

Frequency Control in Multi-Carrier Microgrids with the Presence of Electric Vehicles Based on Adaptive Neuro Fuzzy Inference System Controller

Seyed Ali Seyed Beheshti Fini, *Ph.D. Student*, Seyed Mohammad Shariatmadar, *Assistant Professor*, Vahid Amir, *Assistant Professor*

Department of Electrical and Computer - Kashan Branch, Islamic Azad University, Kashan, Iran
alibeheshti59@yahoo.com, shariatmadar@tci.ir, v.amir@iaukashan.ac.ir

Abstract

Nowadays, the use of renewable resources has increased because of fossil fuel price growth, resource shortage, and environmental pollution. This study investigates a microgrid composed of wind and solar systems with battery storage sources and flywheel, diesel generator, and multi-carrier energy systems (MCH) as combined electricity and heat (CHP). The microgrid frequency is controlled based on the gas network and its consumption peak. In a multi-carrier network, the load distribution in the gas network is simultaneously considered with the electric charge distribution. Besides, the frequency is controlled nonlinearly. On the other hand, the growing trend of producing and using electric vehicles has generated new loads on the electricity network. In this regard, if these loads are not properly managed to charge them, the network's frequency deviations will increase and cause the collapse of the electricity network. Therefore, electric vehicles (V2G) are considered in microgrid frequency tuning operations through ANFIS adaptive fuzzy control method. In order to compare the proposed method in the simulations, a fuzzy controller is used. The results of the simulations are examined in five studies that express the optimal performance of the proposed method in reducing frequency deviations, strength against disturbances and resistance Uncertainties in the system. The proposed method also has a more stable output power in microgrid production resources.

Keywords: adaptive neuro fuzzy inference system, electric vehicle, frequency control, fuzzy control, microgrid, secondary frequency

Received: 4 January 2022

Revised: 5 March 2022

Accepted: 29 April 2022

Corresponding Author: Dr. Seyed Mohammad Shariatmadar

Citation: S.A. Seyed-Beheshti-Fini, S.M. 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, December 2023 (in Persian).

کنترل فرکانس در ریزش‌بکه‌های چند-حاملی با حضور خودروهای الکتریکی مبتنی بر کنترل‌کننده سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی

سیدعلی سید بهشتی فینی، دانشجوی دکتری، سید محمد شریعتمدار، استادیار، وحید امیر، استادیار

گروه برق و کامپیوتر- واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشان، ایران
alibeheshti59@yahoo.com, shariatmadar@tcu.ir, v.amir@iaukashan.ac.ir

چکیده: امروزه افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و کاهش منابع از یک سو و آلودگی‌های زیست محیطی از سوی دیگر باعث افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر گردیده است. در این مقاله ریزش‌بکه مورد مطالعه از منابع بادی و خورشیدی، ذخیره‌ساز (باتری و فلاپویل) خودرو الکتریکی، دیزل ژنراتور و حضور سیستم‌های انرژی چند حاملی (MCH) به‌عنوان انرژی ترکیبی برق و حرارت (CHP) تشکیل شده است. فرکانس ریزش‌بکه با توجه به شبکه گاز و پیک مصرف کنترل می‌شود. در ریزش‌بکه چند حاملی پخش بار شبکه گاز همزمان با پخش بار الکتریکی منظور می‌گردد. همچنین فرکانس به‌صورت غیرخطی کنترل می‌شود. از طرف دیگر روند رو به رشد تولید و به‌کارگیری خودروهای برقی (V2G) بارهای جدیدی برای شبکه برق ایجاد کرده است که در صورتی که مدیریت صحیحی بر روی نحوه شارژ آنها صورت نگیرد انحراف فرکانس شبکه افزایش یافته و می‌تواند سبب فروپاشی شبکه گردد. لذا از خودروهای برقی به منظور مشارکت در عملیات تنظیم فرکانس ریزش‌بکه با روش سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) استفاده می‌شود. به‌منظور مقایسه روش پیشنهادی در شبیه‌سازی‌ها از کنترل‌کننده فازی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در پنج مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرند که بیان‌گر عملکرد مطلوب روش پیشنهادی در کاهش انحراف فرکانس، استحکام در برابر اغتشاشات و مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌های موجود در سیستم است. همچنین روش پیشنهادی توان خروجی پایدارتری در منابع تولید ریزش‌بکه دارد.

کلمات کلیدی: خودرو الکتریکی، ریزش‌بکه، سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی، فرکانس ثانویه، کنترل فازی، کنترل فرکانس

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۲/۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید محمد شریعتمدار

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کاشان- دانشگاه آزاد اسلامی واحد کاشان- گروه برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

ریزشبه‌ها، دارای دو مود عملیاتی هستند: مود متصل به شبکه و مود جزیره‌ای. برای راه‌اندازی یک ریزشبه^۱ در مود جزیره‌ای، به منابع انرژی پراکنده^۲ (DER) مانند میکرو ژنراتورها، واحدهای ترکیبی گرما و قدرت^۳ (CHP)، فوتولتائیک^۴ (PV) توربین‌های بادی یا آبی و دستگاه‌های ذخیره انرژی نیاز است. از میان گزینه‌های DER، واحد CHP به‌طور چشم‌گیری محبوب شده است [۱]. در مقاله‌های متعددی به استفاده از خودروهای الکتریکی در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اشاره شده است [۲،۳]. براساس گزارش مرجع [۴] تعداد خودروهای الکتریکی در آمریکا در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب ۳۵ درصد، ۵۱ درصد و ۶۲ درصد کل خودروها خواهد رسید. با توجه به نیاز خودروهای الکتریکی قابل شارژ به انرژی برق، بار جدیدی به شبکه اعمال خواهد شد. لذا با افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی، مبحث کنترل و پایداری فرکانس شبکه‌های قدرت وارد فاز جدیدی خواهد شد. از طرفی به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی و مشکلات مربوط به انرژی‌های فسیلی، سطح نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در بسیاری از کشورها به‌طور گسترده‌ای افزایش یافته است. سطح نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر فرصت‌ها و چالش‌های زیادی برای اپراتورهای سیستم قدرت ایجاد کرده است [۵]. قابلیت اطمینان منابع تجدیدپذیر با تعداد زیاد وسایل نقلیه الکتریکی افزایش پیدا خواهد کرد. تعداد بی‌شماری از خودروهای الکتریکی متصل به شبکه^۵ (V2G) در شبکه می‌توانند به‌عنوان یک باتری گسترده ذخیره‌سازی در مقیاس چندین مگاوات در نظر گرفته شوند که به آن‌ها سیستم‌های خودروی به شبکه یا V2G گفته می‌شود. سیستم‌های V2G قادر به ایجاد یک منبع ذخیره پشتیبانی هستند که با واکنشی سریع به اختلالات، توان را در شبکه قدرت متعادل می‌کنند. از کنترل فازی برای کنترل خودروهای شبکه در حال مشارکت در کنترل فرکانس بار استفاده می‌شود [۶،۷].

در مرجع [۸] کاربرد جدیدی از کنترل‌کننده روش نمودار ضرایب، مبتنی بر اینرسی مجازی قوی^۶ (CDM) در یک ریزشبه جزیره‌ای با در نظر گرفتن نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر سطح بالا، برای افزایش اعتبار و استحکام سیستم در برابر اختلالات و عدم قطعیت‌های پارامترهای سیستم قدرت پیشنهاد شده است. مهارت کنترل‌کننده پیشنهادی با کنترل‌کننده H بی‌نهایت با استفاده از نرم‌افزار متلب مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در مرجع [۹] کنترل فرکانس یک ریزشبه شامل پیل سوختی، سیستم خورشیدی، ژنراتور بادی و CHP در نظر گرفته شده و از روش کنترل‌کننده فازی چند ورودی و تک خروجی^۷ (MISO) بهره برده است. در مرجع [۱۰] از طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر مدل کنترل پیش‌بین^۸ (MPC) برای یک ریزشبه مستقل استفاده کرده است. در این مقاله برای کنترل اولیه از روش دروپ و امیدانس مجازی استفاده شده است و استراتژی کنترل پیشنهادی موجب بهبود سهم توان و کیفیت توان در نقطه اتصال مشترک مبدل‌ها گردیده است. در مرجع [۱۱] کنترل فرکانس یک ریزشبه متشکل از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر سیستم خورشیدی و توربین بادی با روش کنترل فرکانس و ولتاژ مستقل شده صورت گرفته است، در این مرجع اثر استفاده از ادوات ذخیره‌ساز انرژی بر روی کنترل فرکانس نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۲] اثر تغییرات توان نیروگاه سلول خورشیدی بر روی فرکانس ریزشبه بررسی شده و سعی شده فرکانس کنترل گردد. در مرجع [۱۳] استفاده از یک سیستم تولید انرژی هیدروژنی بادی-خورشیدی را ارائه می‌کند. این سیستم شامل آرایش فوتولتائیک، توربین بادی بانک باتری، تانک ذخیره هیدروژن و یک سیستم کنترل اتوماتیک برای شارژ و دشارژ باتری است. با اجرای این سیستم روی یک سیستم نمونه واقعی، مدل ریاضی برای هر مولفه سیستم استخراج شده است.

