن‌ها را کنترل کرد. بنابراین، کنترل بار فرکانس<sup>۱</sup> (LFC) به یک ابزار مهم برای عملکرد رضایت‌بخش سیستم قدرت تبدیل می‌شود. با تجدید ساختار سیستم قدرت و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، مطالعه رفتار سیستم از نظر بهره‌برداری و کنترل مناسب، اهمیت پیدا می‌کند. تنظیم فرکانس در پی نوسانات بار و به خصوص منابع انرژی تجدیدپذیر را می‌توان به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی برای اطمینان از عملکرد قابل قبول، پایدار و قابل اعتماد سیستم‌های قدرت در نظر گرفت. گسترش تدریجی سیستم قدرت موجود، نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بار فزاینده، اتخاذ و اجرای الگوریتم‌های کنترلی کارآمد و جدید برای کاهش نوسانات فرکانس را ضروری می‌سازند [۱،۲]. بررسی مقالات مختلف نشان می‌دهد که تکنیک‌های کنترلی متعددی برای مبحث کنترل بار فرکانس مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به کنترل‌کننده‌های خانواده تناسبی-انتگرالی-مشتقی<sup>۲</sup> (PID) [۳-۱۰]، کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری [۲۰-۱۱]، کنترل‌کننده‌های مد لغزش [۲۳-۲۱]، کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی [۲۷-۲۴]، کنترل‌کننده‌های مقاوم [۳۱-۲۸] کنترل‌کننده‌های تطبیقی [۳۲،۳۳] و کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مدل [۳۴،۳۵] اشاره کرد.

کنترل‌کننده‌های خانواده PID به دلیل ساختار ساده و سهولت پیاده‌سازی عملی نسبت به سایر استراتژی‌های کنترلی، توجه محققین زیادی را از گذشته تا به امروز، برای استفاده در مبحث کنترل بار فرکانس، جذب کرده‌اند. در مرجع [۳] مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌های خانواده PID مختلف مانند کنترل‌کننده انتگرالی (I)، کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI)، کنترل‌کننده انتگرالی-مشتقی (ID) و کنترل‌کننده PID برای مبحث کنترل بار فرکانس در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای، سه ناحیه‌ای و پنج ناحیه‌ای، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۴]، یک کنترل‌کننده چند-ورودی یک خروجی PID بهینه مقاوم غیرمتمرکز مبتنی بر مقادیر ویژه ماتریس مشخصه و روش لیاپانوف به عنوان یک تکنیک مناسب برای مسئله کنترل بار فرکانس در یک سیستم شامل دو سد بزرگ، پیشنهاد شده است. مروری بر انواع روش‌های طراحی کنترل‌کننده PID برای کنترل بار فرکانس در سیستم‌های قدرت در مرجع [۵] ارائه شده است. یک کنترل‌کننده PID با استفاده از رویکرد مکان مرزی پایداری برای سیستم قدرت تک ناحیه‌ای با انواع توربین‌های حرارتی با تأخیر ارتباطی در مرجع [۶] طراحی شده است و سپس رویکرد پیشنهادی در یک سیستم آزمایشی چند منطقه‌ای ۳۹ باسه IEEE نیوانگلند مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۷]، یک الگوریتم جدید بهینه‌سازی کلاس برتر مبتنی بر رتبه‌بندی<sup>۳</sup> (e-CTO) برای طراحی یک کنترل‌کننده بهینه PID برای مسئله کنترل بار فرکانس برای یک سیستم قدرت به هم پیوسته با یک خط اتصال جریان مستقیم ولتاژ بالا<sup>۴</sup> (HVDC) با موفقیت استفاده شده است. برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده PID در مرجع [۸] از یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی جستجوی گرانشی و الگوریتم ازدحام ذرات<sup>۵</sup> (PSO-GSA) برای یک سیستم قدرت دینامیکی به هم پیوسته دو ناحیه‌ای با حضور عوامل غیرخطی همچون محدودیت‌های نرخ تولید و باند مرده گاورنر<sup>۶</sup> (GDB)، استفاده شده است. در مرجع [۹] از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی<sup>۷</sup> (CRPSO)، که نسخه بهبود یافته‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۸</sup> (PSO) است، برای جستجوی پارامترهای بهینه کنترل‌کننده PID برای کنترل فرکانس در یک ریزشبکه چند منبعی با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر با موفقیت استفاده شده است. در مرجع [۱۰] از الگوریتم شبه اپوزیسیون مبتنی بر جایا<sup>۹</sup> (QOJAYA) برای طراحی بهینه کنترل‌کننده PID دو درجه آزادی برای کنترل فرکانس در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای چند واحدی و یک سیستم قدرت سه ناحیه‌ای با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی استفاده شده و نتایج آن با کنترل‌کننده PID بهینه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی مختلف مانند الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری<sup>۱۰</sup> (TLBO) مقایسه شده است. لازم به ذکر است که با وجود کاربرد گسترده کنترل‌کننده‌های خانواده PID، این نوع کنترل‌کننده‌ها فقط برای عملکرد در یک شرایط مشخص طراحی می‌شوند و عملکردشان به هر گونه اختلال

خارجی بسیار حساس هستند. این کنترل‌کننده‌ها هنگامی که تحت شرایط مختلف عملیاتی سیستم قدرت قرار می‌گیرند، به سرعت پاسخ نمی‌دهند و بنابراین در سیستم‌های قدرت با منابع انرژی تجدیدپذیر انتخاب مؤثری نیستند.

بررسی مقالات اخیر نشان می‌دهد که گسترش استفاده از حسابان کسری در ارتباط با کنترل‌کننده‌های مرتبه صحیح عملکرد سیستم را در یک سناریوی واقع‌گرایانه ارتقا می‌دهد. اوج این تحقیقات منجر به پیشنهاد کنترل‌کننده PID مرتبه کسری<sup>۱۱</sup> (FOPID) در مرجع [۱۱] است. در این کنترل‌کننده وجود دو پارامتر تنظیم اضافی، یعنی پارامتر اپراتور مرتبه کسری انتگرال و اپراتور مرتبه کسری مشتق، منجر به این شده است که کنترل‌کننده‌های مبتنی بر حسابان کسری دارای عملکرد منعطف‌تر و مقاوم‌تری نسبت به کنترل‌کننده خانواده PID باشند. در کنترل‌کننده FOPID مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر دارای مراتب غیر صحیح هستند، بنابراین در این کنترل‌کننده باید مرتبه مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر توسط طراح مشخص شود. پس این کنترل‌کننده دارای پنج پارامتر برای طراحی است. مزایای کنترل‌کننده FOPID نسبت به کنترل‌کننده PID باعث شده این کنترل‌کننده در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان که در زمینه کنترل سیستم‌های قدرت فعال هستند، قرار گیرد [۲۰-۱۲]. در مرجع [۱۲] کنترل‌کننده FOPID در یک ساختار کنترلی موازی و مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تنظیم انحراف فرکانس در سیستم قدرت تک ناحیه‌ای و دو ناحیه‌ای با توربین‌های حرارتی باز گرمایشی و غیرقابل باز گرمایشی طراحی شده است. در مرجع [۱۳] برای طراحی بهینه کنترل‌کننده FOPID که برای کنترل بار فرکانس برای یک سیستم قدرت چند منبعی چند ناحیه‌ای با در نظر گرفتن عواملی همچون تأخیرهای زمانی، محدودیت نرخ تولید و گاورنر، باند مرده از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ<sup>۱۲</sup> (WOA) استفاده شده است. کنترل‌کننده FOPID مبتنی بر الگوریتم WOA در مرجع [۱۳] دارای عملکرد دینامیکی مناسب از نظر حداکثر فرا جهش و زمان نشست بوده و نسبت به تغییرات پارامترهای سیستم عملکرد مقاومی را از خود نشان داده است. در مرجع [۱۴] الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی اتم<sup>۱۳</sup> (ASO) که الهام گرفته از قوانین فیزیک است، برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده مرتبه کسری FOPID بکار رفته برای کنترل بار فرکانس در یک سیستم قدرت هیبریدی متصل به هم<sup>۱۴</sup> (HPS) که شامل منابع انرژی تجدیدپذیر<sup>۱۵</sup> (RE) مانند تولید برق بادی، برق خورشیدی و خودروی برقی پلاگین<sup>۱۶</sup> (PEV) است، استفاده شده است. در این مرجع با در نظر گرفتن چهار سناریو متفاوت عملکرد بهتر کنترل‌کننده FOPID مبتنی بر الگوریتم ASO نسبت به کنترل‌کننده‌های PI، PID، FOI و FOPI نشان داده شده است. عملکرد کنترل‌کننده‌هایی FOPID و PID در کنترل بار فرکانس یک سیستم قدرت نامتعادل چهار ناحیه‌ای با پیوند HVDC با حضور خودرو برقی پلاگین در مرجع [۱۵] بررسی شده است. در این مرجع برای طراحی بهینه کنترل‌کننده‌ها از تکنیک بهینه‌سازی ازدحام ذرات تکامل دیفرانسیل هیبریدی<sup>۱۷</sup> (DEPSO) استفاده شده است. مقایسه پاسخ‌های دینامیکی مربوط به کنترل‌کننده‌ها برای سیستم مورد مطالعه در این مرجع نشان می‌دهد که کنترل‌کننده FOPID بهتر از کنترل‌کننده PID معمولی در کنترل فرکانس عمل می‌کند. در مرجع [۱۶] مروری بر ساختارهای مختلف کنترل‌کننده FOPID مبتنی بر بهینه‌سازی به کار رفته در کنترل بار فرکانس سیستم‌های قدرت، انجام گرفته است. یک استراتژی کنترلی FOPID پیش‌خور که ضرایب بهینه آن با الگوریتم جستجوی هارمونی اصلاح‌شده<sup>۱۸</sup> (MHSA) تنظیم می‌شوند، برای کنترل بار فرکانس یک ریزشبکه شامل مزرعه بادی، سلول‌های خورشیدی، دیزل ژنراتور و بارهای مختلف در مرجع [۱۷] ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این مرجع نشان دهنده بهبود شاخص‌های عملکردی مهمی همچون انتگرال زمانی قدر مطلق خطا<sup>۱۹</sup> (ITAE) در مقایسه با کنترل‌کننده PID است. در مرجع [۱۸] برای کنترل فرکانس در دو سیستم قدرت که سیستم اول شامل واحدهای تولید فتوولتائیک<sup>۲۰</sup> (PV) و حرارتی است و سیستم دوم شامل چهار نیروگاه فتوولتائیک، توربین بادی<sup>۲۱</sup> (WT) و دو نیروگاه حرارتی است، از کنترل‌کننده FOPID مبتنی بر الگوریتم موج میرا متحرک<sup>۲۲</sup> (MDVA) با در نظر گرفتن تابع هزینه انتگرال زمانی قدر مطلق خطا، استفاده شده است. کنترل فرکانس یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ناحیه‌ای شامل واحد ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابررسانا<sup>۲۳</sup> (SMES) با استفاده از کنترل‌کننده FOPID در مرجع [۱۹] مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که پارامترهای بهینه کنترل‌کننده‌های FOPID به کار رفته در این مرجع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انفجار بزرگ-انهدام بزرگ<sup>۲۴</sup> (BBBC) طراحی شده است. در مرجع [۲۰] از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی بازی‌های گرسنگی اصلاح‌شده<sup>۲۵</sup> (MHGS) برای تعیین پارامترهای بهینه کنترل‌کننده FOPID برای مسئله کنترل بار فرکانس در دو سیستم قدرت استفاده شده است. این دو سیستم قدرت به صورتی بوده‌اند که سیستم اول

