Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 2 – Summer 2024
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Analysis and Simulation of Dynamic Behavior of Load Frequency Control for a Thermal–Hydro Power System with Photovoltaic System

Mohammadreza Moradian[1,2], *Assistant Professor*, Majid Moazzami[1,2], *Associate Professor*, Ghazanfar Shahgholian[*1,2], *Professor*

[1]Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
[2]Smart Microgrid Research Centre, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
moradian@iaun.ac.ir, m_moazzami@pel.iaun.ac.ir, shahgholian@iaun.ac.ir

Abstract
Stability and reliability have become very important due to the integration of renewable energy sources and the dynamic nature of load demand in power systems. Frequency stability is an important indicator of power quality in electrical power systems. Load frequency control by maintaining the system frequency at the nominal value plays an important role in the efficient operation and ensuring the stability of the power system. Any sudden disturbance in the load can cause changes in the power exchange in the transmission line between regions, and create frequency fluctuations in the power system. The purpose of this research is to analyze and simulate the dynamic behavior of load frequency control in a single-zone power system consisting of two energy sources: a thermal turbine equipped with a preheater and a hydro turbine equipped with a transient drop compensator. The effect of the photovoltaic system on frequency deviation changes in the power system has also been investigated. The first-order equations of the power system are expressed in state space and the modes of the system have been determined. The simulation results using Simulink/MATLAB software and model analysis using eigenvalue analysis of the system matrix show the dynamic behavior of the power system for changes in the consumed load.

Keywords: dynamic behavior, hydro turbine, load frequency control, photovoltaic system, steam turbine

Received: 12 Jun. 2024
Revised: 30 July 2024
Accepted: 28 Aug. 2024

***Corresponding Author:** Dr. Ghazanfar Shahgholian

Citation: M. Moradian, M. Moazzami, Gh. Shahgholian, “Analysis and Simulation of Dynamic Behavior of Load Frequency Control for a Thermal–Hydro Power System with Photovoltaic System”, Journal of Novel Reseraches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 2, pp. 35-47, September 2024 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

مقاله پژوهشی

تحلیل و شبیه‌سازی رفتار دینامیکی کنترل فرکانس بار برای سیستم قدرت حرارتی-آبی با سیستم فتوولتائیک

محمدرضا مرادیان[۱،۲]، استادیار، مجید معظمی[۱،۲]، دانشیار، غضنفر شاهقلیان*[۱،۲]، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
moradian@iaun.ac.ir, m_moazzami@pel.iaun.ac.ir, shahgholian@iaun.ac.ir

چکیده: پایداری و قابلیت اطمینان با توجه به ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و ماهیت دینامیکی تقاضای بار در سیستم‌های قدرت اهمیت زیادی پیدا کرده است. پایداری فرکانس یک شاخص مهم کیفیت توان در سیستم‌های قدرت الکتریکی است. کنترل فرکانس بار با حفظ فرکانس سیستم در مقدار نامی نقش مهمی در عملکرد کارآمد و تضمین پایداری سیستم قدرت دارد. هرگونه اغتشاش ناگهانی در بار مصرفی می‌تواند باعث تغییرات در تبادل توان در خط انتقال بین ناحیه‌ها و ایجاد نوسانات فرکانس در سیستم قدرت شود. هدف از این تحقیق تحلیل و شبیه‌سازی رفتار دینامیکی کنترل بار فرکانس در سیستم قدرت تک ناحیه‌ای است که از دو منبع انرژی توربین حرارتی مجهز به پیش-گرمکن و توربین آبی مجهز به جبران‌ساز گذرای افتی تشکیل شده است. همچنین تأثیر سیستم فتوولتائیک بر تغییرات انحراف فرکانس در سیستم قدرت بررسی شده است. معادلات مرتبه اول سیستم قدرت در فضای حالت بیان شده و مُدهای سیستم تعیین شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک/متلب و تحلیل مدل با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه ماتریس سیستم، رفتار دینامیکی سیستم قدرت به ازای تغییرات در بار مصرفی نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: توربین آبی، توربین بخار، رفتار دینامیکی، سیستم فتوولتائیک، کنترل فرکانس بار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۷

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر غضنفر شاهقلیان
نشانی نویسنده مسئول: نجف‌آباد، بلوار دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و انرژی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

۱- مقدمه

افزایش مستمر تقاضای بار و محدود شدن سوخت‌های فسیلی[۱] به دلیل شرایط طبیعی همراه با گسترش مراکز صنعتی و اثرات جانبی منفی قابل توجه بر محیط زیست باعث تغییرات زیادی در سیستم قدرت الکتریکی شده است [۱،۲]. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر[۲] مانند سیستم فتوولتائیک[۳] [۳،۴] و توربین بادی[۴] [۵،۶] برای ترویج استفاده از انرژی پاک و حداقل کردن اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای[۵] مخصوصاً در ساعت اوج مصرف و به منظور کاهش هزینه‌ها بسیار مهم است. نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر که با توجه به شرایط آب و هوا دارای ماهیت تصادفی هستند باعث ایجاد چالش‌هایی در زمینه ناپایداری ولتاژ و پایداری فرکانس شده‌اند [۷،۸].

پایداری و قابلیت اطمینان شبکه در تامین برق پایدار و با کیفیت نقش مهمی دارند [۹،۱۰]. کنترل فرکانس بار برای عملکرد کارآمد و پایداری سیستم قدرت با توجه به نوسانات در بار مصرفی ضروری است [۱۱،۱۲]. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه ادغام سیستم فتوولتائیک به شبکه برای بهبود عملکرد سیستم قدرت و کنترل فرکانس بار ارائه شده است. بررسی کنترل فرکانس بار سیستم قدرت با منابع مختلف نیرو شامل نیروگاه های حرارتی، آبی و گازی در [۱۳] ارائه شده که در آن پارامترهای کنترل‌کننده، برای عملکرد گذرا بهینه سیستم با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی فراابتکاری تعیین شده‌اند. یک مدل بهینه کنترل پیش‌بین با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سوتی ترنز[۶] در [۱۴] برای طراحی کنترل فرکانس بار نصب شده در سیستم قدرت به هم پیوسته شامل منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است. تغییرات مختلفی مانند سرعت باد تصادفی و اغتشاش بار همراه با عدم قطعیت‌های پارامترهای سیستم در نظر گرفته شده و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. پایداری سیگنال کوچک در یک سیستم قدرت یکپارچه در [۱۵] با استفاده از یک مدل ریاضی که اثر باد و انرژی فتوولتائیک را در سیستم قدرت در نظر می‌گیرد، تحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در سیستم قدرت یکپارچه با انرژی باد و فتوولتائیک می‌توان فرکانس سیستم را در کمترین زمان به فرکانس اسمی برگرداند و در عین حال قدرت هر واحد را افزایش داد. بهبود کنترل فرکانس در یک سیستم قدرت با استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک با روش کنترل افت در [۱۶] مطالعه شده است. برای بازیابی ذخیره توان فتوولتائیک قبل از واکنش کنترل فرکانس ثانویه یک روش کنترل به منظور فعال کردن بازیابی سریع ذخیر توان فتوولتائیک پیشنهاد شده است که اثر بخشی آن بر روی یک مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای چند ماشینی نشان داده شده است. یک راهبرد تخصیص بهینه توان ذخیره انرژی هیبریدی تطبیقی به منظور از بین بردن نوسانات توان متصل به شبکه تحت شرایط عملیاتی مختلف و بهبود قابلیت اطمینان در [۱۷] ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که راهبرد بهینه توان خروجی ذخیره‌سازی انرژی ترکیبی دارای ارزش عملی مهندسی خاصی برای از بین بردن نوسانات توان متصل به شبکه است.