کنترل‌کننده مقاوم توسعه‌یافته جهت کنترل مقاوم با استفاده از روش نابرابری‌های ماتریس خطی^۹ (LMI) به انواع مختلفی در مرجع [۱۴] بیان شده و روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. در این روش سیستم قدرت نامعین در نظر گرفته شده و کنترل‌کننده دارای مرتبه بالا هستند که همه روش‌های مذکور با کم شدن تغییرات فرکانس در حالت دینامیکی و ماندگار سعی در پایداری سیستم قدرت دارند. یک روش کنترل‌کننده مد لغزشی برای کنترل فرکانس در یک سیستم قدرت دارای چهار ناحیه با توربین‌های مختلف مانند بدون پیش‌گرم و توربین آبی در مرجع [۱۵] ارائه شده است. در مرجع [۱۶] سیستم کنترل بار فرکانس^{۱۰} (LFC) در یک سیستم قدرت با دو ناحیه حرارتی و آبی با استفاده از کنترل‌کننده PID فازی طراحی شده است. در مرجع [۱۷] روش بهینه‌سازی ترکیبی مبتنی بر ازدحام ذرات و گرم شب‌تاب^{۱۱} (FF-PSO) برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PID برای به حداقل رساندن انحراف فرکانس در سیستم ریزشبه تحت شرایط عملیاتی مختلف مانند

تغییر در سرعت باد و تقاضای بار پیشنهاد شده است. همچنین یک تحلیل مقایسه‌ای برای تنظیم کنترل‌کننده PID با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم‌های کرم شبتاب برای به حداقل رساندن انحراف در فرکانس انجام می‌شود. در مرجع [۱۸] یک ساختار کنترلی سلسله مرتبه‌ای ارائه شده که در این نوع ساختار کنترلی، کلیه اندازه‌گیری‌ها بر مبنای تبدیل کلارک است. در این تحقیق کنترل ریزشبه در سه سطح کنترل اولیه، کنترل ثانویه و کنترل ثالثیه معرفی شده که هدف از کنترل اولیه به منظور حفظ پایداری اینورترهای منبع ولتاژ است و کنترل ثانویه جهت رفع خطاهای حالت ماندگار ناشی از کنترل اولیه است و وظیفه کنترل ثالثیه به منظور مدیریت توان بر حسب طرح‌های بازار اقتصادی بیان شده است. همچنین کلیه بارهای آزمون متصل به شبکه به صورت مقاومتی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۹] مدل قوی با توصیف رفتار کلی داده به صورت مستقیم به جای استفاده از داده‌های گذشته منجر به راه‌حل‌های بسیار دقیق شده است. به منظور مقایسه دقت اندازه‌گیری مستقیم، ابتدا یک تشعشع خورشیدی تحلیلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با استفاده از این مدل، داده‌های تشعشع خورشیدی سه ساله مورد ارزیابی قرار گرفته و اختلافاتی بین ثبت نمونه‌ها به صورت ساعتی مشاهده شده است. در مرجع [۲۰] یک انتقال‌دهنده dc-dc برای پارکینگ دوطرفه فتوولتائیک/باتری‌های خودروی الکتریکی^{۱۲} (EV) با سرویس خودروی شبکه (V2G-PVBP) پیشنهاد می‌کند که با تکیه بر عملکرد ذخیره‌سازی انرژی EVها نه تنها می‌تواند نیازهای معمول صاحبان وسایل الکتریکی، بلکه عملکرد تنظیم بار و مدیریت بار را برای ریزشبه فراهم سازد. در مرجع [۲۱] عملکرد بهینه کنترل‌کننده فازی برای متعادل‌سازی تولید و مصرف در یک ریزشبه مستقل با خودروهای الکتریکی معرفی شده است. در مرجع [۲۲] الگوریتم بهینه اصلاح شده جدیدی برای تنظیم فاکتورهای مقیاس و تابع‌های عضویت کنترلر PI فازی نوع ۲ با کاهش مؤثر انحراف فرکانس سیستم ریزشبه در برابر اغتشاشات بار توسط منطق فازی نوع دوم^{۱۳} (GT2FL) ارائه می‌دهد. در مرجع [۲۳] یک کنترل فرکانس اصلی از طریق قابلیت V2G در یک ریزشبه صنعتی معرفی شده که شامل هماهنگی اپراتور ایستگاه شارژ، جمع‌کننده EV و اپراتور EV است. در مرجع [۲۴] سیستم کنترل فرکانس بار سه منطقه‌ای، توسط وسایل نقلیه پلاگین^{۱۴} (PEV) کمک می‌کنند تا فرکانس در اغتشاشات مختلف بار تنظیم شود و طرح LFC پیشنهادی به طور موفقیت‌آمیزی، نوسانات فرکانس را با وجود تأخیرها حذف کرده و در برابر عدم قطعیت‌های PEV مقاومت ایجاد کند. در مرجع [۲۵] نتایج شبیه‌سازی به دست آمده از متلب ثابت می‌کند که استفاده از سیستم ذخیره انرژی هیبریدی^{۱۵} (HESS) می‌تواند فرکانس سیستم چند منطقه‌ای به هم پیوسته را به خوبی پایدار سازد و کنترل‌کننده پیشنهادی H کاملاً مؤثر است. در مرجع [۲۶] یک روش ذخیره‌سازی انرژی نوین مبتنی بر ذخیره‌سازی انرژی آبی پمپ شده^{۱۶} (PHES) برای یک ریزشبه انرژی تجدیدپذیر یکپارچه پیشنهاد می‌شود و کنترل فرکانس بار LFC سیستم مورد بررسی محاسبه می‌شود. در مرجع [۲۷] سیستم تولید انرژی و گرما (CHP) دارای کاربرد الکتریکی نسبتاً بالایی بوده و استفاده از منابع انرژی، نقطه قوت این بخش است. در مرجع [۲۸] شبیه‌سازی اینرسی مجازی مبتنی بر مشتق‌ها را با استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی و تأثیر آن بر کنترل فرکانس سیستم قدرت مورد بحث قرار می‌دهد. مرحله بعد، از یک استراتژی بهینه‌سازی کارآمد به نام الگوریتم لیگ برتر والیال مبتنی بر تضاد^{۱۷} (OVPL) برای بهینه کردن پارامترهای سیستم ذخیره‌سازی انرژی (ESS) و کنترل‌گر مورد نیاز استفاده می‌کند. در مرجع [۲۹] یک الگوریتم بهینه‌سازی تحقیقی اتم گرفته شده از فیزیک^{۱۸} (ASO) برای تنظیم پارامترهای کنترلی تناسبی انتگرالی مشتقی با مرتبه کسری^{۱۹} (FOPID) و کنترل خودکار فرکانس بار سیستم پمپ حرارتی^{۲۰} (HPS) را توصیف می‌کند. این مطالعه، تلاش می‌کند تا پایداری فرکانس HPS را با کمک نظریه ماتینیون مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. در مرجع شماره [۳۰]، برای کنترل فرکانس از یک وسیله برقی و یک پمپ گرمایی دارای HPS استفاده می‌کنیم. عملیات لوازم برقی مصرف‌کننده از قبیل وسایل نقلیه الکتریکی و پمپ گرمایی (HP) باعث کاهش استفاده از واحدهای ذخیره‌سازی انرژی مستقل برای (HPS) می‌شود. در مرجع [۳۱] بیان شده تا زمانی که خودروهای الکتریکی به شبکه متصل هستند، می‌توانند به عنوان بار قابل کنترل یا منبع تولیدی عمل کنند. همچنین قابلیت اطمینان منابع تجدیدپذیر با تعداد زیاد خودروی الکتریکی افزایش خواهد یافت. در واقع تعداد زیاد خودروی الکتریکی موجود در شبکه می‌تواند مانند یک باتری ذخیره‌کننده بزرگ در مقیاس چند مگاوات در نظر گرفته شود که به آن سیستم‌های خودرو به شبکه یا V2G می‌گویند. سیستم‌های V2G می‌توانند یک منبع ذخیره پشتیبان را ایجاد کنند که با ایجاد یک پاسخ سریع به اختلالات، تعادل توان را در شبکه قدرت برقرار می‌کند. در مرجع [۳۲] یک روش شارژ هوشمند برای خودروهای برقی در کنترل