شامل یک نیروگاه فتوولتائیک متصل به نیروگاه حرارتی بوده و سیستم دوم دارای چهار نیروگاه فتوولتائیک، توربین بادی و دو واحد حرارتی با محدودیت‌های نرخ تولید و باند مرده گاورنر می‌باشند. نتایج کنترل‌کننده FOPID مبتنی بر MHGS در این مرجع نشان دهنده عملکرد بهتر نسبت به نتایج کنترل‌کننده‌های مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی شکارچیان دریایی<sup>۲۶</sup> (MPA)، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر اکوسیستم مصنوعی<sup>۲۷</sup> (AEO)، الگوریتم بهینه‌سازی تعادل<sup>۲۸</sup> (EO)، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر رانگ گوتا<sup>۲۹</sup> (RUN)، و همچنین الگوریتم DMV است. کاربرد موفق کنترل‌کننده بهینه FOPID نسبت به کنترل‌کننده PID در مبحث کنترل بار فرکانس در مقالات مختلف بررسی شد، اما برخی چالش‌ها در این مبحث هنوز نیاز به مطالعه و بررسی بیشتری دارند. یکی از این چالش‌ها این است که روش‌های طراحی کنترل‌کننده FOPID مبتنی بر بهینه‌سازی برای کنترل بار فرکانس ممکن است به علت ماهیت الگوریتم‌های بهینه‌سازی، پارامترهای کنترل‌کننده در یک بهینه محلی قرار گرفته باشند [۲۰-۱۲]. چالش مهم دیگر این است که در مقالات مختلف با وجود عدم قطعیت‌های فراوان در سیستم‌های قدرت، پارامترهای کنترل‌کننده FOPID بعد از اجرای روند بهینه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به این چالش‌ها و با توجه به عدم قطعیت‌های زیادی که در سیستم‌های قدرت جدید با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر وجود دارد، استفاده از ساختارهای کنترل تطبیقی برای کنترل بار فرکانس می‌تواند انتخاب مناسبی باشند. از طرفی با توجه به عملکرد موفق کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری در مبحث کنترل بار فرکانس، در این مقاله یک ساختار کنترلی تطبیقی مرتبه کسری پیشنهاد شده است. ساختار کنترلی پیشنهادی ترکیبی از ساختار کنترل بار فرکانس تطبیقی مرتبه کسری، مبتنی بر شبکه‌های عصبی موجک خود بازگشتی<sup>۳۰</sup> (SRWNN) و کنترل‌کننده FOPID است که به اختصار AWNNFOPID<sup>۳۱</sup> نامیده می‌شود. برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی، یک سیستم قدرت ترکیبی دو ناحیه‌ای که شامل نیروگاه حرارتی با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی همچون باند مرده گاورنر و محدودیت میزان تولید<sup>۳۲</sup> (GRC) و منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین بادی، نیروگاه خورشیدی-حرارتی، الکترولایزر، پیل سوختی و خودرو برقی پلاگین است، در نظر گرفته می‌شود [۴۲-۱۴،۳۶]. چهار سناریو مختلف برای ارزیابی و مقایسه عملکرد کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی با چهار کنترل‌کننده PI، I، PID و FOPID، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان دهنده بهبود عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در شاخص‌های عملکردی زمان نشست، زمان صعود، حداکثر فراجهش، حداکثر فروجهش، ITAE و انتگرال قدر مطلق خطا<sup>۳۳</sup> (IAE) نسبت به کنترل‌کننده‌های PI، I، PID و FOPID به کار رفته برای این سیستم است.

تقسیم‌بندی سایر قسمت‌های مقاله به این شرح است. در قسمت دوم به مدل سیستم قدرت ترکیبی مورد مطالعه اشاره می‌شود. در قسمت سوم به بیان ساختار کنترل‌کننده تطبیقی مرتبه کسری پیشنهادی پرداخته می‌شود. در قسمت چهارم با بیان پارامترهای سیستم مورد مطالعه و تعریف چهار سناریو مختلف، مطالعات عددی روش کنترلی پیشنهادی انجام می‌شود. قسمت آخر به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

## ۲- مدل سیستم قدرت ترکیبی مورد مطالعه

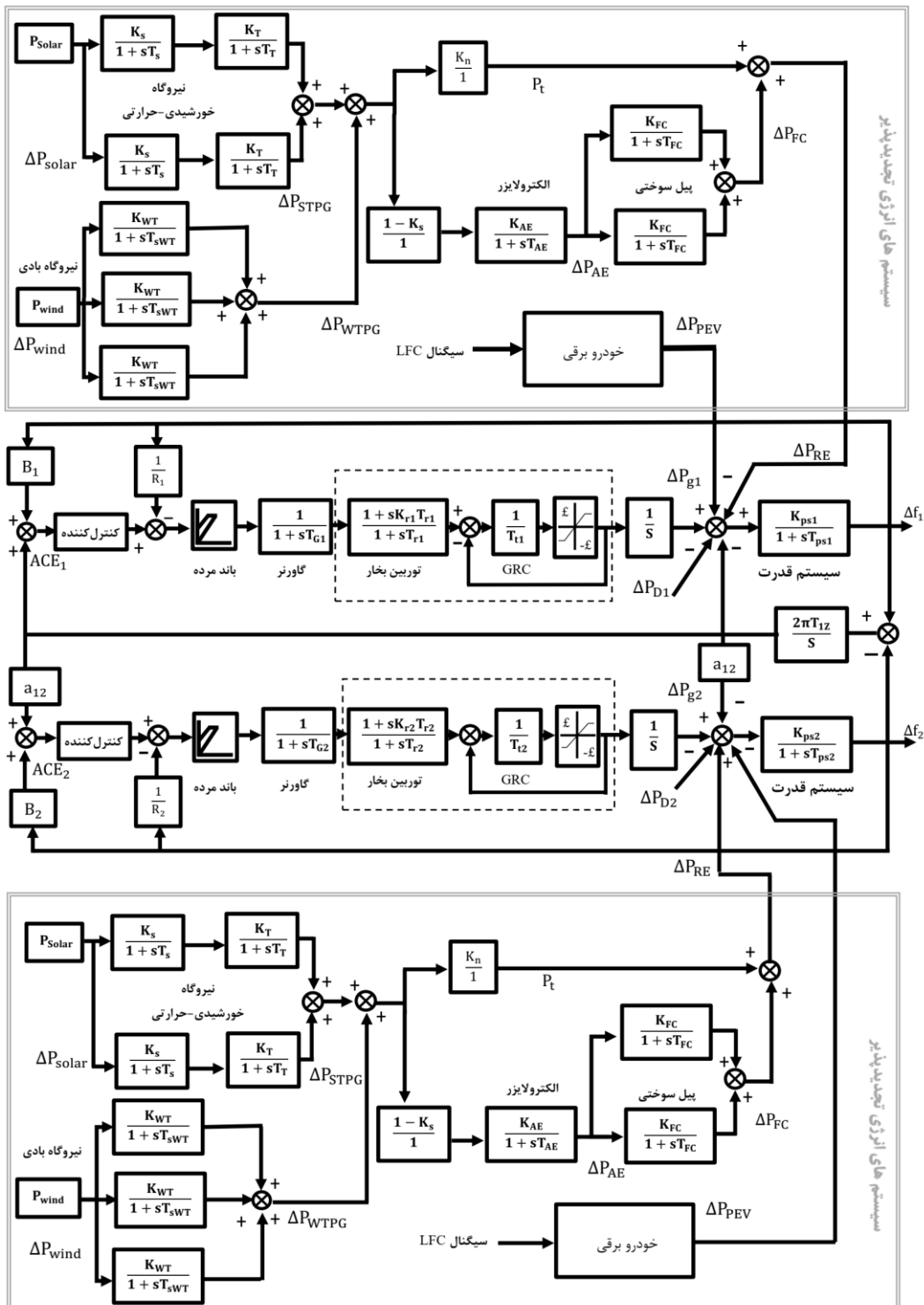
در این مقاله مدل سیستم قدرت ترکیبی چند منطقه‌ای نشان داده شده در شکل (۱) مورد مطالعه قرار گرفته است. این سیستم شامل نیروگاه حرارتی با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی همچون باند مرده گاورنر و محدودیت میزان تولید و منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین بادی، نیروگاه خورشیدی-حرارتی، الکترولایزر، پیل سوختی و خودرو برقی پلاگین است. توضیح مربوط به هر یک از عوامل این سیستم در مراجع [۴۲-۱۴،۳۶] بیان گردیده است و در این قسمت به اختصار بیان می‌شود.

### ۱-۲- مدل توربین بادی

انرژی باد در مقایسه با سایر منابع، سریع‌ترین گسترش را در بین منابع تولید انرژی پاک دارد. اضافه‌کردن توربین بادی در شبکه ممکن است باعث تغییر فرکانس شبکه به دلیل ماهیت تصادفی تولید برق بادی شود [۳۹،۱۴]. لازم به ذکر است که از دستگاه‌های ذخیره انرژی مانند الکترولایزر و پیل سوختی همراه با توربین بادی برای حفظ تعادل توان استفاده می‌شود. در این مطالعه، از

یک تابع انتقال مرتبه اول برای تجزیه و تحلیل نفوذ توربین بادی در سیستم قدرت ترکیبی، مطابق رابطه (۱) استفاده شده که در آن  $K_{WT}$  و  $T_{WT}$  ثابت بهره و ثابت زمانی ژنراتور توربین بادی است.

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



شکل (۱): مدل سیستم قدرت ترکیبی چند منطقه‌ای مورد مطالعه

Figure (1): The studied model of multi-area hybrid power system

## ۲-۲- مدل نیروگاه خورشیدی-حرارتی

در سیستم‌های قدرت، انرژی خورشیدی یکی دیگر از منابع پاک اصلی جایگزین و بدون کربن برای تولید برق بوده که با استفاده از سلول‌های خورشیدی و یا سیستم مبدل حرارتی استفاده می‌شود. تابع تبدیل سیستم نیروگاه خورشیدی-حرارتی خطی شده و به شکل تابع انتقال نشان داده شده در رابطه (۲) است. در این رابطه  $K_S$  و  $K_T$  ثابت بهره و  $T_S$  و  $T_T$  ثابت زمانی ژنراتور خورشیدی-حرارتی است [۴۰].

$$G_s(s) = \frac{K_s}{1+sT_s} \frac{K_T}{1+sT_T} = \frac{\Delta P_{STPG}}{\Delta P_{solar}} \quad (2)$$

## ۲-۳- مدل‌های پیل سوختی

پیل سوختی، یک دستگاه الکتروشیمیایی ساکن است که با ایجاد هیدروژن و اکسیژن، آب و انرژی الکتریکی تولید می‌کند. این منبع به‌عنوان یک منبع مهم در سیستم قدرت هیبریدی توزیع شده، به دلیل مزایای برجسته‌ای همچون راندمان بالا و آلودگی کم، شناخته می‌شود [۱۴]. صرف‌نظر از سایر اجزای غیرخطی، پیل سوختی را می‌توان با یک تابع انتقال مرتبه اول خطی به‌صورت رابطه (۳) مدل کرد. در این رابطه  $K_{PC}$  و  $T_{PC}$  ثابت بهره و ثابت زمانی پیل سوختی است.