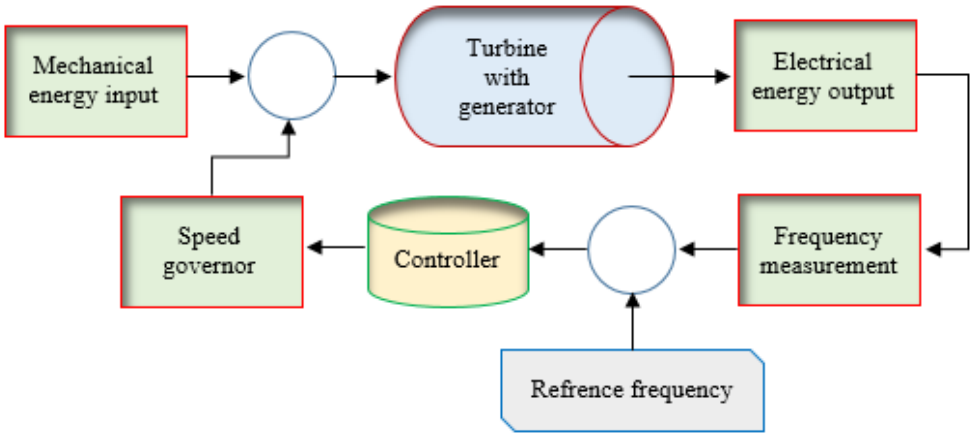
در این مقاله کنترل بار فرکانس در یک سیستم قدرت تک-ناحیه‌ای متشکل از دو منبع انرژی حرارتی و آبی مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن اثر سیستم فتوولتائیک بر رفتار دینامیکی سیستم در نظر گرفته شده است. مدل توربین بخار با پیش-گرمکن و توربین آبی با جبران‌ساز گذرای افتی با استفاده از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول در فضای حالت بیان شده‌اند. مدل سیستم در نرم‌افزار سیمولینک/متلب پیاده‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مُدهای سیستم تحلیل شده‌اند. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در قسمت دوم اهمیت کنترل فرکانس بار در سیستم قدرت بیان شده است. در قسمت سوم تابع انتقال نمایش دهنده سیستم فتوولتائیک آمده است. در قسمت چهارم روابط سیستم قدرت مورد مطالعه در فضای حالت بیان شده است. در قسمت پنجم نتایج شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم قدرت را به ازای تغییرات بار مصرفی و شرایط مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهند و در انتها نتیجه‌گیری در قسمت ششم بیان شده است.

۲- کنترل فرکانس بار در سیستم قدرت

در اثر تغییر نقطه عملکرد یک سیستم الکتریکی در طول زمان ممکن است انحراف فرکانس و تغییر در تبادلات توان برنامه-ریزی شده[۷] با مناطق دیگر رخ دهد که تاثیر منفی بر عملکرد سیستم قدرت دارد. کنترل فرکانس در حین بهره‌برداری در یک سیستم قدرت متصل به هم باید مورد توجه قرار گیرد که هدف آن پایداری فرکانس و توان انتقالی بین ناحیه‌ها در مقادیر نامی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

اسمی مشخص شده پس از ایجاد اختلال در بار مصرفی است. با حداقل کردن نوسانات توان در خطوط اتصال باعث ایجاد تعادل بین تولید نیروگاه‌ها و بارهای مصرفی خواهد شد که به پایداری سیستم قدرت کمک خواهد کرد. تقسیم بار بین ناحیه‌ها و جبران کمبود تولید در هر منطقه توسط ناحیه‌های دیگر از اهداف اتصال بین سیستم‌های قدرت است [۱۸،۱۹]. عملکرد اساسی سیستم کنترل فرکانس بار در یک واحد تولید در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود حلقه-های کنترل اولیه و تکمیلی سیگنال تغییرات فرکانس را به گاورنر سرعت تشکیل می‌دهند. نیروهای مکانیکی لازم به منظور قرار گرفتن شیر اصلی در برابر فشار بخار فراهم می‌شود و کنترل‌کننده یک تنظیم خروجی توان حالت پایدار برای توربین فراهم خواهد کرد [۲۰،۲۱].



شکل (۱): تعادل گشتاورهای مکانیکی و الکتریکی در یک واحد تولیدی

Figure (1): Balance of mechanical and electrical torques in a production unit

۳- مدل سیستم فتوولتائیک

انرژی خورشیدی یکی از منابع مهم انرژی تجدیدپذیر و یک منبع اقتصادی محسوب می‌شود. سیستم انرژی خورشیدی جریان مستقیم تولید می‌کند. سیستم‌های فتوولتائیک نسبت به فناوری‌های متداول تولید برق دارای مزایای متعددی هستند. از مزایای آنها می‌توان به طراحی سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی بر اساس نیازهای عملیاتی، نیاز به حداقل تعمیر و نگهداری در صورت نصب صحیح سیستم، عمر طولانی به علت قابلیت اطمینان و مستقل بودن انرژی، تولید برق پایدار به علت متکی بودن به یک منبع انرژی طبیعی بدون ایجاد آلودگی و آسان بودن گسترش و حمل و نقل اشاره کرد. همچینن برق تولیدی به وسیله سیستم فتوولتائیک خورشیدی برای تامین گرما در ترکیب با یک دیگ بخار الکتریکی نیز می‌تواند استفاده شود. از معایب آن بالا بودن هزینه‌های نصب پنل خورشیدی است که در طولانی مدت جبران خواهد شد [۲۲،۲۳].