فرکانس ریزشبه مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله روش شارژ هوشمند براساس کنترل فازی بهینه شده توسط الگوریتم رقابت استعماری صورت می‌گیرد. در مرجع [۳۳] ریزشبه مستقل با سیستم توربین گرمایشی، توربین بادی، فتوولتائیک و خودروی الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق از روش PI فازی و کنترل افاقی تطبیقی استفاده شده است. در مرجع [۳۴] V2G برای پشتیبانی فرکانس و ولتاژ بر اساس ناوگانی از خودروهای برقی یکپارچه در شبکه برق ارائه می‌دهد. مدل طراحی شده به ارائه خدمات تنظیم بهینه و همچنین پشتیبانی تنظیم ولتاژ به شبکه کمک می‌کند. ضمن ارائه خدمات جانبی لازم، مسائل مربوط به خرابی باتری EV نیز در نظر گرفته شده است. در مرجع [۳۵] ایستگاه‌های شارژ باتری توسط سه منبع شبکه، سیستم فتوولتائیک PVS و سیستم انرژی باتری^{۲۱} (BES) تامین می‌شود. BES به‌عنوان یک بافر با ذخیره انرژی بیش از حد در شرایط بار سبک و تامین آن در صورت نیاز استفاده می‌شود. واحد کنترل مبدل dc به dc دوجبهته را برای شارژ و دشارژ فعال می‌کند. روش ردیابی نقطه حداکثر توان برای به‌دست آوردن پالس‌های مناسب برای مبدل dc به dc برای استخراج حداکثر توان خروجی از PVS در شرایط مختلف استفاده می‌شود. در مرجع [۳۶] یک کنترل‌کننده فازی FOPID تطبیقی برای سیستم قدرت نفوذی تجدیدپذیر پیشنهاد می‌شود. بخش اصلی این تحقیق این است که یک اپلیکیشن اولیه برای تنظیم تمامی پارامترهای احتمالی کنترل‌کننده فازی و کنترل‌کننده FO و PID به‌طور هم‌زمان برای برطرف کردن عدم قطعیت‌های ایجاد شده توسط منابع تجدیدپذیر، بارها و تغییرات پارامتری ایجاد می‌شود. مرجع [۳۷] کنترل پیش‌بینی مدل توزیعی هماهنگ^{۲۲} (DMPC) را برای LFC یک سیستم قدرت ارائه می‌دهد که شامل تولید نیروی باد با متغیرهای ذاتی است. مرجع [۳۸] یک مدل کنترلی پیش‌بینی توزیعی^{۲۳} (HDMPC) برای تنظیم فرکانس احداث می‌کند. در مرجع [۳۹] با استفاده از تکنولوژی V2G و خودروی الکتریکی (EV) می‌توان به‌عنوان یک واحد ذخیره انرژی متحرک استفاده کرد. در یک ریزشبه مستقل، این واحدهای ذخیره انرژی متحرک می‌توانند راه‌حل خوبی برای LFC باشند. در این مرجع، از یک تکنیک LFC هوشمند مبتنی بر سیستم فازی عصبی تطبیقی ANFIS استفاده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که LFC مبتنی بر سیستم عصبی تطبیقی ANFIS واکنش بهتری نسبت به سایر کنترل‌کننده‌ها نشان می‌دهند.

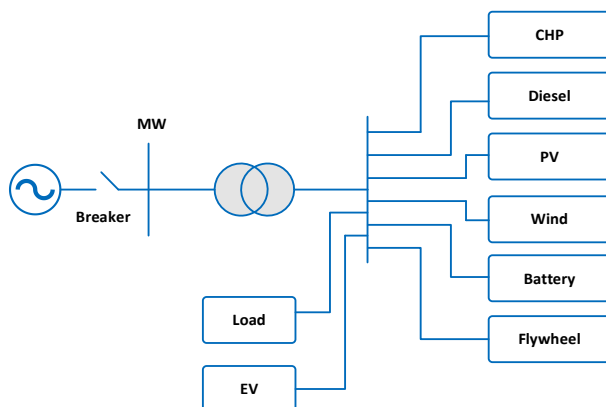
در این مقاله از کنترل‌کننده سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی برای کنترل خودروی الکتریکی به‌منظور تنظیم فرکانس در یک ریزشبه چند-حاملی استفاده کرده‌اند. بنابراین برای ساختار کنترلی پیشنهادی دو سناریو طراحی شده است. ولی تفاوت این تحقیق با مطالعه انجام شده در مرجع [۳۹] در سناریوی اول، CHP و دیزل ژنراتور^{۲۴} (DG) به‌عنوان کنترل‌کننده‌های اصلی فرکانس ثانویه شرکت می‌کنند. در سناریوی دوم، خودروی الکتریکی مجهز به V2G به‌وسیله کنترل‌کننده پیشنهادی ANFIS به‌عنوان پشتیبان در کنترل فرکانس ثانویه شرکت می‌کند. همچنین حضور ذخیره‌سازها (باتری و فلاپویل) که به‌عنوان منابع پشتیبان، قابلیت اطمینان ریزشبه مورد مطالعه را بالا برده است که در مرجع [۳۹] هیچ اشاره‌ای به این منابع نشده است. روش پیشنهادی عملکرد قابل قبولی در کاهش انحرافات فرکانس دارد و پاسخ‌های دینامیکی را بهبود می‌بخشد. همچنین توان خروجی پایدارتری در منابع ریزشبه دارد. ادامه مقاله به این ترتیب سازمان‌دهی می‌شود: در بخش دوم مدل ریزشبه، بخش سوم تحقیقات کنترل‌کننده‌ها، در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- مدل ریزشبه چندحاملی پیشنهادی

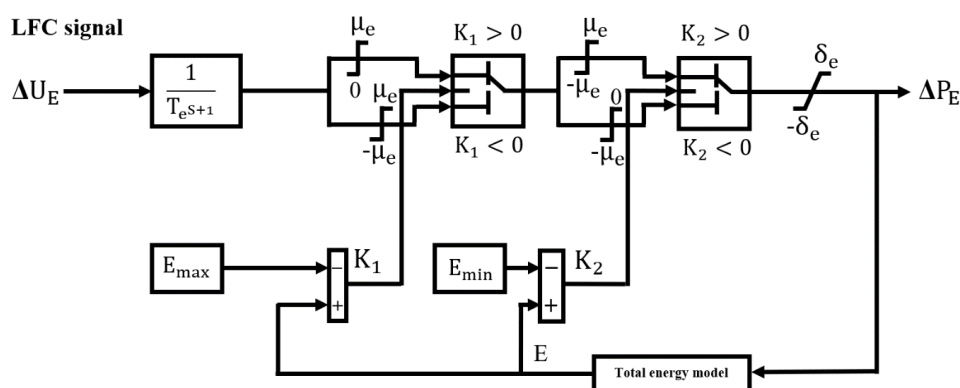
همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است ریزشبه از منابع تجدیدپذیر شامل توربین بادی و سلول‌های خورشیدی، و باتوجه به عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر، حضور منابع ذخیره‌ساز (چرخ طیار و باتری)، منابع قابل کنترل دیزل ژنراتور و CHP (تولید هم‌زمان برق و حرارت) و خودروی الکتریکی به‌عنوان ذخیره‌ساز چرخان (V2G) و بار تشکیل شده است. با توجه به اینکه فرکانس متغیری است که در کل سیستم مقداری یکسان دارد، لذا کلیه بارها و تولیدات توان در یک باس مدل شده‌اند.