$$G_{FC}(s) = \frac{K_{FC}}{1+sT_{FC}} \quad (3)$$

## ۲-۴- مدل الکترولایزر

الکترولایزر آبی هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی را از طریق بخشی از توان ایجاد شده توسط منابع انرژی باد و خورشید، تأمین می‌کند [۱۴]. به عبارت دیگر بخش  $(1-K_n)$  انرژی باد و انرژی فتوولتائیک توسط الکترولایزر آب برای تولید هیدروژن برای پیل‌های سوختی استفاده شده است. ژنراتور برق الکترولایزر آبی را می‌توان با یک تابع انتقال مرتبه اول، که در مرجع [۴۳] ارائه شده است، خطی کرد:

$$G_{AE}(s) = \frac{K_{AE}}{1+sT_{AE}} = \frac{\Delta P_{AE}}{(\Delta P_{WTPG} + \Delta P_{STPG})(1-K_n)} \quad (4)$$

در رابطه بالا  $K_n$  مطابق رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود و در شبیه‌سازی مقدار آن  $0/6$  لحاظ می‌شود و  $K_{AE}$  و  $T_{AE}$  ثابت بهره و ثابت زمانی الکترولایزر است.

$$K_n = \frac{P_l}{(P_{WTPG} + P_{STPG})} \quad (5)$$

## ۲-۵- مدل خودرو الکتریکی

در دهه اخیر استفاده از خودروهای الکتریکی به‌منظور حمل‌ونقل پاک بدون تولید گازهای گلخانه‌ای، در کشورهای مختلف روند رو به رشدی داشته است. از آنجایی که تعداد زیادی از خودروهای الکتریکی قرار است در آینده نزدیک در جاده‌ها حرکت کنند، یک مدل یکپارچه در مطالعه حاضر برای آن در نظر گرفته شده است. هر خودرو الکتریکی بر اساس ظرفیت اینورتر خود مدل‌سازی می‌شود. جزئیات مدل یکپارچه در نظر گرفته شده در شکل (۲) نشان داده شده است [۴۱، ۴۲]. در این شکل  $\Delta U_E$  سیگنال کنترل بار فرکانس است که به‌عنوان ورودی به PEV داده می‌شود و توان شارژ/دشارژ یک PEV خروجی این مدل است. ثابت زمانی PEV با  $T$  و ظرفیت باتری با  $B_{kw}$  نشان داده می‌شود. انرژی فعلی باتری با  $E$  و انرژی قابل کنترل باتری با محدودیت‌های  $E_{min}$  و  $E_{max}$  نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است که انرژی PEV به ترتیب در حد حداقل ۸۰ درصد و حداکثر ۹۰ درصد انرژی قابل کنترل باقی می‌ماند، بنابراین PEV زمانی که شارژ بالاتر از حداکثر و کمتر از حداقل است در AGC شرکت نمی‌کند. همچنین در این مدل  $K_1$  و  $K_2$  به‌عنوان تفاوت انرژی مطابق رابطه (۶) در نظر گرفته می‌شوند. مدل انرژی ذخیره شده در شکل (۲) انرژی خالص ذخیره شده در باتری‌ها را در یک مرکز کنترل محلی محاسبه می‌کند. مرکز کنترل محلی می‌تواند به‌عنوان یک پیوند

ارتباطی بین شبکه برق و وسایل نقلیه الکتریکی که چندین خودرو الکتریکی را کنترل می‌کنند، عمل کند. مدل انرژی ذخیره شده یک PEV در شکل (۳) نشان داده شده است. تعداد خودروهای قابل کنترل ( $N_{control}$ ) که به شبکه انرژی می‌دهند به صورت رابطه (۶) بیان می‌شوند. در این رابطه  $N_{initial}$ ،  $N_{control-in}$  و  $N_{plug-out}$  به ترتیب تعداد اولیه خودروهای قابل کنترل، تعداد خودروهای برقی در حال حرکت از حالت شارژ به حالت قابل کنترل و تعداد خودروهای برقی در حال حرکت از حالت کنترل به حالت رانندگی را نشان می‌دهند.

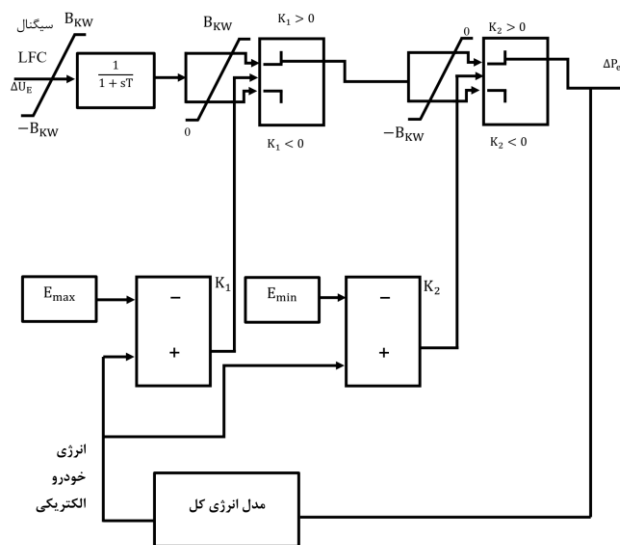
$$\begin{cases} K_1 = E - E_{max} \\ K_2 = E - E_{min} \\ N_{control}(t) = N_{initial}(t) + N_{control-in}(t) - N_{plug-out}(t) \end{cases} \quad (6)$$

عبارت انرژی به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$E_{control}(t) = E_{initial}(t) + E_{control-in}(t) - E_{plug-out}(t) - E_{LFC}(t) \quad (7)$$

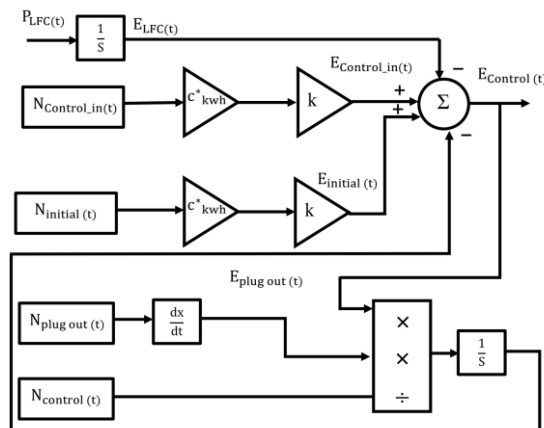
در این رابطه  $E_{plug-out}$  و  $E_{control-in}$ ،  $E_{initial}$  نشان‌دهنده انرژی اولیه، افزایش انرژی به خاطر افزایش تعداد خودرو الکتریکی متصل به شبکه، کاهش انرژی به خاطر قطع اتصال خودرو الکتریکی از شبکه هستند. در شکل (۳)، انرژی  $E_{LFC}$  مربوط به سیگنال کنترل بار فرکانس است که با توجه به توان محلی مرکزی PLFC به دست آمده و به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$E_{LFC}(t) = \int_0^t P_{LFC}(t) dt \quad (8)$$



شکل (۲): مدل یکپارچه یک خودرو الکتریکی

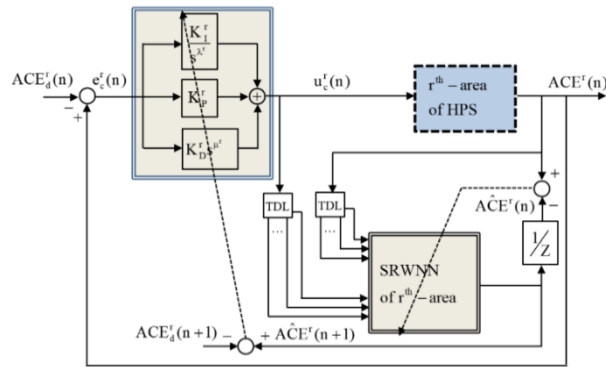
Figure (2): Lumped model of electric vehicle



شکل (۳): مدل انرژی ذخیره شده یک خودروی برقی پلاگین

Figure (3): The model of stored energy of a PEV





شکل (۴): ساختار کنترلی پیشنهادی برای r-امین ناحیه سیستم قدرت ترکیبی مورد مطالعه

Figure (4): Proposed control structure for the r-th area of the studied hybrid power system

### ۳- ساختار کنترل بار فرکانس تطبیقی مرتبه کسری پیشنهادی

در یک سیستم قدرت به هم پیوسته، پایداری فرکانس یکی از مسائل مهم برای اپراتورهای سیستم قدرت است. ظهور نوسانات فرکانس در داخل سیستم نشانه عدم تعادل بین تولید و تقاضای بار است که نیاز به کنترل دارد. در مطالعه سیستم قدرت، بارهای الکتریکی به طور مکرر تغییر می کنند که نمی توان آن ها را کنترل کرد. بنابراین، کنترل بار فرکانس به یک ابزار مهم برای عملکرد رضایت بخش سیستم قدرت تبدیل می شود. با تجدید ساختار سیستم قدرت و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر (RESs)، مطالعه رفتار سیستم از نظر بهره برداری و کنترل مناسب اهمیت پیدا می کند. نفوذ بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت، عدم قطعیت ها را در زمان عملکرد عادی افزایش می دهد و مشکلات فنی مختلفی را به همراه داشته که نیاز به مطالعه دارد [۱،۲]. با توجه به عدم قطعیت های زیادی که در سیستم های قدرت جدید وجود دارد استفاده از ساختارهای کنترل تطبیقی برای کنترل بار فرکانس می تواند انتخاب هوشمندانه ای باشد. از طرفی با توجه به عملکرد موفق کنترل کننده های مرتبه کسری در مبحث کنترل بار فرکانس، در این قسمت یک ساختار کنترلی تطبیقی مرتبه کسری پیشنهاد می شود. ساختار کنترلی بار فرکانس پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود برای یک سیستم که دارای ناحیه است، از این ساختار کنترلی می توان استفاده کرد. در این ساختار از بلوک SRWNN برای تخمین مقادیر سیگنال خطای کنترل ناحیه<sup>۳۵</sup> (ACE) هر ناحیه استفاده می شود. سپس با داشتن نتایج ACE هر ناحیه، پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری به صورت تطبیقی برای بهبود پاسخ سیستم تعیین می شود. جزئیات بلوک SRWNN در ساختار کنترلی پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشاهده می شود، یک شبکه SRWNN با  $N_i$  ورودی،  $N_o \times N_w$  موجک های مادر دارای چهار لایه است که عبارتند از لایه ورودی، لایه موجک های مادر، لایه عملیات ضرب و لایه خروجی. موجک مادر انتخاب شده در این مقاله به صورت یک تابع گوسی مطابق رابطه (۹) است و برای هر گره  $\phi_{ij}$  مطابق رابطه (۱۰) در نظر گرفته می شود.

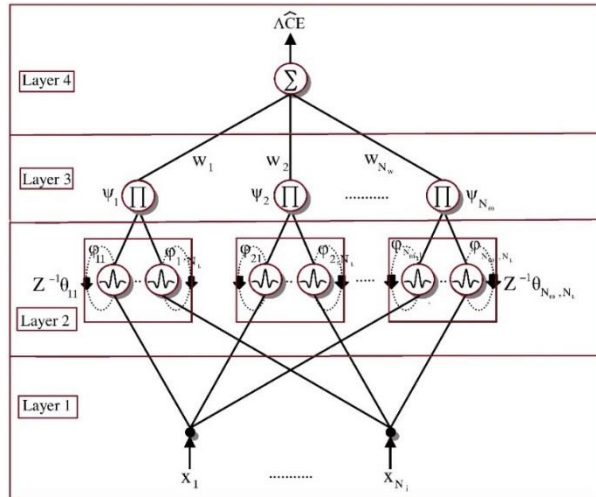
$$\phi(x) = x \exp(-0.5x^2) \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ij}(z_{ij}) = \phi\left(\frac{u_{ij} - t_{ij}}{d_{ij}}\right) \\ z_{ij} = \frac{u_{ij} - t_{ij}}{d_{ij}} \end{array} \right. \quad (10)$$

در این رابطه  $t_{ij}$  و  $d_{ij}$  فاکتور انتقال و انبساط موجک است. برای ژامین ورودی  $i$  امین موجک در نمونه زمانی  $n$  ام رابطه (۱۱) را خواهیم داشت.

$$u_{ij}(n) = x_{ij}(n) + \phi_{ij}(n-1)\theta_{ij} \quad (11)$$

در این رابطه  $\theta_{ij}$  و  $\phi_{ij}(n-1)$  به ترتیب نشان دهنده وزن حلقه فیدبک داخلی و عامل حافظه برای رزرو اطلاعات شبکه هستند. برای گره های لایه سوم رابطه زیر را خواهیم داشت.