راندمان تبدیل پنل فتوولتائیک بسیار پایین است و با استفاده از الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان، راندمان ردیابی سیستم فتوولتائیک بهبود پیدا می‌کند و ولتاژ بار مستقل از تابش و دما به طور پایدار می‌توان حفظ کرد [۲۴،۲۵]. خروجی جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک که توسط سلول‌های خورشیدی تولید شده با کمک اینورتر به جریان متناوب تبدیل می‌شود. سیستم برق فتوولتائیک از مدل ترکیبی پنل‌های فتوولتائیک (صفحات خورشیدی)، مبدل تقویت کننده DC/DC، الگوریتم ردیابی حداکثر توان و اینورتر با فیلتر است [۲۶،۲۷]. مدل تابع انتقال سیستم فتوولتائیک با در نظر گرفتن یک صفر z_1 و دو قطب p_1 و p_2 در تابع انتقال به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۸،۲۹]:

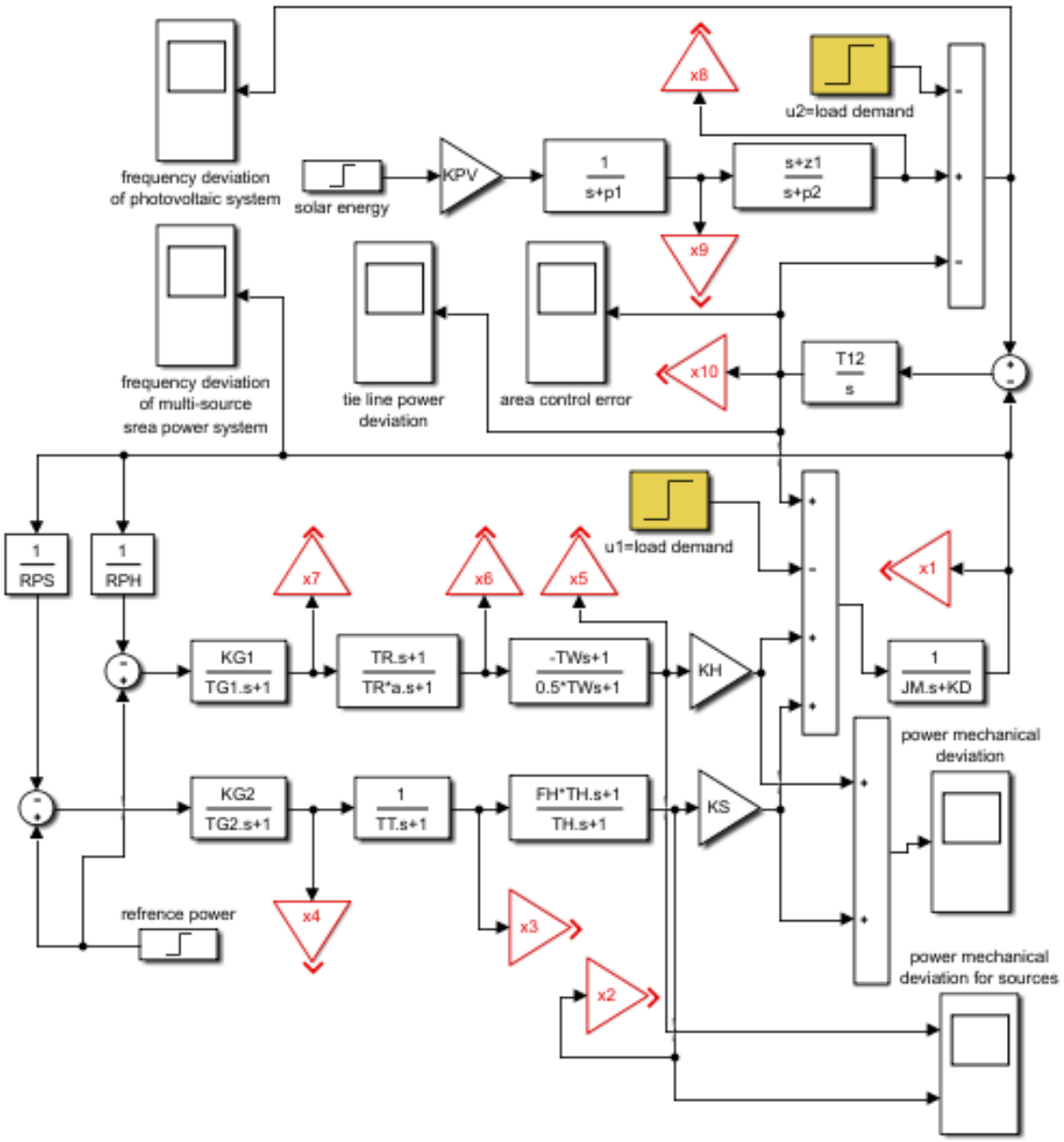
$$G_{PV}(s) = K_{PV}\frac{s+z_1}{(s+p_1)(s+p_2)} \qquad (۱)$$

که در آن K_P بهره سیستم فتوولتائیک است. همچنین قطب‌ها و صفر حقیقی در نظر گرفته می‌شوند [۳۰].

۴- مدل سیستم مورد مطالعه

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

شکل (۲) مدل سیستم قدرت را در محیط سیمولینک/متلب نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات فرکانس سیستم به عنوان متغیر حالت x_1 انتخاب شده است. سه متغیره حالت x_2، x_3 و x_4 برای نمایش توربین حرارتی مجهز به گرمایش‌مجدد[۸] و سه متغیر حالت x_5، x_6 و x_7 برای نمایش توربین آبی مجهز به جبران‌ساز گذرای افتی[۹] استفاده شده است. متغیرهای حالت x_8 و x_9 نشان دهنده رفتار سیستم فتوولتائیک و متغیر x_{10} نشان دهنده توان انتقالی بین دو ناحیه هستند [۳۱،۳۲]. ثابت‌های K_H و K_S به ترتیب مقدار مشارکت توربین آبی و توربین حرارتی را در تامین توان مکانیکی نشان می‌دهند [۳۳].



شکل (۲): بلوک دیاگرام سیستم قدرت مورد مطالعه در نرم‌افزار سیمولینک/متلب

Figure (2): Block diagram of the power system studied in Simulink/MATLAB software

الف- اینرسی روتور و بار: معادله دیفرانسیل مرتبه اول نشان دهنده مدل معادل اینرسی روتور و بار با توجه به تغییرات فرکانس سیستم و توان مکانیکی خروجی توربین‌ها به صورت بیان می‌شود:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

$$\frac{d}{dt}x_1 = -\frac{K_D}{J_M}x_1 + \frac{K_S}{J_M}x_2 + \frac{K_H}{J_M}x_5 - \frac{1}{J_M}u_1 \quad (۲)$$

که در آن J_M ممان اینرسی سیستم و K_D ثابت میرایی است. همچنین میزان مشارکت واحد حرارتی و واحد آبی در کنترل فرکانس بار به ترتیب با ضرایب K_S و K_H در نظر گرفته می‌شود. سهم واحدها در بار اسمی توسط این ضرایب تعیین می‌شود و در یک منطقه کنترل خاص، مجموع عوامل مشارکت برابر یک است [۳۴،۳۵]. تغییرات بار ورودی در این ناحیه با u_1 نشان داده شده است.