۲-۱- مدل خودروی الکتریکی

در این قسمت خودروی الکتریکی مطابق با مرجع [۶] مدل‌سازی می‌شود. شکل (۲) مدل معادل EV مورد استفاده برای LFC را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل ریزشبهه چند حاملی
Figure (1): Multi-carrier microgrid model



شکل (۲): مدل خودروی الکتریکی
Figure (2): Electric vehicle model

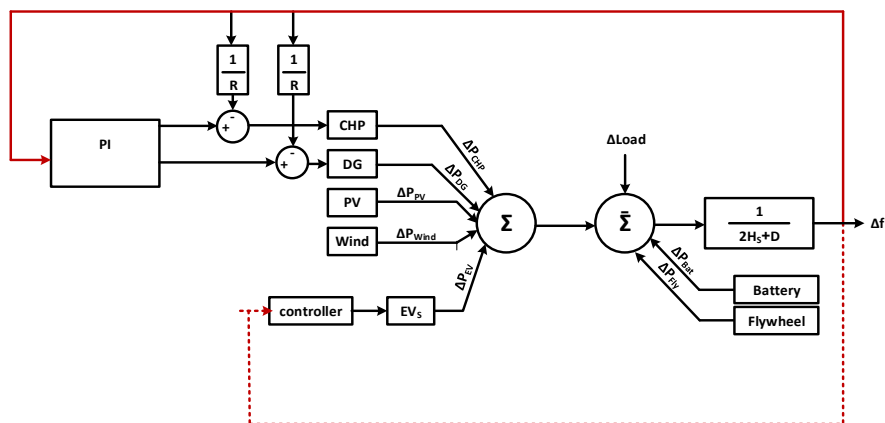
جزئیات این مدل معادل، از قبیل باتری و شارژر برحسب ویژگی‌های شارژی و تخلیه‌ای در مرجع [۶] آمده است. در شکل (۲) نشان داده می‌شود که T_e ثابت زمانی EV، ΔU_E سیگنال LFC اعزام شده به EV، $\pm \mu_e$ محدودیت‌های ظرفیت اینورتر و $\pm \delta_e$ حدهای سرعت رمپ قدرت هستند [۴۰]. انرژی فعلی باتری EV، E_{min} و E_{max} به ترتیب مینیمم و ماکزیمم انرژی قابل کنترل باتری EV هستند. K_1 و K_2 به ترتیب اختلاف میان انرژی محدود و انرژی فعلی باتری EV هستند. مقادیر آن‌ها را می‌توان با $K_1 = E - E_{max}$ و $K_2 = E - E_{min}$ محاسبه کرد. در نهایت ΔP_E توان شارژ/تخلیه است. ΔP_E برابر صفر به این معنی است که EV در حالت ایده‌آل است، مقدار آن بزرگ‌تر از صفر نشان‌دهنده این است که EV در حال تخلیه و مقدار کوچک‌تر از صفر نشان‌دهنده حالت شارژ است. EV تنها می‌تواند در بازه $\pm \mu_e$ شارژ و تخلیه شود. با این حال در صورتی که انرژی EV از بیش‌ترین محدوده فراتر رود (یعنی E_{max}) تنها می‌تواند در بازه $(-\mu_e)$ تخلیه شود. همچنین اگر انرژی آن از پایین‌ترین حد، کمتر باشد (یعنی E_{min})، تنها قادر است در بازه $(\mu_e \sim 0)$ شارژ شود.

۳- طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی

ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی باتوجه به پارامترهای جدول‌های (۱) و (۲) در ریزشبهه چند-حاملی در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳-۱- کنترل‌کننده فازی

انحراف فرکانس سیستم و مشتق تغییرات آن دو سیگنال ورودی و توان به‌عنوان خروجی سیستم فازی مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل توابع عضویت انحراف فرکانس نشان داده می‌شود.



شکل (۳): مدل کنترلی ریزشکده چند حاملی
Figure (3): Multi-carrier microgrid control model

Table (1): Proposed microgrid parameters [39]

جدول (۱): پارامترهای ریزشکده پیشنهادی [۳۹]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
D	۰/۰۱۵ پریونیت بر هرتز	T_g	۰/۰۸ ثانیه
γ	۰/۱۶۶۷ پریونیت-ثانیه	T_t	۰/۴ ثانیه
T_{Fess}	۰/۱ ثانیه	$T_{U/c}$	۰/۰۰۴ ثانیه
T_{Bess}	۰/۱ ثانیه	T_{IN}	۰/۰۴ ثانیه
R	۳ هرتز بر پریونیت	-	-

Table (2): Microgrid model parameters [45-47]

جدول (۲): پارامترهای مدل ریزشکده [۴۰،۴۴،۴۵]

اجزای ریزشکده	پارامتر	مقدار
انرژی ترکیبی برق و حرارت	X_c	۰/۶ ثانیه
	Y_c	۱ ثانیه
	T_{CR}	۰/۱ ثانیه
	T_F	۲۳ ثانیه
	C_g	۱
	$b_g(s)$	۰/۰۵ ثانیه
	$T_{CD}(s)$	۰/۲ ثانیه
باتری‌های خودروی الکتریکی	T_e	۱ ثانیه
	δ_e	۰/۰۱ پریونیت-مگاوات بر ثانیه
	μ_e	۰/۰۲۵ پریونیت-مگاوات
	E_{max}	۰/۹۵ پریونیت-مگاوات بر ساعت
	E_{min}	۰/۸ پریونیت-مگاوات بر ساعت
کنترل کننده متناسب-انتگرال گیر	بهره متناسب	-۴
	بهره انتگرال گیر	-۱/۱۸

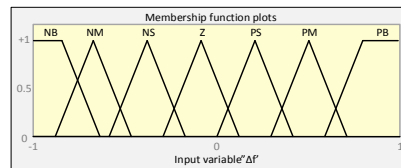
متغیرهای ورودی و خروجی در کنترل کننده پیشنهادی مطابق جدول (۳) به هفت ناحیه تقسیم شده است. هر یک از متغیرهای فازی فوق دارای یک عضو از زیرمجموعه‌هایی هستند که درجه عضویت آنها بین -۱ و +۱ متفاوت است. در کل ۴۹ قانون فازی وجود دارد که در این طرح مطابق جدول (۴) در نظر گرفته شده است. توابع کنترل کننده فازی (الف) تابع انحراف فرکانس، (ب) تابع عضویت مشتق انحراف فرکانس و (ج) تابع عضویت توان در شکل (۴) نشان داده شده است.

Table (3): Input and output variables in the proposed controller
 جدول (۳): متغیرهای ورودی و خروجی در کنترل کننده پیشنهادی

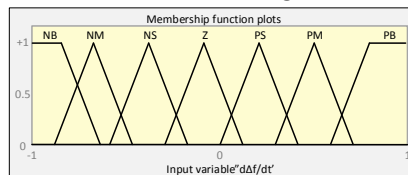
متغیرهای هفت زبانی در کنترل کننده پیشنهادی	
NB	منفی بزرگ
NM	منفی متوسط
NS	منفی کوچک
Z	صفر
PS	مثبت کوچک
PM	مثبت متوسط
PB	مثبت بزرگ

Table (4): Fuzzy rules
 جدول (۴): قوانین فازی

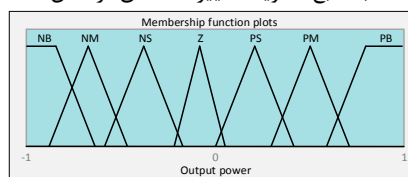
ورودی‌ها		تغییرات فرکانس						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
تغییرات مشتق فرکانس	NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
	NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	PS
	NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
	ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
	PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
	PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB



(الف) تابع عضویت تغییرات فرکانس



(ب) تابع عضویت تغییرات مشتق فرکانس



(ج) تابع عضویت توان

شکل (۴): توابع کنترل کننده فازی

Figure (4): membership functions, a. Frequency variation membership function, b. Frequency variation derivative membership function, c. power membership function

۲-۳- سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی

روش‌های فازی-عصبی از ادغام شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۲۵} (ANN) و سیستم‌های رابط فازی^{۲۶} (FIS) گسترش می‌یابند. ANFIS هم مزیت‌های فازی و هم ANN را دارد [۴۱،۴۲]. قدرت یادگیری شبکه عصبی را با دانش ارائه‌کننده منطق فازی برای اجرای یک مود کارکردی متفاوت، ترکیب می‌کند. ANFIS یک سیستم رابط فازی مبتنی بر شبکه عصبی تطبیقی چندلایه‌ای