شکل (۵): ساختار شبکه SRWNN  
Figure (5): Network structure of SRWNN

$$\psi_i(x) = \prod_{j=1}^N \phi(z_{ij}) = \prod_{j=1}^N \left[ -z_{ij} \exp\left(-\frac{1}{2}(z_{ij})^2\right) \right] \quad (12)$$

گره موجود در لایه چهارم، خروجی شبکه SRWNN است که رابطه (۱۳) مربوط به آن است.

$$\hat{ACE}^i(n) = \sum_{i=1}^{N_n} w_i \psi_i(x) \quad (13)$$

برای آموزش شبکه SRWNN تابع هزینه مرتبه دوم همانند رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$J(n) = \frac{1}{2} [ACE^i(n) - \hat{ACE}^i(n)]^2 = \frac{1}{2} [e^i(n)]^2 \quad (14)$$

در این رابطه  $ACE^i(n)$  و  $\hat{ACE}^i(n)$  نشان دهنده مقدار خروجی واقعی و خروجی شبکه SRWNN برای نمونه زمانی  $n$ ام هستند. برای تنظیم وزن‌های شبکه SRWNN از روش گرادیان نزولی استفاده می‌شود. در این روش از رابطه (۱۵) برای تنظیم وزن‌های شبکه استفاده می‌شود که  $W$  و  $\eta$  نشان‌دهنده بردار وزن‌های شبکه و بردار نرخ یادگیری شبکه هستند.

$$\begin{cases} W^i(n+1) = W^i(n) + \eta^i \left( -\frac{\partial J(n)}{\partial W^i(n)} \right) \\ W = [t_{ij} \ d_{ij} \ \theta_{ij} \ w_{ij}]^T \\ \eta = [\eta^i \ \eta^d \ \eta^{\theta} \ \eta^w]^T \end{cases} \quad (15)$$

مشتق جزئی تابع هزینه نسبت به  $W^i$  به صورت رابطه (۱۶) است.

$$\frac{\partial J(n)}{\partial W^i(n)} = -e^i(n) \frac{\partial \hat{ACE}^i(n)}{\partial W^i(n)} \quad (16)$$

بردار وزن‌های شبکه با اعمال قانون مشتق زنجیره‌ای، به صورت روابط زیر خواهند بود.

$$\frac{\partial \hat{ACE}^i(n)}{\partial t_{ij}(n)} = w_i \psi_i \left( \frac{-1}{d_{ij}} \right) \left( \frac{1}{z_{ij}} - z_{ij} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \hat{ACE}^i(n)}{\partial d_{ij}(n)} = z_{ij} \frac{\partial \hat{ACE}^i(n)}{\partial t_{ij}(n)} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \hat{ACE}^i(n)}{\partial \theta_{ij}(n)} = -\phi_{ij}(n-1) \frac{\partial \hat{ACE}^i(n)}{\partial t_{ij}(n)} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \hat{ACE}^i(n)}{\partial w_i(n)} = \psi_i(x) \quad (20)$$

در ساختار کنترلی پیشنهادی شکل (۴) خروجی سیستم کنترلی وظیفه کاهش خطای کنترل هر ناحیه را به عهده دارد. خروجی کنترلی قسمت مرتبه کسری کنترل کننده پیشنهادی به صورت رابطه زیر در نظر گرفته می شود.

$$u_c^r = K_p^r e_c^r + \frac{K_I^r}{s^{\lambda^r}} e_c^r + K_D^r s^{\mu^r} e_c^r \quad \lambda^r, \mu^r \in (0,1) \quad (21)$$

با در نظر گرفتن تابع هزینه مرتبه دوم رابطه (۲۲) می توان پارامترهای کنترل کننده را به صورت آنلاین با استفاده از روش پس انتشار خطا و گرادیان نزولی به دست آورد.

$$J_c^i(n) = \frac{1}{2} [ACE_c^i(n) - ACE_d^i(n)]^2 = \frac{1}{2} [e_c^i(n)]^2 \quad (22)$$

در این رابطه  $ACE_c^i(n)$  و  $ACE_d^i(n)$  خروجی سیستم و خروجی مطلوب است، برای کمینه کردن تابع هزینه رابطه (۲۲) از روش گرادیان نزولی مطابق با رابطه (۲۳) استفاده می شود.

$$\begin{cases} W_c^i(n+1) = W_c^i(n) + \eta_c^i \left( -\frac{\partial J_c^i(n)}{\partial W_c^i(n)} \right) \\ W_c^i = [K_p^r, K_I^r, K_D^r, \lambda^r, \mu^r] \\ \eta_c^i = [\eta^{K_p^r}, \eta^{K_I^r}, \eta^{K_D^r}, \eta^{\lambda^r}, \eta^{\mu^r}] \end{cases} \quad (23)$$

در این رابطه  $W_c$  و  $\eta_c$  بردار پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری و بردار نرخ های یادگیری هستند. با گرفتن مشتقات جزئی از تابع هزینه نسبت به  $W_c^i$  رابطه (۲۴) به دست می آید. اجزای بردار وزن ها در به صورت رابطه های (۲۵) تا (۲۹) به دست می آیند.

$$\frac{\partial J_c^i(n)}{\partial W_c^i(n)} = \left[ e_c^i(n) \frac{\partial ACE_c^i(n)}{\partial u_c^i(n)} \right] \frac{\partial u_c^i(n)}{\partial W_c^i(n)} \quad (24)$$

$$\frac{\partial u_c^r}{\partial K_p^r} = e_c^r \quad (25)$$

$$\frac{\partial u_c^r}{\partial K_I^r} = \frac{1}{s^{\lambda^r}} e_c^r \quad (26)$$

$$\frac{\partial u_c^r}{\partial K_D^r} = s^{\mu^r} e_c^r \quad (27)$$

$$\frac{\partial u_c^r}{\partial \lambda^r} = -\frac{K_I^r}{s^{\lambda^r}} e_c^r \ln(s) \quad (28)$$

$$\frac{\partial u_c^r}{\partial \mu^r} = K_D^r s^{\mu^r} e_c^r \ln(s) \quad (29)$$

در رابطه بالا ژاکوبین سیستم تحت کنترل در نمونه زمانی  $n$ م به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\frac{\partial ACE_c^i(n)}{\partial u_c^i(n)} \quad (30)$$

برای محاسبه ژاکوبین پلنت از شبکه SRWNN مطابق با رابطه زیر استفاده می شود.

$$\frac{\partial ACE_c^i(n+1)}{\partial u_c^i(n)} \approx \frac{\partial \hat{ACE}_c^i(n+1)}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial u_c^i(n)} \quad (31)$$

در رابطه بالا  $x_1$  و  $\hat{ACE}_c^i$  ورودی و خروجی شبکه SRWNN هستند و ترم دوم رابطه (۳۱) به صورت روابط زیر به دست می آید.

$$x_1 = [ACE_c^i(n), ACE_c^i(n-1), \dots, ACE_c^i(n-p), u_c^i(n), u_c^i(n-1), \dots, u_c^i(n-q)] \quad (32)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial u_i'(n)} = [0, 0, \dots, 1, f_1(z), \dots, f_i(z)]^T, f_i(z) = z^{-1} \quad (33)$$

برای ترم اول رابطه (۳۱) عبارت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{\partial \widehat{ACE}'(n+1)}{\partial x_{i,j}} = \sum_{i=1}^{N_s} w_i \times \psi_i \left( \frac{1}{d_j} \right) \left( \frac{1}{z_j} - z_j \right) \quad (34)$$

در شبیه‌سازی‌ها مقادیر p و q برابر یک در نظر گرفته شده است.

#### ۴- پیاده‌سازی و مطالعات عددی

برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی پارامترهای سیستم قدرت ترکیبی مورد مطالعه در جدول (۱) آمده است [۱۴، ۳۶]. چهار سناریو مختلف برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در نظر گرفته شده و نتایج به دست آمده از کنترل‌کننده پیشنهادی با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۴] مقایسه شده است. برای این منظور از دو شاخص عملکردی IAE و ITAE مطابق روابط زیر استفاده می‌شود.

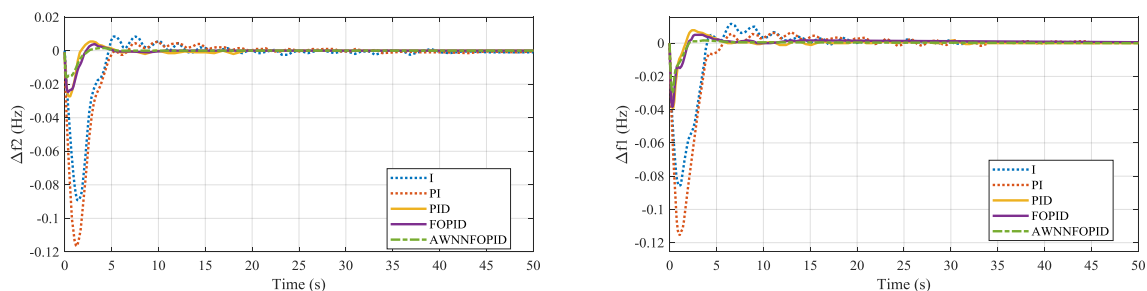
$$\left\{ \begin{aligned} J_{IAE} &= \int_{t=0}^{t=T_{sim}} |\Delta f_i| dt, i = 1, 2 \\ J_{IAE} &= \int_{t=0}^{t=T_{sim}} |\Delta p_{tie}| dt \end{aligned} \right. \quad (35)$$

$$\left\{ \begin{aligned} J_{ITAE} &= \int_{t=0}^{t=T_{sim}} t |\Delta f_i| dt, i = 1, 2 \\ J_{ITAE} &= \int_{t=0}^{t=T_{sim}} t |\Delta p_{tie}| dt \end{aligned} \right. \quad (36)$$

در سناریو اول، مدل سیستم قدرت ترکیبی شامل نیروگاه حرارتی با لحاظ تأثیر GRC و GDB همراه با منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی باد و انرژی خورشیدی-حرارتی با دستگاه‌های ذخیره انرژی الکترولایزر و پیل سوختی متصل به سیستم مطابق رابطه (۳۷) است. سیستم دو ناحیه‌ای در نظر گرفته شده دارای پارامترهای یکسانی هستند که با تغییر پله‌ای بار به ترتیب با ۰/۰۲۵ پریونیت و ۰/۰۱۵ پریونیت ظرفیت کارخانه در منطقه ۱ و منطقه ۲ عمل می‌کند.