ب- توربین بخار: توربین بخار یک موتور حرارتی است که انرژی حرارتی را از بخار تحت فشار استخراج می‌کند و برای انجام کارهای مکانیکی روی شفت خروجی چرخان استفاده می‌نماید. توربین‌های بخار برای تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی استفاده می‌شود [۳۶،۳۷]. برخلاف توربین‌های گاز، توربین‌های بخار دارای کمپرسور هوا یا سیستم احتراق نیستند و دارای یک دیگ بخار هستند [۳۸،۳۹]. معادلات دیفرانسیل مرتبه اول نمایش دهنده توربین بخار عبارتند از [۴۰]:

$$\frac{d}{dt}x_2 = -\frac{1}{T_H}x_2 + \frac{1}{T_H}x_3 + F_H\frac{d}{dt}x_3 = -\frac{1}{T_H}x_2 + (\frac{1}{T_H} - \frac{F_H}{T_T})x_3 + \frac{F_H}{T_T}x_4 \quad (۳)$$

$$\frac{d}{dt}x_3 = -\frac{1}{T_T}x_3 + \frac{1}{T_T}x_4 \quad (۴)$$

$$\frac{d}{dt}x_4 = -\frac{K_{G2}}{T_{G2}R_{PS}}x_1 - \frac{1}{T_{G2}}x_4 + \frac{K_{G2}}{T_{G2}}u_3 \quad (۵)$$

که در آن T_G ثابت زمانی گاورنر، K_G بهره ماندگار گاورنر، F_H ضریب فشارقوی، T_H ثابت زمانی پیش‌گرمکن، R_P ثابت افت سرعت و T_T ثابت زمانی توربین است [۴۱]. ورودی u_3 نقطه تنظیم است که توسط کنترل‌کننده تعیین خواهد شد.

ج- توربین آبی: در میان انواع مختلف انرژی پاک، نیروگاه آبی دارای مزایای مختلفی است که کاربرد آن را منحصر به فرد و کلیدی برای بهره‌برداری اقتصادی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌کند [۴۲]. انرژی آبی همچنان بخشی حیاتی از انرژی و سیستم‌های برق آینده در سراسر جهان است. نیروگاه آبی دارای راندمان نسبتاً بالایی است و انرژی آبی نسبتاً انعطاف‌پذیر است. در مقایسه با واحدهای با ظرفیت بالا برای انرژی حرارتی و انرژی هسته‌ای، واحدهای برق آبی به زمان کمتری برای راه-اندازی و تغییر بار نیاز دارند و می توانند به سرعت به تنظیم شبکه برق پاسخ دهند. همچنین امکان ترکیب نیروگاه آبی با انرژی‌های تجدیدپذیر متناوب، مانند فتوولتائیک وجود دارد و تأثیر مثبتی بر پایداری شبکه برق دارد [۴۳،۴۴]. با توجه به متغیرهای حالت انتخاب شده برای نمایش توربین آبی، معادلات مربوط به توربین، گاورنر و جبران‌ساز گذرای افتی عبارتند از [۴۵]:

$$\frac{d}{dt}x_5 = \frac{-2}{T_W}x_5 + \frac{2}{T_W}x_6 - 2\frac{d}{dt}x_6 = \frac{2K_{G1}}{\alpha R_{PH}T_{G1}}x_1 - \frac{2}{T_W}x_5 + (\frac{2}{T_W} + \frac{2}{\alpha T_R})x_6 - (\frac{2}{\alpha T_R} - \frac{2}{\alpha T_{G1}})x_7 - \frac{2K_{G1}}{\alpha T_{G1}}u_2 \quad (۶)$$

$$\frac{d}{dt}x_6 = -\frac{1}{\alpha T_R}x_6 + \frac{1}{\alpha T_R}x_7 + \frac{1}{\alpha}\frac{dx_7}{dt} = -\frac{K_{G1}}{\alpha R_{PH}T_{G1}}x_1 - \frac{1}{\alpha T_R}x_6 + (\frac{1}{\alpha T_R} - \frac{1}{\alpha T_{G1}})x_7 + \frac{K_{G1}}{\alpha T_{G1}}u_2 \quad (۷)$$

$$\frac{d}{dt}x_7 = -\frac{K_{G1}}{R_{PH}T_{G1}}x_1 - \frac{1}{T_{G1}}x_7 + \frac{K_{G1}}{T_{G1}}u_3 \quad (۸)$$

که در آن α نسبت شیب موقتی افتی به شیب دائمی افتی، T_W زمان شروع آب، R_P شیب دائمی افتی، T_G ثابت زمانی گاورنر، K_G بهره گاورنر و T_R زمان طولانی بازنشانی است.

د- سیستم فتوولتائیک: با انتخاب دو متغیر حالت، معادلات دیفرانسیل مرتبه اول نمایش دهنده مدل سیستم فتوولتائیک عبارتند از:

$$\frac{d}{dt}x_8 = -p_2x_8 + z_1x_9 + \frac{d}{dt}x_8 - p_2x_8 + (z_1 + p_1)x_9 + K_{PV}u_2 \quad (۹)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

$$\frac{d}{dt}x_9 = -p_1 x_9 + K_{pv} u_2 \quad (۱۰)$$

که در آن تغییرات بار در این ناحیه با متغیر u_2 در نظر گرفته شده است.

ه- توان انتقالی: توان انتقالی بین سیستم قدرت با دو منبع انرژی و سیستم فتوولتائیک با متغیر حالت x_{10} در نظر گرفته شده است. معادله دیفرانسیل توان انتقالی با در نظر گرفتن تابع انتقال انتگرالی، عبارت است از:

$$\frac{d}{dt}x_{10} = T_{12}(-x_1 + x_8) \quad (۱۱)$$

که در آن T_{12} ضریب سنکرون‌کننده بین دو ناحیه است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

قابلیت اطمینان و پایداری نقش همی در سازماندهی علمیات یکپارچه تاسیتات انرژی در زیرساخت کلی دارد. کنترل فرکانس تاثیر مهمی بر اطمینان از کیفیت منبع تغذیه همزمان با پایداری در سیستم قدرت دارد. کنترل فرکانس بار با تنظیم مداوم توان خروجی ژنراتورها در پاسخ به تغییرات تقاضا یا اختلال‌ها به مطابقت تولید با بار تقاضا کمک می‌کنند و در نتیجه پایداری شبکه را تضمین می‌کنند. همچنین این کنترل‌کننده‌ها با کاهش تأثیر تغییرات بار ناگهانی یا نوسانات در منابع انرژی تجدیدپذیر، به پایداری کلی نیروگاه‌ها می‌توانند کمک کنند.