است. طراحی این سیستم در شکل (۵) نشان داده شده است [۴۱، ۴۲]. در این تحقیق، سیستم رابط فازی، دارای دو مجموعه ورودی تغییرات فرکانس و مشتق آن و یک خروجی u به‌عنوان توان است. فرض کنید که اصل قانون شامل دو اصل فازی تاکاجی و نوع سوگنو است. به‌عنوان مثال دو قانون زیر را در نظر بگیرید:

Rule 1: If Δf is X_1 and $\dot{\Delta f}$ is Y_1 , then $u_1 = p_1 \Delta f + q_1 \dot{\Delta f} + r$

Rule 2: If Δf is X_2 and $\dot{\Delta f}$ is Y_2 , then $u_2 = p_2 \Delta f + q_2 \dot{\Delta f} + r_2$

لایه اول - این لایه یک نود تطبیقی است و به آن لایه فازی‌سازی گویند. مقادیر پارامترهای این لایه، مطابق با سیگنال خطا تغییر کرده و مقدار صحیح هر یک از تابع‌های عضویت را ایجاد می‌کنند. هر نود با I نشان داده می‌شود و دارای تابع نود تطبیقی است. همان‌طور که در زیر نشان داده شده است:

(۱)

$$o_i^1 = \mu_{x_i}(\Delta f), i = 1, 2 \quad (2)$$

$o_i^1 = \mu_{y_{i-2}}(\dot{\Delta f}), i = 3, 4$ تغییرات فرکانس (یا مشتق آن)، ورودی نود X_i, I یا Y_i یک برجسب زبانی (مجموعه‌های فازی: بزرگ، کوچک) است که توابع عضویت هر یک از نودها را نشان می‌دهد.

لایه دوم - در این لایه، خروجی‌های لایه اول در هم ضرب می‌شوند و آن را به لایه بعدی می‌فرستد. نودهای این لایه، نودهای ثابت هستند و با Π نشان داده می‌شوند.

خروجی هر نود محصول کل سیگنال‌های ورودی است. خروجی به‌دست آمده از همه نودهای این لایه، با معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$o_i^2 = w_i = \mu_{x_i}(\Delta f) \times \mu_{y_i}(\dot{\Delta f}) \text{ for } i = 1, 2 \quad (3)$$

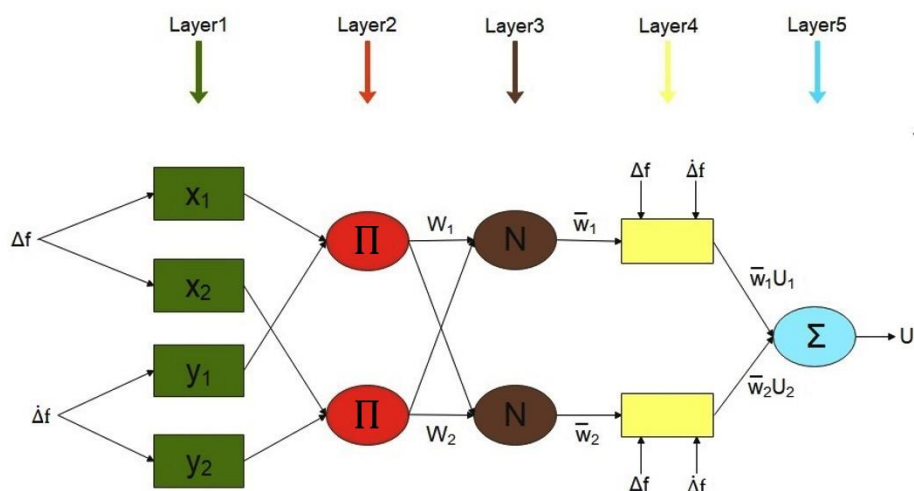
این خروجی میزان فعال‌سازی را نشان می‌دهد.

لایه سوم - این لایه، فعال‌سازی نورمال‌شده هر قانون را محاسبه می‌کند و با N نشان داده می‌شود. (نورمال‌سازی). همه نودهای این لایه نیز ثابت هستند. خروجی این لایه، فعال‌سازی نورمال‌شده است. برای نود u_m ، فعال‌سازی نورمال‌شده (w_1) با عبارت زیر به‌دست می‌آید.

$$o_i^3 = \bar{w}_1 = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \text{ for } i = 1, 2 \quad (4)$$

لایه چهارم - همه نودهای این لایه، تطبیقی هستند و خروجی به‌دست آمده از این لایه به شکل زیر بیان می‌شود:

$$o_i^4 = \bar{w}_1 u_i = \bar{w}_1 (p_i \Delta f + q_i \dot{\Delta f} + r_i) \text{ } i = 1, 2 \quad (5)$$



شکل (۵): ساختار شبکه ANFIS

Figure (5): ANFIS network structure

\bar{w}_i خروجی لایه سوم و $\{p_i, q_i, r_i\}$ مجموعه پارامتری این نود است. به پارامتر این لایه به‌عنوان پارامتر بعدی اشاره می‌شود. لایه پنجم- این لایه آخرین لایه طراحی ANFIS است که خروجی U را به وجود می‌آورد و با \sum نشان داده می‌شود. آن خروجی کلی را به‌عنوان مجموعی از همه سیگنال‌های ورودی به نود، محاسبه می‌کند و فرمول آن به شکل زیر است:

$$o_i^5 - U = \sum \bar{w}_i u_i = \frac{\sum w_i u_i}{\sum w_i} \quad (6)$$

روش‌های ANFIS الگوریتم‌های یادگیری یونی که متشکل از ترکیبی از روش‌های حداقل مربعات هستند برای تنظیم پارامترهای خطی، همچنین گرادینان نزولی به کار می‌روند که برای تعیین پارامترهای منشور از آن استفاده می‌شود. از جعبه ابزار ANFISedit برای تولید (ANFIS-FIS) در نرم‌افزار متلب و از داده‌های آموزشی و آزمایشگاهی برای آموزش سیستم فازی عصبی تطبیقی استفاده می‌کنیم. مراحل دقیق طراحی ANFIS را می‌توانید در مرجع [۴۳] آمده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای مقایسه روش پیشنهادی و کنترل‌کننده فازی شبیه‌سازی‌ها در پنج مطالعه موردی در سیمولینک متلب انجام گرفته است. عملکرد طرح کنترل پیشنهادی با دو معیار ارزیابی عددی میانگین توان دوم انحرافات فرکانس ($RMS(\Delta f)$) و بیشترین اندازه انحرافات فرکانس ($\max(|\Delta f|)$) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۱- مطالعه موردی اول

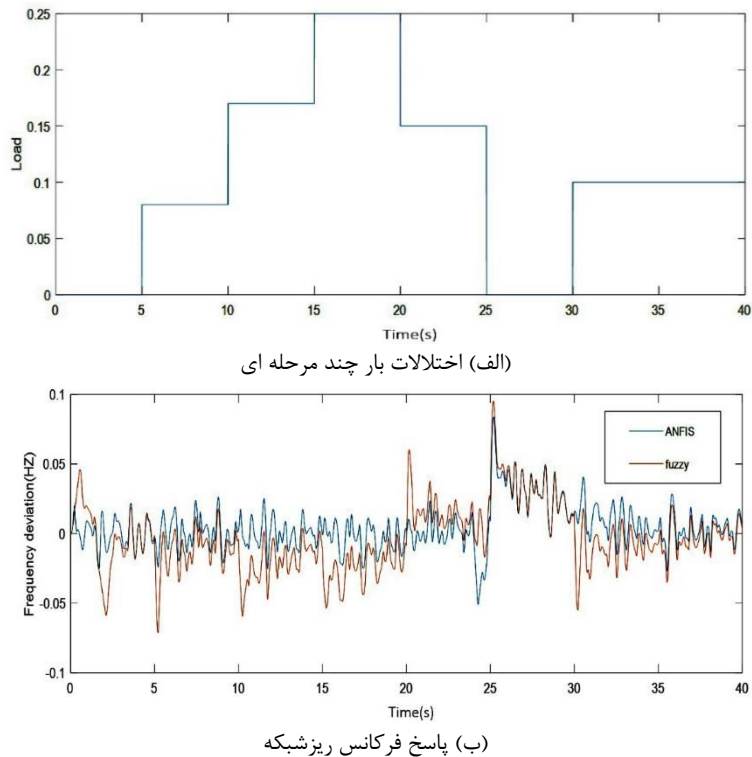
در این مطالعه برای نشان دادن پاسخ دینامیکی سیستم در مواجهه با اختلال بار چند مرحله‌ای (ΔPL) در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ثانیه مطابق با آنچه در شکل (۶-الف) دیده می‌شود به ریزش شبکه اعمال شده و پاسخ فرکانسی سیستم در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۶-ب) نشان داده می‌شود زمانی که از روش پیشنهادی ANFIS استفاده شده است نوسانات و انحرافات فرکانسی در مقایسه با کنترل‌کننده فازی کمتر خواهد بود. در نتیجه کنترل‌کننده پیشنهادی عملکرد مطلوبی در پاسخ فرکانسی دارد. نتایج نشان می‌دهند در روش پیشنهادی ANFIS مقادیر موثر (RMS) و ماکزیمم (\max) انحراف فرکانسی مطابق جدول (۶) به ترتیب ۴۲ و ۳۰ درصد نسبت به کنترل‌کننده فازی کاهش یافته است که بیان‌گر عملکرد مناسب روش پیشنهادی در کنترل فرکانس است.