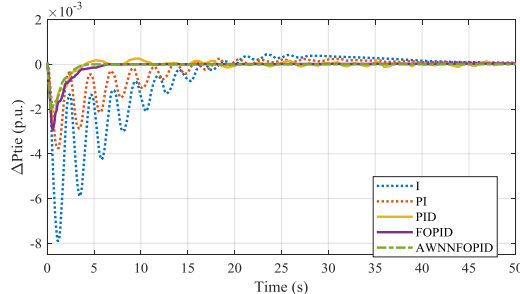
Table (1): Parameters of the studied hybrid power system  
جدول (۱): پارامترهای سیستم قدرت ترکیبی مورد مطالعه

پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
$T_{12}=T_{21}$	۰/۰۸۶۷۴	پریونیت-مگاوات بر رادیان.هرتز	$K_T$	۱	-
$K_{psi}$	۲۰۰	هرتز بر پریونیت-مگاوات	$T_T$	۰/۳	ثانیه
$T_{psi}$	۲۰	ثانیه	$K_{WT}$	۱	-
$K_{fi}$	۰/۵	-	$T_{WT}$	۱/۵	ثانیه
$T_{fi}$	۱۰	ثانیه	$K_{AE}$	۰/۰۰۲	-
$T_{Gi}$	۰/۰۸	ثانیه	$T_{AE}$	۰/۵	ثانیه
$T_{ti}$	۰/۳	ثانیه	$K_{FC}$	۰/۰۱	-
$B_i$	۰/۴۲۵	پریونیت-مگاوات بر هرتز	$T_{FC}$	۴	ثانیه
$R_i$	۲/۴	پریونیت-مگاوات بر هرتز	$a_{12}$	۱	-
$D_i$	۸۵۷/۹۹	پریونیت-مگاوات بر هرتز	$K_n$	۰/۶	-
$H_i$	۵	ثانیه	$T_s$	۱/۸	ثانیه
$K_s$	۱/۸	-	GDB	۰/۰۵	-
GRC	۰/۰۳	پریونیت-مگاوات بر دقیقه	Load	۰/۵	-



(ب) تغییرات فرکانس ناحیه دوم

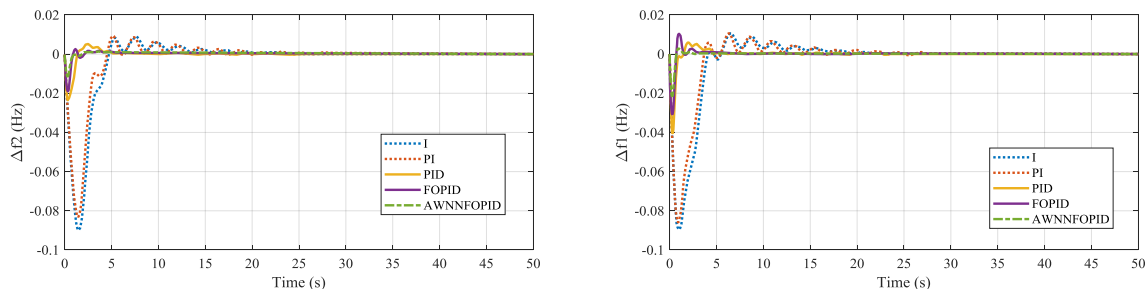
(الف) تغییرات فرکانس ناحیه اول



(ج) توان انتقالی بین ناحیه‌ای

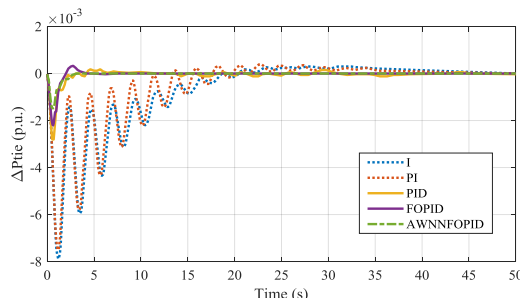
شکل (۶): پاسخ‌های دینامیکی مربوط به سناریو اول

Figure (6): Dynamic responses of the first scenario, a)  $\Delta f_1$ , b)  $\Delta f_2$ , c)  $\Delta P_{tie}$



(ب) تغییرات فرکانس ناحیه دوم

(الف) تغییرات فرکانس ناحیه اول



(ج) توان انتقالی بین ناحیه‌ای

شکل (۷): پاسخ‌های دینامیکی مربوط به سناریو دوم

Figure (7): Dynamic responses of the second scenario, a)  $\Delta f_1$ , b)  $\Delta f_2$ , c)  $\Delta P_{tie}$

پاسخ دینامیکی انحراف فرکانس و تغییرات توان اتصال نواحی مربوط به این سناریو در شکل (۶) و جدول‌های (۲) الی (۴) نشان داده شده است.

$$P_s = P_{Thermal} + P_{Wind} + P_{Solar} - P_{AE} + P_{FC} \quad (37)$$

همان‌طور که از جدول‌های (۲) الی (۴) مشاهده می‌شود کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی منجر به کاهش قابل توجه شاخص‌های عملکردی نسبت به کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID شده است. به‌عنوان نمونه زمان نشست پاسخ  $\Delta f_1$  کنترل‌کننده AWNNFOPID به‌اندازه ۸۰ درصد، ۸۰ درصد، ۴۹ درصد و ۴۴ درصد نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I, PI, PID

و FOPID کاهش پیدا کرده است. این کاهش‌ها برای بیشینه فروجهش پاسخ  $\Delta f_2$  کنترل‌کننده AWNNFOPID به اندازه ۸۶ درصد، ۸۸ درصد، ۵۴ درصد و ۴۶ درصد نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID است. شاخص ITAE مربوط به پاسخ  $\Delta P_{tie}$  کنترل‌کننده AWNNFOPID به اندازه ۹۱ درصد، ۹۱ درصد، ۶۶ درصد و ۳۲ درصد کاهش نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است در تمام شاخص‌های عملکردی، شاهد بهبود عملکرد سیستم تحت کنترل با کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی هستیم. در سناریوی دوم شرایط مشابه سناریوی اول است با این تفاوت که PEV یکسان در هر دو ناحیه سیستم قدرت متصل به شبکه موجود است. PEV ها سریع‌تر از مجموعه توربین و ژنراتور معمولی به تغییرات بار پاسخ می‌دهند و بیشتر برای میرایی مقدار پیک نوسانات فرکانس ناشی از تغییر در توان تولیدی انرژی‌های نو استفاده می‌شود. پس از تأثیر خودروهای الکتریکی در نوسانات سیستم، خطای حالت پایدار سیستم را می‌توان با کنترل توربین و گاورنر سیستم حرارتی حذف کرد. اغتشاشات بار پله‌ای در هر دو ناحیه مشابه سناریو اول لحاظ شده است. تولید برای پاسخگویی به تقاضای بار رابطه (۳۸) خواهد بود. پاسخ دینامیکی انحراف فرکانس و تغییرات توان اتصال نواحی مربوط به این سناریو در شکل (۷) و جدول‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

$$P_S = P_{Thermal} + P_{Wind} + P_{Solar} - P_{AE} + P_{FC} \pm P_{PEV} \quad (38)$$

Table (2): Performance indices of  $\Delta f_1$  for the first scenario  
جدول (۲): مقادیر شاخص‌های عملکردی تغییرات فرکانس ناحیه اول برای سناریو اول

روش کنترلی شاخص	انتگرالی	تناسبی-انتگرالی	تناسبی-انتگرالی- مشتق‌گیر	کنترل‌کننده PID مرتب‌ه کسری	روش پیشنهادی
زمان نشست	16/4217	16/3082	6/3281	5/8039	3/2351
زمان صعود	۱/۱۳۸	۱/۱۸۹	۰/۲۹۰	۰/۲۲۰	۰/۱۴۱
بیشینه فراجهش	0/0192	0/0124	0/0102	0/0053	0/0005
بیشینه فروجهش	0/08671	0/1151	0/0398	0/0394	0/0241
ITAE	1/007	1/084	0/3082	0/2515	0/1834

Table (3): Performance indices of  $\Delta f_2$  for the first scenario.  
جدول (۳): مقادیر شاخص‌های عملکردی تغییرات فرکانس ناحیه دوم برای سناریو اول

روش کنترلی شاخص	انتگرالی	تناسبی-انتگرالی	تناسبی-انتگرالی- مشتق‌گیر	کنترل‌کننده PID مرتب‌ه کسری	روش پیشنهادی
زمان نشست	15/2398	16/3083	7/123	6/1947	5/8461
زمان صعود	۱/۰۴۲	۱/۱۲۰	۰/۴۶۵	۰/۳۸۷	۰/۲۱۹
بیشینه فراجهش	۰/۰۱۰۲	0/0046	0/0062	0/0049	0/0003
بیشینه فروجهش	۰/۰۸۹۷	0/1031	0/0271	0/0232	0/0125
ITAE	۰/۹۷۱۷	1/083	0/2945	0/2487	0/1623

Table (4): Performance indices of  $\Delta P_{tie}$  for the first scenario.  
جدول (۴): مقادیر شاخص‌های عملکردی توان انتقالی بین ناحیه‌ای برای سناریو اول

روش کنترلی شاخص	انتگرالی	تناسبی-انتگرالی	تناسبی-انتگرالی- مشتق‌گیر	کنترل‌کننده PID مرتب‌ه کسری	روش پیشنهادی
زمان نشست	37/4831	268/34	6546/13	6506/7	5/0379
زمان صعود	۱/۰۸۰	۱/۱۱۴	۰/۸۲۴	۰/۹۵۰	۰/۸۱۱
بیشینه فراجهش	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۵۴	0/00034	0/00001	0/00001
بیشینه فروجهش	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۳۸	0/0027	0/0024	0/0019
ITAE	0/3688	0/3578	0/0927	0/0463	0/03167

همان‌طور که از جداول (۴) تا (۶) ملاحظه می‌شود کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی منجر به کاهش قابل‌توجه در شاخص‌های عملکردی در این سناریو نسبت به کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID شده است. به‌عنوان نمونه شاخص ITAE پاسخ  $\Delta f_1$  کنترل‌کننده AWNNFOPID به‌اندازه ۹۸ درصد، ۹۷ درصد، ۹۱ درصد و ۴۰ درصد نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID کاهش پیدا کرده است. این کاهش‌ها برای شاخص ITAE پاسخ  $\Delta f_2$  کنترل‌کننده AWNNFOPID به‌اندازه ۹۸ درصد، ۹۸ درصد، ۹۳ درصد و ۴۶ درصد نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID است. برای شاخص ITAE پاسخ  $\Delta P_{tie}$  کنترل‌کننده AWNNFOPID به‌اندازه ۹۸ درصد، ۹۸ درصد، ۹۵ درصد و ۳۵ درصد کاهش نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID گزارش شده است. لازم به ذکر است که در این سناریو نیز در تمام شاخص‌های عملکردی زمان صعود، زمان نشست، حداکثر فراجهش و حداکثر فروجهش شاهد بهبود عملکرد سیستم تحت کنترل با کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی هستیم. در سناریو سوم عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با توجه به تأثیر منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت ترکیبی بررسی می‌شود. وجود ماهیت متغیر تولید برق توربین بادی و خورشیدی-حرارتی نیاز به مطالعه دارد. برای ارزیابی این مسئله، تغییرات تصادفی در خروجی انرژی‌های تجدیدپذیر و اغتشاش بار تصادفی به سیستم قدرت ترکیبی اعمال می‌شود. تغییر تصادفی توان خروجی ژنراتورهای بادی و سیستم برق خورشیدی-حرارتی در شکل (۸) نشان داده شده است. پاسخ دینامیکی انحراف فرکانس و تغییرات توان خروجی ژنراتورهای بادی و سیستم برق خورشیدی-حرارتی در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌های (۹) و (۱۰) ملاحظه می‌شود کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی منجر به کاهش قابل‌توجه در حداکثر فروجهش در این سناریو نسبت به کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID شده است. مقادیر شاخص IAE برای حالت تغییر تصادفی توان خروجی ژنراتورهای بادی و سیستم برق خورشیدی-حرارتی برای کنترل‌کننده‌های I, PI, PID, FOPID و AWNNFOPID پیشنهادی به ترتیب در قسمت (الف) و (ب) جدول (۸) گزارش شده است. همان‌طور که از اطلاعات جدول (۸) و شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی کمترین نوسانات را در پاسخ‌ها با تغییر تصادفی توان خروجی ژنراتورهای بادی و سیستم برق خورشیدی-حرارتی باعث شده است. به‌عنوان نمونه کنترل‌کننده AWNNFOPID برای پاسخ  $\Delta f_1$  برای حالت تغییر تصادفی توان خروجی ژنراتورهای بادی، منجر به کاهش ۷۶ درصد، ۶۶ درصد، ۲۴ درصد و ۱۵ درصد شاخص IAE نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID شده است. در سناریوی آخر، اثر تغییر تصادفی در تقاضای بار در نظر گرفته شده است.