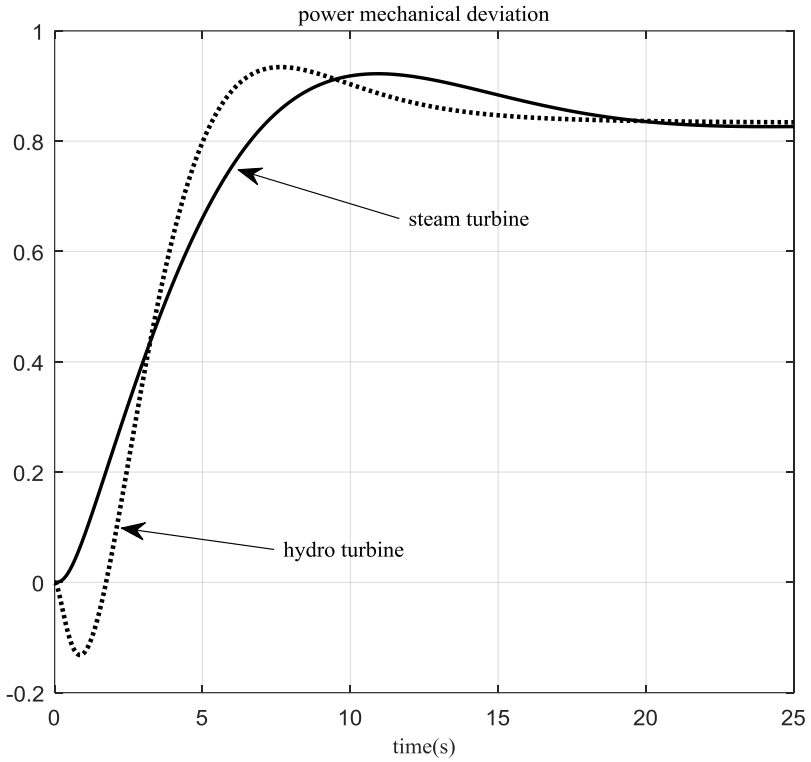
در این قسمت نتایج شبیه‌سازی رفتار سیستم قدرت تک ناحیه‌ای شامل دو توربین ارائه شده است. یکی از منابع انرژی توربین بخار مجهز به پیش‌گرمکن و منبع دیگر توربین آبی مجهز به جبران‌سازی گذرای افتی است. همچنین نقش سیستم فتوولتائیک بر روی رفتار سیستم به ازای تغییرات بار نشان داده شده است. ارزیابی عملکرد سیستم تحت بارهای مختلف از طریق شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب و تحلیل مُدهای سیستم انجام شده است.

وقتی که واحدهای آبی و بخاری به تنهایی کار می‌کنند، پاسخ تغییرات فرکانس نسبت به تغییرات پله‌ای بار نوسانی است و سیستم پایدار است. سیستم برای وقتی که واحد آبی به تنهایی کار می‌کنند دارای سه مُد ۴/۸۲۰۳-، ۰/۴۶۳۳- و ۰/۳۳۰۴±j۰/۲۶۶۰- خواهد بود و وقتی که واحد بخاری به تنهایی کار می‌کنند دارای سه مُد ۴/۷۳۵۸-، ۰/۴۶۰۴- و ۰/۷۷۳۳±j۰/۸۸۱۹- است. شکل (۳) تغییرات توان مکانیکی خروجی و شکل (۴) تغییرات فرکانس به ازای تغییرات پله‌ای بار برای وقتی که واحدها به صورت مستقل کار می‌کنند را نشان می‌دهند.

در جدول (۱) مُدهای سیستم قدرت تک ناحیه‌ای با دو واحد تولیدی به ازای ضرایب مشارکت مختلف آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تاثیر واحد آبی و کاهش تاثیر واحد بخار، مُدهای حقیقی (مُدهای غیرنوسانی) سیستم به سمت چپ محور موهومی حرکت کرده‌اند ولی مُد موهومی (مُد نوسانی) سیستم به محور موهومی نزدیک شده‌اند. با افزایش ضریب مشارکت واحد آبی (K_H) مقدار فرکانس در حالت دائمی بیشتر افت خواهد داشت و مقدار افت فرکانس در پاسخ پله بیشتر خواهد بود.

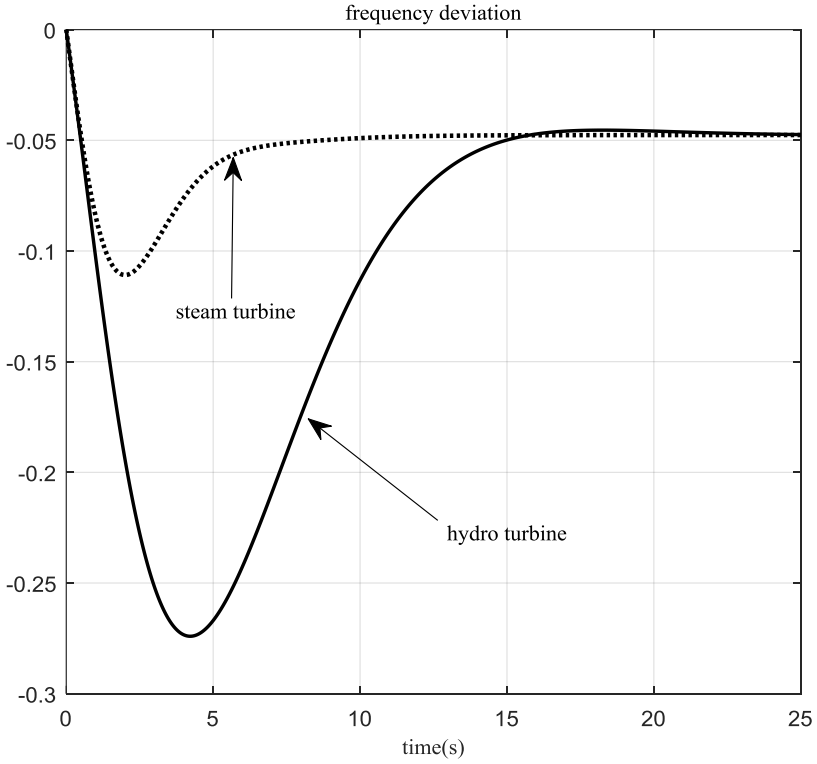
شکل (۵) تغییرات فرکانس سیستم قدرت مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات فرکانس در حالت دائمی به سمت صفر میل کرده است. شکل (۶) تغییرات توان مکانیکی خروجی دو واحد تولیدی را به ازای تغییرات پله-ای بار در سیستم قدرت نشان می‌دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