۴-۲- مطالعه موردی دوم

در این مطالعه فرض می‌شود در زمستان ریزش شبکه چند حاملی با کمبود تولید باتوجه به افت شدید گاز و خارج شدن CHP از شبکه و در نتیجه کاهش فرکانس می‌گردد. در این مرحله به اغتشاش نسبتاً بزرگ به مقدار ۰/۲ پریونیت به‌عنوان تغییرات گاز (ΔG) در ۱۸ ثانیه به شبکه اعمال می‌گردد. نتایج این شبیه‌سازی، مقاوم بودن کنترل‌کننده‌های هوشمند فازی و ANFIS سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۷) نشان داده می‌شود که ANFIS عملکرد بهتری در کاهش انحرافات فرکانسی نسبت به فازی دارد. قابل ذکر است در این مطالعه مقادیر موثر (RMS) و ماکزیمم (\max) انحراف فرکانسی روش پیشنهادی نسبت به فازی به ترتیب ۴۹ و ۹۸ درصد کاهش یافته است.

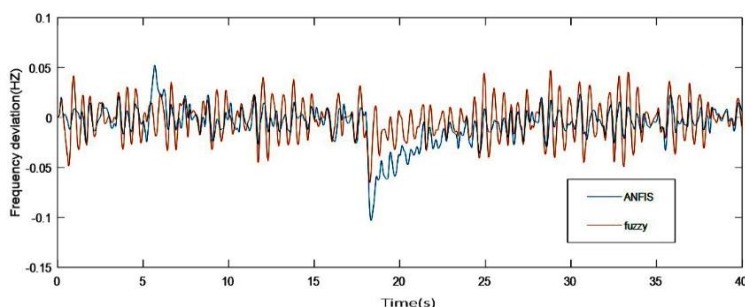
۴-۳- مطالعه موردی سوم

پارامترهای سیستم قدرت در طول زمان تغییر کرده و این امر ممکن است پاسخ فرکانسی سیستم را تحت تاثیر خود قرار دهد. مقاوم بودن در برابر تغییرات محیطی و دینامیکی مزیت روش‌های کنترل هوشمند است. در این مرحله پارامترهای عمده سیستم قدرت شامل ضریب میرایی (D)، ثابت اینرسی (H)، ثابت دروپ (R)، ثابت زمانی توربین (Tt)، ثابت زمانی ژنراتور (Tg)، ثابت زمانی باتری (T_{BESS})، ثابت زمانی فلاویل (T_{FESS})، در پاسخ فرکانسی مطابق جدول (۱) تغییر می‌کند. پس از اعمال این تغییرات در سیستم ریزش شبکه پاسخ فرکانسی حلقه بسته در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۶): پاسخ دینامیکی سیستم در برابر اختلالات

Figure (6): Dynamic response of the system against disturbances, a. Multistage load disturbances, b. MG frequency response



شکل (۷): پاسخ فرکانس تغییرات گاز

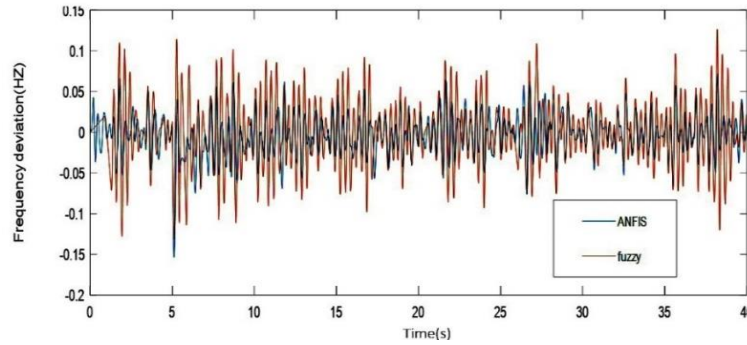
Figure (7): Frequency response of gas changes

اغتشاش پارامترهای اعمال شده در جدول (۵) در برابر تغییر پارامترهای سیستم قدرت بررسی شد و مقاومت مطلوب کنترل کننده پیشنهادی در برابر عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده به دست آمد. همچنین روش پیشنهادی میرایی بهتری نسبت به فازی دارد و عملکرد سیستم فرکانسی را بهبود می بخشد. نتایج در این بخش نشان می دهد در روش پیشنهادی مقادیر موثر و ماکزیمم انحراف فرکانسی به ترتیب به میزان ۵۳ و ۴۶ درصد نسبت به فازی کاهش یافته است.

Table (5): Parameters and variation range

جدول (۵): پارامترها و دامنه تغییرات

پارامتر	محدوده تغییرات	پارامتر	محدوده تغییرات
R	+۶۰٪	T_g	-۷۰٪
D	+۳۵٪	T_{FESS}	+۳۰٪
H	-۴۰٪	T_{BESS}	+۳۰٪
T_i	+۵۰٪	-	-

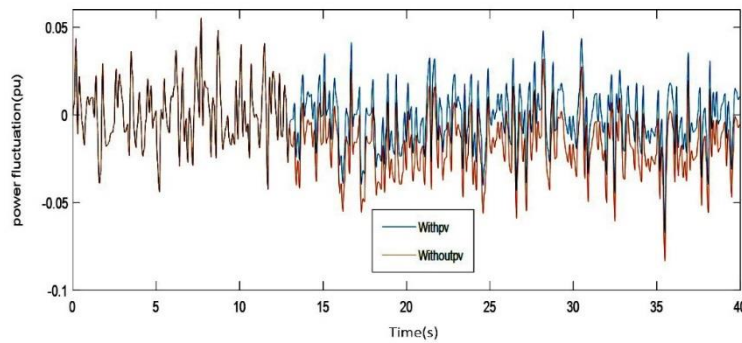


شکل (۸): پاسخ فرکانس با توجه به تغییرات پارامتر نشان داده شده در جدول (۵)
Figure (8): Frequency response according to the parameter changes shown in Table (5)

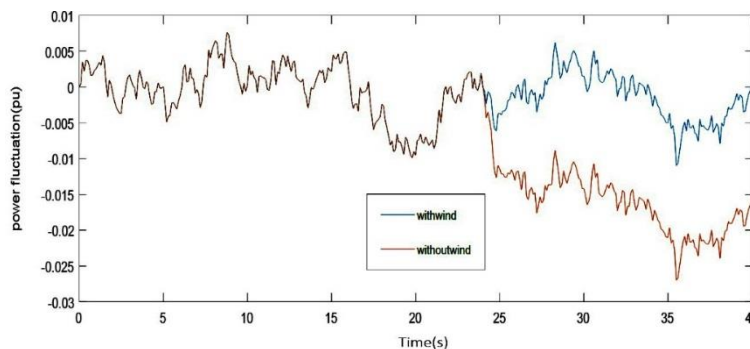
۴-۴ - مطالعه موردی چهارم

ریزشبکه مورد تحقیق دارای تولیدات تجدیدپذیر مانند توربین بادی و سلول‌های خورشیدی است. لذا در این مطالعه با توجه به عدم قطعیت این منابع اغتشاش اول در سیستم فتوولتائیک در ۱۳ ثانیه و اغتشاش دوم در سیستم توربین بادی در ۲۴ ثانیه اتفاق می‌افتد. پاسخ سیستم به تغییرات در توان تولیدی با حضور PV و بدون حضور PV و همچنین با حضور توربین بادی و بدون حضور توربین بادی در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۱) نشان می‌دهد روش کنترلی مبتنی بر ANFIS نسبت به روش فازی عملکرد بهتری در تنظیم انحرافات فرکانسی و در برابر اغتشاشات استحکام قابل قبولی دارد. همچنین مقادیر موثر و ماکزیمم انحراف فرکانسی در روش پیشنهادی به ترتیب ۴۳ و ۴۴ درصد نسبت به فازی کاهش یافته است.