Table (5): Performance indices of  $\Delta f_1$  for the second scenario

جدول (۵): مقادیر شاخص‌های عملکردی تغییرات فرکانس ناحیه اول برای سناریو دوم

روش پیشنهادی	کنترل‌کننده PID	تناسبی-انتگرالی - مشتق‌گیر	تناسبی-انتگرالی	انتگرالی	روش کنترلی شاخص
زمان نشست	3/8310	5/3380	6/1799	19/8600	18/2703
زمان صعود	۰/۱۱۸	۰/۱۶۴	۰/۳۶۶	۱/۲۱۳	۱/۱۹۷
بیشینه فراجهش	0/0023	0/0051	0/0068	0/0103	0/0105
بیشینه فروجهش	0/0192	0/0301	0/0392	0/0829	0/0868
ITAE	0/0231	0/0388	0/2714	0/8566	1/0110

Table (6): Performance indices of  $\Delta f_2$  for the second scenario

جدول (۶): مقادیر شاخص‌های عملکردی تغییرات فرکانس ناحیه دوم برای سناریو دوم

روش پیشنهادی	کنترل‌کننده PID	تناسبی-انتگرالی - مشتق‌گیر	تناسبی-انتگرالی	انتگرالی	روش کنترلی شاخص
زمان نشست	3/026	6/0764	7/2958	18/8638	17/1225
زمان صعود	۰/۲۰۵	۰/۲۸۵	۰/۵۸۲	۱/۱۶۲	۱/۱۵۶
بیشینه فراجهش	0/0011	0/0026	0/0055	0/0092	0/0089
بیشینه فروجهش	0/0091	0/0187	0/0234	0/0830	0/0899
ITAE	0/0193	0/0356	0/2849	0/8105	0/9723

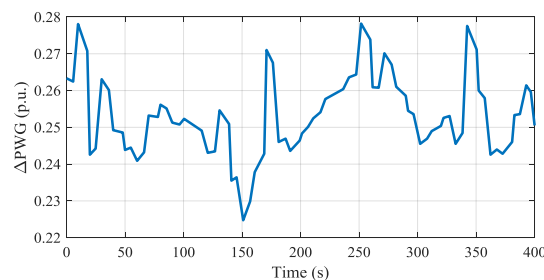
Table (7): Performance indices of  $\Delta P_{tie}$  for the second scenario  
جدول (۷): مقادیر شاخص‌های عملکردی توان انتقالی بین ناحیه‌ای برای سناریو دوم

روش کنترلی شاخص	انتگرالی	تناسبی-انتگرالی	تناسبی-انتگرالی- مشتق‌گیر	PID کننده مرتب‌ه کسری	روش پیشنهادی
زمان نشست	37/9965	36/5616	5983/9	6503/5	3/6719
زمان صعود	۱/۱۶۰	۱/۲۷۵	۰/۷۵۲	۰/۴۷۱	۰/۳۵۰
بیشینه فراجهش	0/0006	0/0004	0/0003	0/0004	0/0001
بیشینه فروجهش	0/0079	0/0075	0/0029	0/0020	0/0015
ITAE	0/3982	0/3158	0/1003	0/0066	0/0043

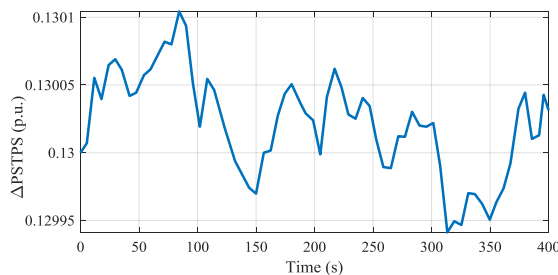
در شکل (۱۱) این تغییر تصادفی در تقاضای بار نشان داده شده و پاسخ دینامیکی انحراف فرکانس و تغییرات توان اتصال نواحی مربوط به این سناریو در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مقادیر شاخص IAE برای حالت تغییر تصادفی در تقاضای بار برای کنترل‌کننده‌های I, PI, PID, FOPID و AWNNFOPID پیشنهادی در جدول (۹) گزارش شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در این سناریو که در شکل (۱۲) و جدول (۹) نمایش داده شده است، کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی با تغییرات تصادفی بار، کاهش قابل توجه در حداکثر نوسانات و بهبود پاسخ گذرای سیستم نسبت به پاسخ‌های کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID داشته است. به عنوان نمونه کنترل‌کننده AWNNFOPID برای پاسخ  $\Delta f_2$  منجر به کاهش ۸۷ درصد، ۸۶ درصد، ۶۵ درصد و ۴۳ درصد شاخص IAE نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I, PI, PID و FOPID شده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای کنترل فرکانس در یک سیستم قدرت ترکیبی که شامل نیروگاه حرارتی با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی GDB و GRC، منابع انرژی تجدیدپذیر مانند توربین بادی، نیروگاه خورشیدی-حرارتی، الکترولایزر، پیل سوختی و خودرو برقی پلاگین است، یک ساختار کنترلی تطبیقی AWNNFOPID پیشنهاد گردیده است. ساختار کنترلی پیشنهادی، ترکیبی از استراتژی‌های کنترل تطبیقی و کنترل‌کننده مرتبه کسری است.



(الف) توان خروجی ژنراتورهای بادی



(ب) توان خروجی سیستم برق خورشیدی-حرارتی

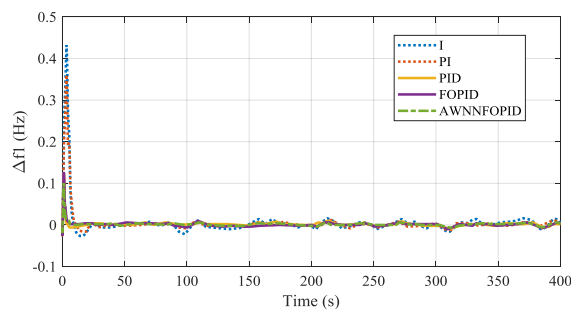
شکل (۸): تغییر تصادفی توان خروجی

Figure (8): Random change of output power of a) wind generators, b) solar thermal power system

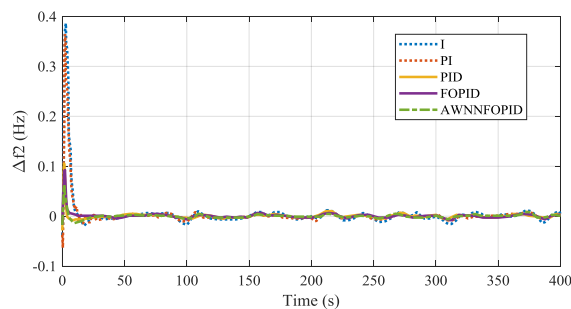


Table (8): Performance index of IAE for the third scenario  
جدول (۸): مقادیر شاخص عملکردی انتگرال قدر مطلق خطا برای سناریو سوم

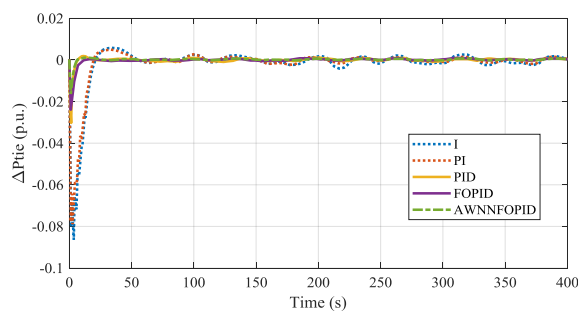
شاخص	روش کنترلی	کنترل کننده PID			روش پیشنهادی
		انتگرالی	تناسبی-انتگرالی	تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر	
الف)	$\Delta f_1$	۴/۴۶۱	۳/۰۸۸	۱/۳۹۱	۱/۰۵۱
	$\Delta f_2$	۳/۹۶۵	۲/۸۹۵	۱/۲۸۲	۱/۰۱۶
	$\Delta P_{tie}$	۱/۴۱۵	۱/۱۳۷	۰/۲۵۵	۰/۱۵۳
ب)	$\Delta f_1$	۱/۲۴۰	۰/۷۵۴	۰/۳۹۳	۰/۲۷۸
	$\Delta f_2$	۰/۹۱۵	۰/۷۰۳	۰/۳۶۵	۰/۲۷۷
	$\Delta P_{tie}$	۰/۳۲۰	۰/۲۹۷	۰/۰۸۶	۰/۰۵۱



الف) تغییرات فرکانس ناحیه اول



ب) تغییرات فرکانس ناحیه دوم



ج) توان انتقالی بین ناحیه‌ای

شکل (۹): پاسخ‌های دینامیکی مربوط به سناریو سوم با تغییرات در توان تولیدی ژنراتورهای بادی

Figure (9): Dynamic responses of the third scenario for changes in wind power generation, a)  $\Delta f_1$ , b)  $\Delta f_2$ , c)  $\Delta P_{tie}$

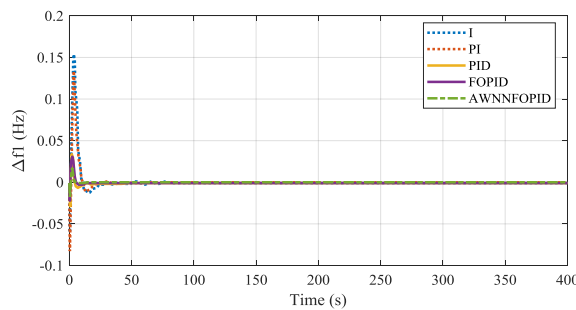
چهار سناریو برای بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی به منظور کنترل فرکانس سیستم قدرت ترکیبی مورد مطالعه تعریف و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از روش کنترلی AWNNFOPID پیشنهادی با چهار کنترل کننده I, PI, PID و FOPID در سایر مراجع مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این چهار سناریو نشان دهنده این موضوع است که کنترل کننده پیشنهادی نسبت به سایر کنترل کننده‌های پیشنهادی برای این سیستم در کمترین زمان ممکن و با کمترین

فراجهش و فروجهش و کمترین شاخص ITAE و IAE توانست منجر به کنترل فرکانس سیستم قدرت ترکیبی مورد مطالعه شود. برای نمونه کنترل‌کننده AWNNFOPID برای شاخص ITAE پاسخ  $\Delta f_1$  به اندازه ۹۸ درصد، ۹۷ درصد، ۹۱ درصد و ۴۰ درصد و برای پاسخ  $\Delta f_2$  به اندازه ۹۸ درصد، ۹۸ درصد، ۹۳ درصد و ۴۶ درصد و برای پاسخ  $\Delta P_{tie}$  به اندازه ۹۸ درصد، ۹۸ درصد، ۹۵ درصد و ۳۵ درصد کاهش نسبت به پاسخ کنترل‌کننده‌های I، PI، PID و FOPID را منجر شده است.