شکل (۳): تغییرات توان مکانیکی واحدهای تولیدی در تغذیه جداگانه

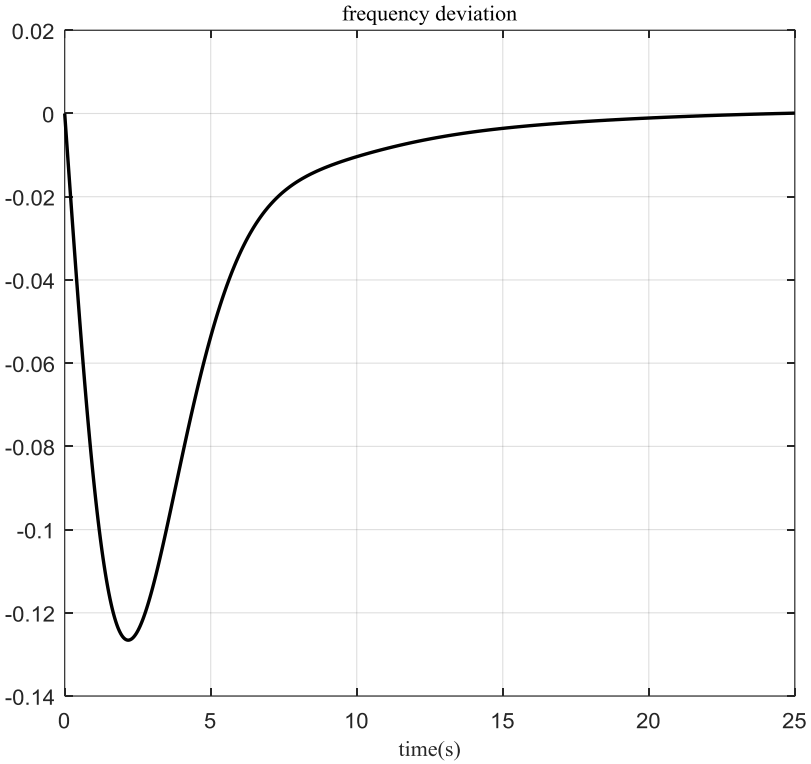
Figure (3): Changes in mechanical power of production units in separate feeding



شکل (۴): تغییرات فرکانس سیستم واحدهای تولیدی در تغذیه جداگانه

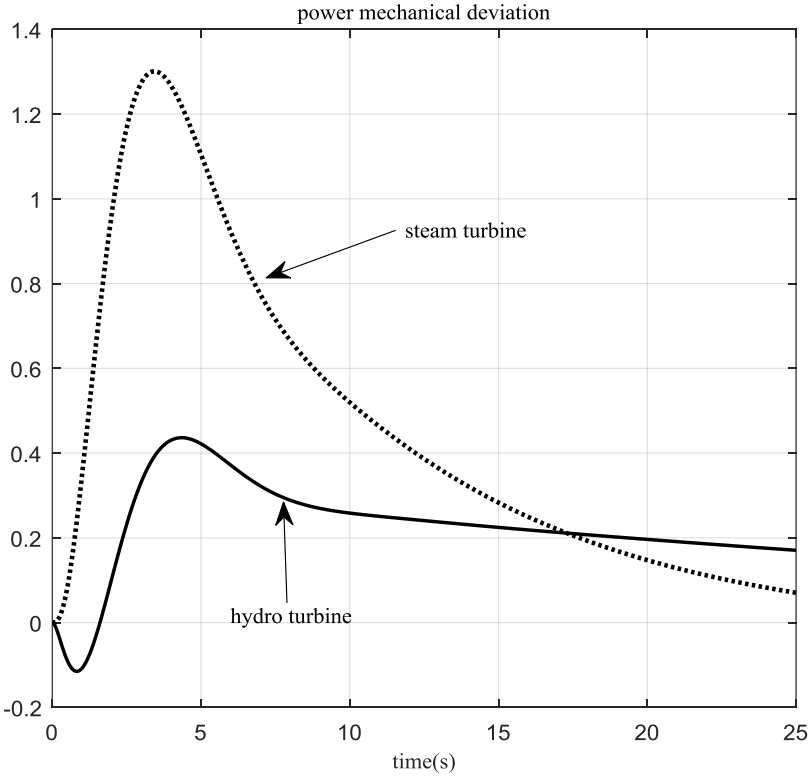
Figure (4): System frequency changes of generating units in separate feed

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



شکل (۵): تغییرات فرکانس خروجی سیستم با در نظر گرفتن اثر سیستم فتوولتائیک

Figure (5): Changes in the system output frequency considering the effect of the photovoltaic system



شکل (۶): تغییرات توان مکانیکی خروجی هر واحد تولیدی در سیستم قدرت مورد مطالعه

Figure (6): Changes in the mechanical power output of each generation unit in the studied power system

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Table (1): The effect of participation coefficients on single-zone power system modes

جدول (۱): تاثیر ضرایب مشارکت بر مُدهای سیستم قدرت تک ناحیه‌ای

ضرایب مشارکت	K_H=0.3 K_S=0.7	K_S=0.5 K_H=0.5	K_H=0.7 K_S=0.3
مُدهای سیستم	-0.0342 -0.4606 -2.0523 -4.0000 -4.7591 -0.6406±j.7227	-0.0429 -0.4607 -2.1952 -4.0000 -4.7755 -0.5565±j0.6188	-0.0580 -0.4610 -2.3256 -4.0000 -4.7928 -0.4750±j0.5061

۶- نتیجه‌گیری

کنترل توان اکتیو و فرکانس سیستم بر عهده حلقه کنترل فرکانس بار و کنترل توان راکتیو و اندازه ولتاژ بر عهده حلقه تنظیم کننده ولتاژ خودکار است. کنترل فرکانس بار یکی از مهمترین ابزار کنترلی در سیستم قدرت است که به تعادل کوتاه مدت انرژی و فرکانس کمک می‌کند. کنترل فرکانس بار مکانیزمی برای تنظیم توان عبوری بین مناطق مختلف در یک سیستم قدرت به هم پیوسته به منظور ثابت نگه‌داشتن فرکانس است. این سیستم کنترلی فرآیند تنظیم فرکانس سیستم قدرت را با تنظیم تولید در پاسخ به تغییرات بار سیستم انجام می‌دهد. در این مقاله هدف تحلیل رفتار دینامیکی یک سیستم قدرت تک ناحیه‌ای با در نظر گرفتن اثر سیستم فتوولتائیک است. این مطالعه بر روی یک سیستم قدرت با دو توربین بخاری و توربین آبی در یک منطقه تمرکز دارد.