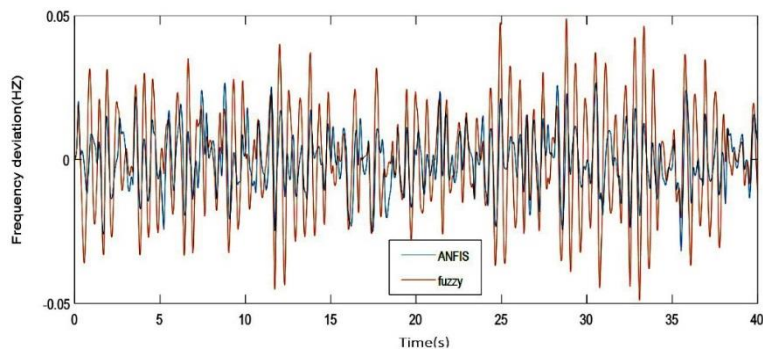
۴-۵ - مطالعه موردی پنجم



شکل (۹): توان خروجی با حضور و بدون حضور PV
Figure (9): Output power with and without PV



شکل (۱۰): توان خروجی با حضور و بدون حضور wind
Figure (10): Output power with and without wind



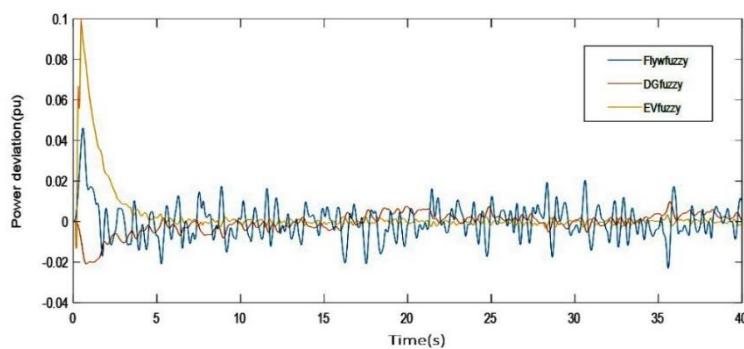
شکل (۱۱): مقایسه روش پیشنهادی ANFIS و کنترل کننده فازی از نظر انحراف فرکانس

Figure (11): Comparison of the proposed ANFIS method and fuzzy controller in terms of frequency deviation

در این مطالعه توان خروجی منابع تولیدی شامل فلاپویل، دیزل ژنراتور (DG) و خودروی الکتریکی توسط کنترل کننده فازی نسبت به کنترل کننده مبتنی بر ANFIS مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۱۲) توان خروجی منابع ذکر شده توسط کنترل کننده فازی و در شکل (۱۳) توان خروجی منابع توسط کنترل کننده ANFIS نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۳) نشان می‌دهد کنترل کننده هوشمند مبتنی بر ANFIS توان خروجی پایدارتری نسبت به کنترل کننده فازی دارد. در نتیجه روش پیشنهادی عملکرد مطلوبی در پایداری توان دارد.

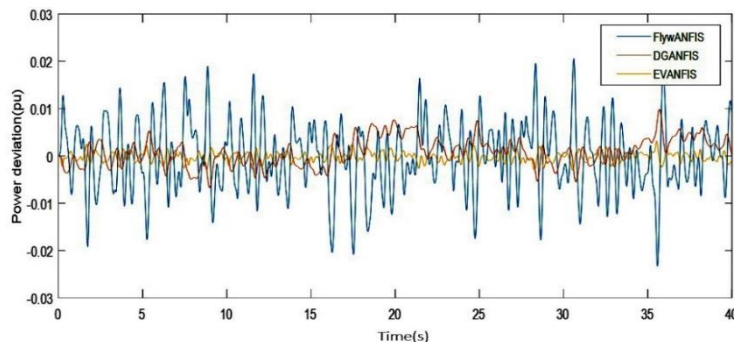
۴-۶- جمع بندی

عملکرد کنترل کننده ANFIS پیشنهادی و کنترل کننده فازی در پنج سناریو مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد تنظیم فرکانس در حضور عدم قطعیت‌ها مانند تغییرات بار، منابع انرژی تجدیدپذیر و تغییرات گاز و تغییرات پارامترهای سیستم قدرت و همچنین پایداری سیستم در برابر تغییرات توان خروجی به خوبی انجام می‌گیرد. روش پیشنهادی قادر است عملکرد مطلوبی داشته باشد و انحرافات فرکانس را به خوبی کاهش دهد.



شکل (۱۲): انحراف توان خروجی (Flywheel-DG-EVs); روش فازی

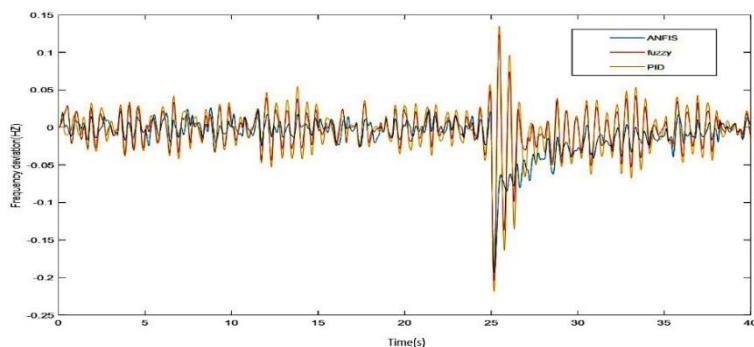
Figure (12): Output power deviation (Flywheel-DG-EVs); Fuzzy method



شکل (۱۳): انحراف توان خروجی (Flywheel-DG-EVs); روش ANFIS

Figure (13): Output power deviation (Flywheel-DG-EVs); ANFIS method

در پایان به منظور ارزیابی، روش پیشنهادی با روش‌های کنترلی در مرجع [۳۲] که از کنترل‌کننده فازی بهینه شده توسط الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده و در مرجع [۳۶] که از کنترل‌کننده FO-fuzzy-PID استفاده شده، مقایسه شده است. در شبیه‌سازی اغتشاشی به اندازه ۰/۳ پریونیت در ۲۵ ثانیه به ریزش شبکه اعمال می‌شود. شکل (۱۴) انحراف فرکانس روش پیشنهادی با روش‌های مرجع‌های [۳۲] و [۳۶] را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بیان‌گر عملکرد مطلوب روش پیشنهادی با روش‌های فوق در کاهش انحراف فرکانس و مقاوم بودن در برابر اغتشاشات است. همچنین مقادیر موثر (RMS) و ماکزیمم (max) انحراف فرکانس روش پیشنهادی با دو روش دیگر مطابق جدول (۱) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همان‌طور که دیده می‌شود در روش پیشنهادی مقادیر موثر و ماکزیمم انحراف فرکانس نسبت به مرجع [۳۲] به ترتیب ۱۶ و ۷۹ درصد و در مقایسه با مرجع [۳۶] به ترتیب به میزان ۲۲ و ۸۱ درصد کاهش یافته است. لذا با توجه به جدول (۷) عملکرد بهتر روش پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده‌های مرجع‌های [۳۲] و [۳۶] در تنظیم فرکانس مشاهده می‌شود.