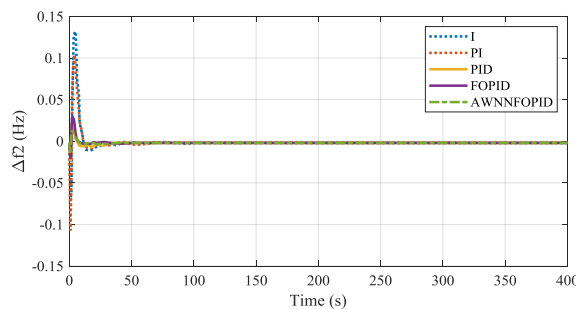
Table (9): Performance index of IAE for the fourth scenario

جدول (۹): مقادیر شاخص عملکردی انتگرال قدر مطلق خطا برای سناریو چهارم

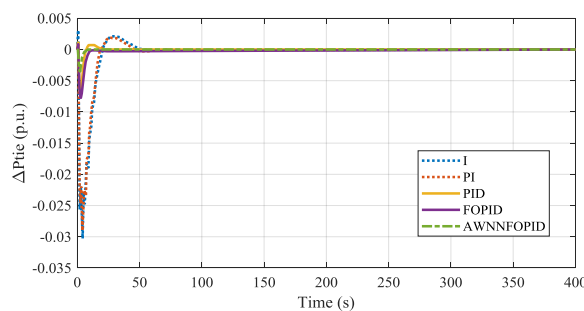
شاخص	روش کنترلی	انتگرالی	تناسبی-انتگرالی	تناسبی-انتگرالی - مشتق‌گیر	کنترل‌کننده PID مرتبه کسری	روش پیشنهادی
$\Delta f_1$		۶/۷۶۷	۶/۱۵۶	۲/۱۹۹	۱/۵۹۶	۰/۹۴۰
$\Delta f_2$		۵/۶۰۶	۵/۲۳۷	۲/۰۴۴	۱/۲۴۷	۰/۷۰۷
$\Delta P_{tie}$		۱/۲۹۷	۱/۱۱۰	۰/۳۲۰	۰/۲۱۶	۰/۱۱۹



(الف) تغییرات فرکانس ناحیه اول

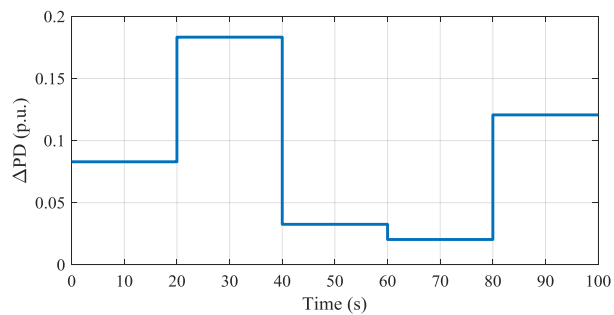


(ب) تغییرات فرکانس ناحیه دوم



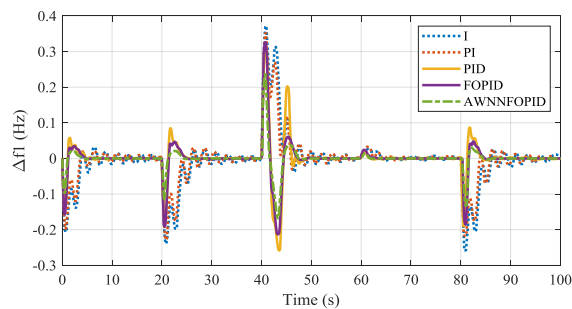
(ج) توان انتقالی بین ناحیه‌ای

شکل (۱۰): پاسخ‌های دینامیکی مربوط به سناریو سوم با تغییرات در توان تولیدی سیستم برق خورشیدی-حرارتی  
Figure (10): Dynamic responses of the third scenario for changes in solar thermal power generation, a)  $\Delta f_1$ , b)  $\Delta f_2$ , c)  $\Delta P_{tie}$

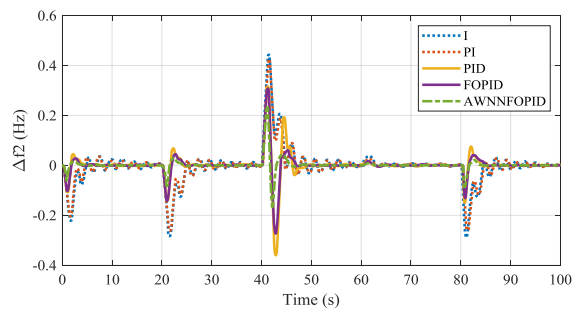


شکل (۱۱): نمودار تغییرات تصادفی بار مربوط به سناریو چهارم

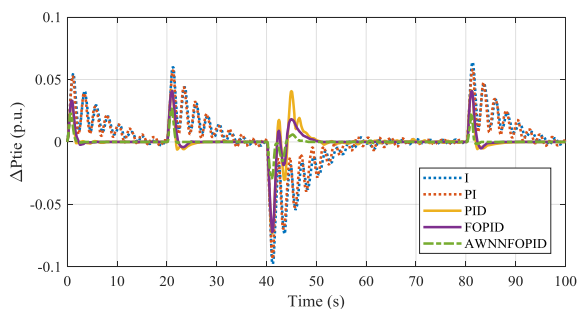
Figure (11): Random load demand changes related to the fourth scenario



(الف) تغییرات فرکانس ناحیه اول



(ب) تغییرات فرکانس ناحیه دوم



(ج) توان انتقالی بین ناحیه‌ای

شکل (۱۲): پاسخ‌های دینامیکی مربوط به سناریو چهارم

Figure (12): Dynamic responses of the fourth scenario, a)  $\Delta f_1$ , b)  $\Delta f_2$ , c)  $\Delta P_{tie}$

## References

### مراجع

- [1] H. Bevrani, A. Ghosh, G. Ledwich, "Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives", IET Renewable Power Generation, vol. 4, no. 5, pp. 438-457, Sept. 2010 (doi: 10.1049/iet-rpg.2009.0049).
- [2] C.S. Karavas, G. Kyriakarakos, K.G. Arvanitis, G. Papadakis, "A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration

- microgrids", *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 166-179, Oct. 2015 (doi: 10.1016/j.enconman.2015.06.021).
- [3] L.C. Saikia, J. Nanda, S. Mishra, "Performance comparison of several classical controllers in AGC for multi-area interconnected thermal system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 394-401, March 2011 (doi: 10.1016/j.ijepes.2010.08.036).
- [4] A. Yazdizadeh, M.H. Ramezani, E. Hamedrahmat, "Decentralized load frequency control using a new robust optimal MISO PID controller", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 57-65, Feb. 2012 (doi: 10.1016/j.ijepes.2011.09.007).
- [5] Y.V. Hote, S. Jain, "PID controller design for load frequency control: Past, Present and future challenges", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 604-609, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.162).
- [6] J. Sharma, Y.V. Hote, R. Prasad, "PID controller design for interval load frequency control system with communication time delay", *Control Engineering Practice*, vol. 89, pp. 154-168, Aug. 2019 (doi: 10.1016/j.conengprac.2019.05.016).
- [7] A. Rai, D.K. Das, "Optimal PID controller design by enhanced class topper optimization algorithm for load frequency control of interconnected power systems", *Smart Science*, vol. 8, no. 3, pp. 125-151, July 2020 (doi: 10.1080/23080477.2020.1805540).
- [8] V. Veerasamy, N.I.A. Wahab, R. Ramachandran, A. Vinayagam, M.L. Othman, H. Hizam, J. Satheeshkumar, "Automatic load frequency control of a multi-area dynamic interconnected power system using a hybrid PSO-GSA-tuned PID controller", *Sustainability*, vol. 11, no. 24, Article Number: 6908, Dec. 2019 (doi: 10.3390/su11246908).
- [9] R. Alayi, F. Zishan, S. R. Seydnouri, R. Kumar, M. H. Ahmadi, M. Sharifpur, "Optimal load frequency control of island microgrids via a PID controller in the presence of wind turbine and PV", *Sustainability*, vol. 13, no. 19, pp. 10728, Sept. 2021 (doi: 10.3390/su131910728).
- [10] D. Guha, P. K. Roy, S. Banerjee, "Quasi-oppositional JAYA optimized 2-degree-of-freedom PID controller for load-frequency control of interconnected power systems", *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 42, no. 1, pp. 63-85, Jan. 2022 (doi: 10.1080/02286203.2020.1829444).
- [11] I. Podlubny, "Fractional-order systems and PI<sup>λ</sup>/spl lambda/D<sup>μ</sup>/spl mu-controllers", *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 44, no. 1, pp. 208-214, Jan. 1999 (doi: 10.1109/9.739144).
- [12] S. Kumar, M. N. Anwar, "Fractional order PID controller design for load frequency control in parallel control structure", *Proceeding of the IEEE/UPEC*, pp. 1-6, Bucharest, Romania, Sept. 2019 (doi: 10.1109/UPEC.2019.8893500).
- [13] A. Kumar, S. Suhag, "Whale optimisation algorithm tuned fractional order PI $\lambda$ D $\mu$  controller for load frequency control of multi-source power system", *International Journal of Bio-Inspired Computation*, vol. 13, no. 4, pp. 209-221, June 2019 (doi: 10.1504/IJBIC.2019.100153).
- [14] A.X. R. Irudayaraj, N.I.A. Wahab, M.G. Umamaheswari, M.A.M. Radzi, N.B. Sulaiman, V. Veerasamy, S.C. Prasanna, R. Ramachandran, "A Matignon's theorem based stability analysis of hybrid power system for automatic load frequency control using atom search optimized FOPID controller", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 168751-168772, Sept. 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3021212).
- [15] S. Pahadasingh, C. Jena, C. K. Panigrahi, "Load frequency control incorporating electric vehicles using FOPID controller with HVDC link", *Proceeding of the EPECCT*, pp. 181-203, Singapore, Feb. 2020 (doi: 10.1007/978-981-15-2305-2\_15).
- [16] A. Latif, S.S. Hussain, D.C. Das, T.S. Ustun, A. Iqbal, "A review on fractional order (FO) controllers' optimization for load frequency stabilization in power networks", *Energy Reports*, vol. 7, pp. 4009-4021, Nov. 2021 (doi: 10.1016/j.egy.2021.06.088).
- [17] S. Asgari, A. A. Suratgar, M. Kazemi, "Feedforward fractional order PID load frequency control of microgrid using harmony search algorithm", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, vol. 45, no. 4, pp. 1369-1381, Dec. 2021 (doi: 10.1007/s40998-021-00428-7).
- [18] A. Fathy, A. G. Alharbi, "Recent approach based movable damped wave algorithm for designing fractional-order PID load frequency control installed in multi-interconnected plants with renewable energy", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71072-71089, May 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078825).
- [19] N. Kumar, M. A. Alotaibi, A. Singh, H. Malik, M. E. Nassar, "Application of Fractional Order-PID Control Scheme in Automatic Generation Control of a Deregulated Power System in the Presence of SMES Unit", *Mathematics*, vol. 10, no. 3, pp. 521, Feb. 2022 (doi: 10.3390/math10030521).
- [20] A. Fathy, D. Youstri, H. Rezk, S. B. Thanikanti, H. M. Hasaniien, "A Robust Fractional-Order PID Controller Based Load Frequency Control Using Modified Hunger Games Search Optimizer", *Energies*, vol. 15, no. 1, pp. 361, Jan. 2022 (doi: 10.3390/en15010361).
- [21] M. K. Sarkar, A. Dev, P. Asthana, D. Narzary, "Chattering free robust adaptive integral higher order sliding mode control for load frequency problems in multi-area power systems", *IET Control Theory and Applications*, vol. 12, no. 9, pp. 1216-1227, June 2018 (doi: 10.1049/iet-cta.2017.0735).