References

مراجع

[1] M. Ranjan, R. Shankar, "A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects", Journal of Energy Storage, vol. 45, Article Nimber: 103717, Jan. 2022, https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103717.

[2] M.R. Aboutalebi, S. Yaghoubi, "Design a 100 kW photovoltaic power plant in isfahan- Economic and environmental study", Journal of Novel Researches on Electrical Powe, vol. 11, no. 1, pp. 47-56, June 2022, http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222468.1401.11.1.6.8.

[3] B. Guan, H. Li, H. Yang, T. Zhang, X. Liu, X. Wang, "Leveraging cost-effectiveness of photovoltaic-battery system in metro station under time-of-use pricing tariff", Journal of Cleaner Production, vol. 434, Article Number: 140268, Jan. 2024, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140268.

[4] H. Xiao, W. Lai, A. Chen, S. Lai, W. He, X. Deng, C. Zhang, H. Ren, "Application of photovoltaic and solar thermal technologies in buildings: A mini-review", Coatings, vol. 14, no. 3, Article Number: 257, Feb. 2024, https://doi.org/10.3390/coatings14030257.

[5] S.N.H. Mousavi, H. Barati, "Direct power control simultaneously in the rotor side converter and grid side converter of DFIG for wind turbines with elimination of network current harmonics", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 8, no. 3, pp. 37-51, Dec. 2019, http://dorl.net/dor/20.1001.1.23-222468.1398.8.3.4.9.

[6] Y. Wang, Z. Wang, H. Sheng, "Optimizing wind turbine integration in microgrids through enhanced multi-control of energy storage and micro-resources for enhanced stability", Journal of Cleaner Production, vol. 444, Article Number: 140965, March 2024, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140965.

[7] F. Fardinfar, M.J.K. Poure, "Increasing PV-STATCOM penetration using optimal management of energy storage and considering demand response program", Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System, vol. 4, no. 3, pp. 94-113, Dec. 2025, https://doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1127469.

[8] S.B. Masikana, G. Sharma, S. Sharma, "Renewable energy sources integrated load frequency control of power system: A review", e-Prime- Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 8, Article Number: 100605, June 2024, https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100605.

[9] S. Li, T. Hu, Y. Li, "Reliability improvement to UPFC with routine test to the abnormal state", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 37, no. 6, pp. 4612-4622, Dec. 2022, https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.315221-0.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[10] C. Lenka, P. Ray, S.K. Panda, "Load frequency control of a hydrothermal hybrid power system using evolutionary optimization algorithm", Journal of The Institution of Engineers, vol. 105, pp. 959–970, Aug. 2024, https://doi.org/10.1007/s40031-024-01021-2.
[11] D. Izci, S. Ekinci, E. Çelik, M. Bajaj, V. Blazek, L. Prokop, "Dynamic load frequency control in power systems using a hybrid simulated annealing based quadratic interpolation optimizer", Scientific Reports, vol. 14, Article Number: 26011, Oct. 2024, https://doi.org/10.1038/s41598-024-77247-3.
[12] R.R. Shukla, M.M. Garg, A.K. Panda, "Driving grid stability: Integrating electric vehicles and energy storage devices for efficient load frequency control in isolated hybrid microgrids", Journal of Energy Storage, vol. 89, Article Number: 111654, June 2024, https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111654.
[13] G. Shankar, V. Mukherjee, "Quasi oppositional harmony search algorithm based controller tuning for load frequency control of multi-source multi-area power system", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 75, pp. 289-302, Feb. 2016, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.09.011.
[14] H.H. Ali, A. Fathy, A.M. Kassem, "Optimal model predictive control for LFC of multi-interconnected plants comprising renewable energy sources based on recent sooty terns approach", Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 42, Article Number: 100844, Dec. 2020, https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100844.
[15] T. He, S. Li, S. Wu, K. Li, "Small-signal stability analysis for power system frequency regulation with renewable energy participation", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2021, Article Paper: 5556062, April 2021, https://doi.org/10.1155/2021/5556062.
[16] T. Baškarad, N. Holjevac, I. Kuzle, "Photovoltaic system control for power system frequency support in case of cascading events", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 14, no. 2, pp. 1324-1334, April 2023, https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3197687.
[17] L. Zhang, T. Zhang, K. Zhang, W. Hu, "Research on power fluctuation strategy of hybrid energy storage to suppress wind-photovoltaic hybrid power system", Energy Reports, vol. 10, pp. 3166-3173, Nov. 2023, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.176.
[18] S. Rajamand, "Load frequency control and dynamic response improvement using energy storage and modeling of uncertainty in renewable distributed generators", Journal of Energy Storage, vol. 37, Article Number: 102467, May 2021, https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102467.
[19] R. Shankar, S.R. Pradhan, K. Chatterjee, R. Mandal, "A comprehensive state of the art literature survey on LFC mechanism for power system", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 76, pp. 1185-1207, Sept. 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.064.
[20] D.D. Rasolomampionona, M. Połecki, K. Zagrajek, W. Wróblewski, M. Januszewski, "A comprehensive review of load frequency control technologies", Energies, vol. 17, no. 12, Article Number: 2915, June 2024, https://doi.org/10.3390/en17122915.
[21] M.M. Gulzar, S.T.H. Rizvi, M.Y. Javed, D. Sibtain, R.S. Din, "Mitigating the load frequency fluctuations of interconnected power systems using model predictive controller", Electronics, vol. 8, no. 2, Article Number: 156, Feb. 2019, https://doi.org/10.3390/electronics8020156.
[22] W. Jinpeng, Y. Qinxue, Z. Bo, Jeremy-Gillbanks and Z. Xin, "Study on MPPT algorithm based on an efficient hybrid conjugate gradient method in a photovoltaic system", IEEE Access, vol. 11, pp. 4219-4227, Jan. 2023, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3233826.
[23] K. Ullah, M. Ishaq, F. Tchier, H. Ahmad, Z. Ahmad, "Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system", Results in Engineering, vol. 20, Article Number: 101466, Dec. 2023, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101466.
[24] D. Taheri, G. Shahgholian, M.M. Mirtalaei, "Analysis, design and implementation of a high step-up multi-port non-isolated converter with coupled inductor and soft switching for photovoltaic applications", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 16, no. 17, pp. 3473-3497, Sept. 2022, https://doi.org/10.1049/gtd2.12537.
[25] M. Ali, M. Ahmad, M.A. Koondhar, M.S. Akram, A. Verma, B. Khan, "Maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic system using adaptive fuzzy logic Controller", Computers and Electrical Engineering, vol. 110, Article Number: 108879, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108879.
[26] M. Hashemi, S. Javadi, "Design of maximum power point tracking in solar array systems using fuzzy controllers", International Journal of Smart Electrical Engineering, vol. 2, no. 4, pp. 237-244, Dec. 2013, https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519246.2013.02.4.8.7.
[27] D. Revathi, G.M. Kumar, "Analysis of LFC in PV-thermal-thermal interconnected power system using fuzzy gain scheduling", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 30, Article Number: e12336, Feb. 2020, https://doi.org/10.1002/2050-7038.12336.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