- [22] J. Guo, "Application of full order sliding mode control based on different areas power system with load frequency control", *ISA transactions*, vol. 92, pp. 23-34, Sept. 2019 (doi: 10.1016/j.isatra.2019.01.036).
- [23] S. Prasad, S. Purwar, N. Kishor, "Load frequency regulation using observer based non-linear sliding mode control", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 178-193, Jan. 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.06.035).
- [24] L. Esteki, A. A. Zamani, S. M. Kargar, S. Mousavi, "Automatic generation control of multi-area power system using a fuzzy wavelet neural network load frequency controller combined with shuffled frog leaping algorithm", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 55-63, May 2013.
- [25] R. Shahedi, K. Sabahi, M. Tavan, A. Hajizadeh "Self-tuning fuzzy PID controller for load frequency control in ac micro-grid with considering of input delay", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 35, pp. 19-26, Dec. 2019 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1397.9.35.3.6).
- [26] A. Abazari, H. Monsef, B. Wu, "Load frequency control by de-loaded wind farm using the optimal fuzzy-based PID droop controller", *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 1, pp. 180-190, Jan. 2019 (doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5392).
- [27] S.A. Seyed-Beheshti-Fini, S.M. Mohammad Shariatmadar, V. Amir, "Frequency control in multi-carrier microgrids with the presence of electric vehicles based on adaptive neuro fuzzy inference system controller", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 55, pp. 27-42, Dec. 2023 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1402.14.55.3.1).
- [28] P. Ojaghi, M. Rahmani, "LMI-based robust predictive load frequency control for power systems with communication delays", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 4091-4100, Jan. 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2654453).
- [29] L. Xiong, H. Li, J. Wang, "LMI based robust load frequency control for time delayed power system via delay margin estimation", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 100, pp. 91-103, Sept. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.02.027).
- [30] F.K. Abo-Elyousr, A.Y. Abdelaziz, "A novel modified robust load frequency control for mass-less inertia photovoltaics penetrations via hybrid PSO-Woa Approach", *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 19-20, pp. 1744-1758, Dec. 2019 (doi: 10.1080/15325008.2020.1731867).
- [31] K. Lu, W. Zhou, G. Zeng, Y. Zheng, "Constrained population extremal optimization-based robust load frequency control of multi-area interconnected power system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105, pp. 249-271, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.043).
- [32] J. Yang, X. Sun, K. Liao, Z. He, L. Cai, "Model predictive control- based load frequency control for power systems with wind- turbine generators", *IET renewable power generation*, vol. 13, no. 15, pp. 2871-2879, Nov. 2019 (doi: 10.1049/iet-rpg.2018.6179).
- [33] H. Grover, J. Ojha, A. Verma, T. S. Bhatti, "Adaptive load frequency control of a grid connected solar PV system", *Proceeding of the IEEE IC/ICPS*, pp. 1-4, Genova, Italy, June 2019 (doi: 10.1109/IEEEIC.2019.8783408).
- [34] S. Kayalvizhi, D.V. Kumar, "Load frequency control of an isolated micro grid using fuzzy adaptive model predictive control", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16241-16251, Aug. 2017 (doi: 10.1109/ACCESS.2017.2735545).
- [35] Y. Liu, Y. Chen, M. Li, "Dynamic event-based model predictive load frequency control for power systems under cyber attacks", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 12, no. 1, pp. 715-725, Jan. 2021 (doi: 10.1109/TSG.2020.3022094).
- [36] R. Ramachandran, B. Madasamy, V. Veerasamy, L. Saravanan, "Load frequency control of a dynamic interconnected power system using generalised Hopfield neural network based self-adaptive PID controller", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 21, pp. 5713-5722, Nov. 2018 (doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5622).
- [37] V. Veerasamy, N.I.A. Wahab, R. Ramachandran, A. Vinayagam, M.L. Othman, H. Hizam, J. Satheeshkumar, "Automatic load frequency control of a multi-area dynamic interconnected power system using a hybrid PSO-GSA-tuned PID controller", *Sustainability*, vol. 11, no. 24, pp. 6908, Dec. 2019 (doi: 10.3390/su11246908).
- [38] D. Kler, V. Kumar, K.P. Rana, "Optimal integral minus proportional derivative controller design by evolutionary algorithm for thermal-renewable energy-hybrid power systems", *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 11, pp. 2000-2012, Aug. 2019 (doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5745).
- [39] J. Pahasa, I. Ngamroo, "Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid", *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 97-105, Apr. 2014 (doi: 10.1109/JSYST.2014.2313810).
- [40] R. Kumar, N. Sinha, "Modeling and control of dish-Stirling solar thermal integrated with PMDC generator optimized by meta-heuristic approach", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26343-26355, Jan. 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970613).

- [41] S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, "Robust LFC in a smart grid with wind power penetration by coordinated V2G control and frequency controller", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 5, no. 1, pp. 371-380, Jan. 2014 (doi: 10.1109/TSG.2013.2264921).
- [42] T. Masuta, A. Yokoyama, "Supplementary load frequency control by use of a number of both electric vehicles and heat pump water heaters", IEEE Trans. on smart grid, vol. 3, no. 3, pp. 1253-1262, May 2012 (doi: 10.1109/TSG.2012.2194746).

---

#### زیر نویس‌ها

1. Load frequency control
2. Proportional integral derivative
3. Enhanced class topper optimization algorithm
4. High voltage direct current
5. Gravitation search algorithm and particle swarm optimization
6. Governor dead band
7. Craziiness-based particle swarm optimization
8. Particle swarm optimization
9. Quasi-oppositional-based JAYA
10. Teaching-learning-based optimization
11. Fractional order proportional integral derivative
12. Whale optimization algorithm
13. Atom search optimization
14. Hybrid power system
15. Renewable energy
16. Plug-in electric vehicle
17. Hybrid particle swarm with differential evolution operator
18. Mutated harmony search algorithm
19. Integral time absolute error
20. Photo voltaic
21. Wind turbine
22. Movable damped wave algorithm
23. Superconductive magnetic energy storage
24. Big bang big crunch
25. Modified hunger games search
26. Marine predators algorithm
27. Artificial ecosystem based optimization
28. Equilibrium optimizer
29. Runge–Kutta based optimizer
30. Self recurrent wavelet neural network
31. Adaptive wavelet neural network fractional order PID
32. Generator rate constraints
33. Integral absolute error
34. Renewable energy systems
35. Area control error

## ضمیمه

## جدول تعریف متغیرها

کاهش انرژی به خاطر قطع اتصال خودرو الکتریکی، توان محلی مرکزی	$E_{\text{plug-out}}, P_{\text{LFC}}$	ثابت بهره و ثابت زمانی توربین بادی	$K_{\text{WT}}, T_{\text{WT}}$
انرژی سیگنال کنترل بار فرکانس، تعداد ورودی در لایه ورودی شبکه عصبی موجک	$E_{\text{LFC}}, N_i$	ثابت بهره و ثابت زمانی کلکتور خورشیدی	$K_s, T_s$
تعداد گره در لایه حاصل ضرب شبکه، تابع موجک مادر	$N_w, \phi$	ثابت بهره و ثابت زمانی توربین بخار خورشیدی حرارتی	$K_T, T_T$
فاکتور انتقال و انبساط برای زمین ورودی i امین موجک	$t_{ij}, d_{ij}$	ثابت بهره و ثابت زمانی پیل سوختی	$K_{\text{FC}}, T_{\text{FC}}$
وزن حلقه فیدبک داخلی و ورودی زام برای موجک نام	$\theta_{ij}, u_{ij}$	ثابت بهره و ثابت زمانی الکترولایزر	$K_{\text{AE}}, T_{\text{AE}}$
خروجی‌های لایه ضرب کننده و وزن‌های اتصال دهنده گره‌های ضرب کننده و گره خروجی	$\psi, w$	ضرایب سنکرون سازی	$T_{21}, T_{12}$
خطای کنترل ناحیه، تابع هزینه آموزش شبکه	$\text{ACE}, J$	ثابت بهره و ثابت زمانی بلوک سیستم قدرت	$K_{\text{psi}}, T_{\text{psi}}$
خطای آموزش شبکه، بردار وزن‌های شبکه	$e^r, W$	ثابت بهره و ثابت زمانی بازگرمایش	$K_{ri}, T_{ri}$
نرخ‌های یادگیری پارامتر $w$ و $\theta$ شبکه	$\eta^w, \eta^\theta$	ثابت زمانی گاورنر و توربین بخار	$T_{Gi}, T_{Ti}$
نرخ‌های یادگیری پارامتر $d$ و $t$ شبکه	$\eta^d, \eta^t$	ضریب بایاس فرکانسی، ضریب تنظیم سرعت گاورنر	$B_i, R_i$
بردار نرخ یادگیری، خروجی کنترل کننده مرتبه کسری	$\eta, u_c$	تغییر در اغتشاش بار پله، اینرسی سیستم	$D_i, H_i$
بهره تناسبی و انتگرال گیر کنترل کننده مرتبه کسری	$K_p^r, K_i^r$	نسبت ظرفیت ناحیه، ثابت اشتراک انرژی تجدیدپذیر	$a_{12}, K_n$
بهره مشتق گیر و مرتبه انتگرال گیر کنترل کننده مرتبه کسری	$K_D^r, \lambda$	ثابت زمانی و ظرفیت باتری خودرو الکتریکی	$T, B_{\text{kw}}$
مرتبه مشتق گیر و تابع هزینه طراحی کنترل کننده مرتبه کسری	$\mu, J_c$	انرژی فعلی باتری و تعداد قابل کنترل خودرو الکتریکی	$E, N_{\text{control}}$
بردار پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری و بردار نرخ‌های یادگیری مرتبط با آن	$W_c, \eta_c$	تعداد خودروهای برقی در حال حرکت از حالت شارژ به حالت قابل کنترل و تعداد خودروهای برقی در حال حرکت از حالت کنترل به حالت رانندگی	$N_{\text{control-in}}, N_{\text{plug-out}}$
بردار نرخ‌های یادگیری مرتبط با پارامترهای $K_p^r$ و $K_i^r$	$\eta^{K_p^r}, \eta^{K_i^r}$	انرژی اولیه و افزایش انرژی به خاطر افزایش تعداد خودرو الکتریکی متصل به شبکه	$E_{\text{initial}}, E_{\text{control-in}}$
بردار نرخ‌های یادگیری مرتبط با پارامترهای $K_D^r$ و $\lambda$	$\eta^{K_D^r}, \eta^{\lambda^r}$	توان خودرو الکتریکی و مولد بادی	$P_{\text{PEV}}, P_{\text{Wind}}$
بردار نرخ‌های یادگیری مرتبط با پارامترهای $\mu$ ، شاخص انتگرال قدر مطلق پاسخ	$\eta^{\mu^r}, J_{\text{IAE}}$	توان خورشیدی و حرارتی	$P_{\text{Solar}}, P_{\text{Thermal}}$
زمان شبیه‌سازی، شاخص انتگرال حاصل ضرب زمان در قدر مطلق پاسخ	$T_{\text{sim}}, J_{\text{ITAE}}$	توان الکترولایزر و پیل سوختی	$P_{\text{AE}}, P_{\text{FC}}$