[28] G.Q. Zeng, X.Q. Xie, M.R. Chen, "An adaptive model predictive load frequency control method for multi-area interconnected power systems with photovoltaic generations", Energies, vol. 10, Article Number: 1840, Nov. 2017, https://doi.org/10.3390/en10111840.

[29] S.M. Abd-Elazim, E.S. Ali, "Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm", Neural Computing and Applications, vol. 30, pp. 607-616, July 2018, https://doi.org/10.1007/s00521-016-2668-y.

[30] M. Mokhtar, M.I. Marei, M.A. Sameh, M.A. Attia, "An adaptive load frequency control for power systems with renewable energy sources", Energies, vol. 15, Article Number: 573, Jan. 2022, https://doi.org/10.33-90/en15020573.

[31] A. Rahman, L.C. Saikia, N. Sinha, "Load frequency control of a hydro-thermal system under deregulated environment using biogeography-based optimised three-degree-of-freedom integral-derivative controller", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 9, no. 15, pp. 2284-2293, Nov. 2015, https://doi.org/1-0.1049/iet-gtd.2015.0317.

[32] D.T. Trinh, Y.K. Wu, M.H. Pham, "A novel load frequency control strategy for a modern power system by considering state-space modeling and stability analysis", IEEE Access, vol. 12, pp. 115085-115101, Aug. 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3445180.

[33] G. Shahgholian, A. Fathollahi, "Analyzing small-signal stability in a multi-source single-area power system with a load-frequency controller coordinated with a photovoltaic system", AppliedMath, vol. 4, no. 2, pp. 452-467, April 2024, https://doi.org/10.3390/appliedmath4020024.

[34] M. Tavakoli, E. Pouresmaeil, J. Adabi, R. Godina, J. P.S. Catalão, "Load-frequency control in a multi-source power system connected to wind farms through multi terminal HVDC systems", Computers and Operations Research, Vol. 96, pp. 305-315, Aug. 2018, https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.03.002.

[35] P. Gopi, N.C. Alluraiah, P.H. Kumar, M. Bajaj, V. Blazek, L. Prokop, "Improving load frequency controller tuning with rat swarm optimization and porpoising feature detection for enhanced power system stability", Scientific Reports, vol. 14, Article Number: 15209, July 2024, https://doi.org/10.1038/s41598-024-66007-y.

[36] E. Aghadavoodi, G. Shahgholian, "A new practical feed-forward cascade analyze for close loop identification of combustion control loop system through RANFIS and NARX", Applied Thermal Engineering, vol. 133, pp. 381-395, March 2018, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.075.

[37] C. Celis, G.R.S. Pinto, T. Teixeira, É. Xavier, "A steam turbine dynamic model for full scope power plant simulators", Applied Thermal Engineering, Vol. 120, pp. 593-602, June 2017, https://doi.org/10.1016/j.appl-thermaleng.2017.03.131.

[38] D. Wang, D. Liu, C. Wang, Y. Zhou, X. Li, M. Yang, "Flexibility improvement method of coal-fired thermal power plant based on the multi-scale utilization of steam turbine energy storage", Energy, vol. 239, Article Number: 122301, Jan. 2022, https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122301.

[39] O.J. Khaleel, F.B. Ismail, T.K. Ibrahim, S.H.A. Hassan, "Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the classification, development, improvements, and configurations", Ain Shams Engineering Journal, vol. 13, no. 3, Article Number: 101640, May 2022, https://doi.org/10.101-6/j.asej.2021.11.009.

[40] A. Basem, M. Moawed, M.H. Abbood, W.M. El-Maghlany, "The design of a hybrid parabolic solar dish–steam power plant: An experimental study", Energy Reports, vol. 8, pp. 1949-1965, Nov. 2022, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.236.

[41] W. Tan, S. Chang, R. Zhou, "Load frequency control of power systems with non-linearities", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 11, no. 17, pp. 4307-4313, Nov. 2017, https://doi.org/10.10-49/iet-gtd.2017.0599.

[42] M. Riahinasab, N. Behzadfar, H. Movahednejad, "Analysis and simulation of load frequency control in power system with reheater steam turbine", Journal of Applied Dynamic Systems and Control, vol. 5, no. 1, pp. 84-90, June 2022, https://dorl.net/dor/20.1001.1.26764342.2022.5.1.12.0.

[43] W. Guo, D. Zhu, "A review of the transient process and control for a hydropower station with a super long headrace tunnel", Energies, vol. 11, no. 11, Article Number: 2994, Nov. 2018, https://doi.org/10.339-0/en11112994.

[44] J. Hu, J. Yang, X. He, Z. Zhao, J. Yang, "Transient analysis of a hydropower plant with a super-long headrace tunnel during load acceptance: Instability mechanism and measurement verification", Energy, vol. 263, Article Number: 125671, Jan. 2023, https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125671.

[45] W. Ma, Z. Zhao, J. Yang, X. Lai, C. Liu, J. Yang, "A transient analysis framework for hydropower generating systems under parameter uncertainty by integrating physics-based and data-driven models", Energy, vol. 297, Article Number: 131141, June 2024, https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131141.

[46] G. Shahgholian, "Power system stabilizer application for load frequency control in hydro-electric power plant", Engineering Mathematics, vol. 2, no. 1, pp. 21-30, Feb. 2017, https://doi.org/10.11648/j.engm ath.20170201.14.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

زیرنویس‌ها

[1] Fossil fuels
[2] Renewable energy sources
[3] Photovoltaic system
[4] Wind turbine
[5] Greenhouse gases
[6] Sooty tern’s optimization algorithm
[7] Scheduled power
[8] Reheater
[9] Transient droop compensator

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]