شکل (۱۴): انحراف فرکانسی با استفاده از روش پیشنهادی و روش کنترلی در مرجع‌های [۳۲] و [۳۶]

Figure (14): Frequency deviation using the proposed method and control method in [36] and [32]

Table (6): RMS and maximum values of frequency deviation

جدول (۶): مقادیر موثر (RMS) و ماکزیمم (max) انحراف فرکانسی

مطالعه اول (RMS. pu)		مطالعه دوم (RMS. pu)		مطالعه سوم (RMS. pu)		مطالعه چهارم (RMS. pu)	
ANFIS	فازی	ANFIS	فازی	ANFIS	فازی	ANFIS	فازی
۰/۰۰۶۹	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۵۴	۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۰۴	۰/۰۲۱۹	۰/۰۰۶۱	۰/۰۱۰۶
مطالعه اول (max. pu)		مطالعه دوم (max. pu)		مطالعه سوم (max. pu)		مطالعه چهارم (max. pu)	
ANFIS	فازی	ANFIS	فازی	ANFIS	فازی	ANFIS	فازی
۰/۰۵۸۶	۰/۰۸۳۹	۰/۰۴۷۳	۰/۰۵۲۴	۰/۰۷۱۸	۰/۱۲۶۶	۰/۰۲۷۸	۰/۰۴۹۰

Table (7): RMS and maximum values of frequency deviation

جدول (۷): مقادیر موثر (RMS) و ماکزیمم (max) انحراف فرکانس

روش	مرجع [۳۲]	مرجع [۳۶]	روش پیشنهادی
پارامتر مقایسه			
مقدار موثر برحسب پریونیت	۰/۰۱۴۶	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۱۴
مقدار ماکزیمم برحسب پریونیت	۰/۱۲۶۵	۰/۱۳۴۸	۰/۰۲۶۴

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف کنترل فرکانس در ریزش شبکه چند-حاملی است. ریزش شبکه مورد مطالعه شامل عوامل غیرخطی است که رفتار سیستم را به رفتار واقعی آن نزدیک می‌کند. با توجه به این که ریزش شبکه ماهیت غیرخطی دارد، کنترل‌کننده‌های سنتی عملکرد ضعیفی در این شرایط دارند. لذا از کنترل‌کننده‌های هوشمند که عملکرد قابل قبولی در شرایط غیرخطی دارند استفاده می‌شوند. برای ساختار کنترلی دو سناریو طراحی شده که در سناریو اول CHP و DG به‌عنوان کنترل‌کننده‌های اصلی فرکانس ثانویه هستند و در سناریو دوم خودروی الکتریکی به‌عنوان ذخیره‌ساز چرخان مجهز به V2G توسط کنترل‌کننده پیشنهادی فازی عصبی ANFIS به‌صورت پشتیبان در فرکانس ثانویه شرکت می‌کند. نتایج در سیمولینک متلب نشان داد کنترل‌کننده پیشنهادی

مبتنی بر ANFIS عملکرد سیستم کنترلی را در پاسخ فرکانسی بهبود می‌بخشد و باعث کاهش انحرافات فرکانس مطلوب می‌گردد. روش پیشنهادی میرایی بهتری نسبت به کنترل‌کننده فازی دارد و عملکرد مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها و تغییرات پارامترهای سیستم قدرت دارد. در ضمن عملکرد مطلوبی در پایداری توان خروجی منابع تولید در ریزشبکه دارد. همچنین معیارهای مقدار موثر و مقدار ماکزیمم انحراف فرکانس مطابق جدول (۶) نشان داد که روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به فازی دارد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد کاشان است. نویسندگان بر خود الزام می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] T. Sun, J. Lu, Z. Li, D. L. Lubkeman, N. Lu, "Modeling combined heat and power systems for microgrid applications", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 5, pp. 4172-4180, Sept. 2018 (doi: 10.1109/TSG.201-7.2652723).
- [2] H. Wu, M. Shahidehpour, "A game theoretic approach to risk-based optimal bidding strategies for electric vehicle aggregators in electricity markets with variable wind energy resources", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 7, no. 1, pp. 374- 385, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TSTE.2015.2498200).
- [3] G. Haddadian, M. Khodayar, M. Shahidehpour, "Accelerating the global adoption of electric vehicles- barriers and drivers", Electricity Journal, vol. 28, no. 10, pp. 53-68, Dec. 2015 (doi: 10.1016/j.tej.2015.11.011).
- [4] A. Dán, C. Farkas, L. Prikler, "V2G effects on frequency regulation and under frequency load shedding in a quasi-islanded grid", Proceeding of the IEEE/ PowerTech, pp. 1-6, June. 2013 (doi: 10.1109/PTC.2013.6652-220).
- [5] K. Knezović, S. Martinenas, P.B. Andersen, A. Zecchino, M. Marinelli, "Enhancing the role of electric vehicles in the power grid: Field validation of multiple ancillary services", IEEE Trans. on Transportation Electrification, vol. 3, no. 1, pp. 201-209, March. 2017 (doi: 10.1109/TTE.2016.2616864).
- [6] M. Singh, P. Kumar, I. Kar, "Implementation of vehicle to grid infrastructure using fuzzy logic controller", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 565-577, March 2012 (doi: 10.1109/TSG.2011.2172697).
- [7] M. Datta, T. Senjyu, "Fuzzy control of distributed PV inverters/energy storage systems/electric vehicles for frequency regulation in a large power system", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 4, no. 1, pp. 479-488, March. 2013 (doi: 10.1109/TSG.2012.2237044).
- [8] H. Ali, G. Magdy, B. Li, G. Shabib, A.A. Elbaset, D. Xu, Y. Mitani, "A new frequency control strategy in an islanded microgrid using virtual inertia control-based coefficient diagram method", IEEE Access, vol. 7, pp. 16979-16990, 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2894840).
- [9] D. Yu, H. Zhu, W. Han, D. Holburn, "Dynamic multi agent-based management and load frequency control of PV/Fuel cell/wind turbine/CHP in autonomous microgrid system", Energy, vol. 173, pp. 554-568, April. 2019 (doi: 10.1016/j.energy.2019.02.094).
- [10] M. Jayachandran, G. Ravi, "Decentralized model predictive hierarchical control strategy for islanded ac microgrids", Electric Power Systems Research, vol. 170, pp. 92-100, May 2019 (doi: 10.1016/j.epsr.2019.0-1.010).
- [11] K.W. Joung, T. Kim, J. Park, "Decoupled frequency and voltage control for stand-alone microgrid with high renewable penetration", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 55, pp. 122-133, Jan/Feb. 2019 (doi: 10.1109/ICPS.2018.8369983).
- [12] C.T. Hsu, T.J. Cheng, H.M. Huang, Y.D. Lee, Y.R. Chang, J.L. Jiang, "Over frequency control of photovoltaic inverters in an island microgrid", Microelectronics Reliability, vol. 92, pp. 42-54, Jan. 2019 (doi: 10.1016/j.micorel.2018.11.011).
- [13] X. Xu, W. Hu, D. Cao, Q. Huang, C. Chen, Z. Chen, "Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system", Renewable Energy, vol. 147, pp. 1418-1431, March 2020 (doi: 10.1016/j.renene.2019.09.099).
- [14] B. Farahmand, M. Dehghani, N. Vafamand, "Fuzzy model-based controller for blood glucose control in type 1 diabetes: An LMI approach", Biomedical Signal Processing and Control, vol. 54, Article Number: 101627, Sept. 2019 (doi:10.1016/j.bspc.2019.101627).

- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] P.K. Ray, A. Mohanty, "A robust firefly–swarm hybrid optimization for frequency control in wind/PV/FC based microgrid", *Applied Soft Computing*, vol. 85, Article Number: 105823, Dec. 2019 (doi: 10.1016/j.asoc.2019.105823).
- [18] G. Agundis-Tinajero, J. Segundo-Ramírez, N. Visairo-Cruz, M. Savaghebi, J.M. Guerrero, E. Barocio, "Power flow modeling of islanded ac microgrids with hierarchical control", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105, pp. 28-36, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.002).
- [19] F.O. Hocaoglu, O.N. Gerek, M. Kurban, "The effect of model generated solar radiation data usage in hybrid (wind–PV) sizing studies", *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2956-2963, Dec. 2019 (doi: 10.1016/j.enconman.2009.07.011).
- [20] D. Qin, Q. Sun, R. Wang, D. Ma, M. Liu, "Adaptive bidirectional droop control for electric vehicles parking with vehicle-to-grid service in microgrid", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 793-805, Dec. 2020 (doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.00310).
- [21] U.C. Prusty, P.C. Nayak, R.C. Prusty S. Panda, "Impact of vehicle to grid mode electric vehicles in standalone microgrid for frequency regulation", *Proceeding of the IEEE/ISSC*, pp. 1-6, Gunupur Odisha, India, Dec. 2020 (doi: 10.1109/iSSC50941.2020.9358834).
- [22] M. H. Khooban, T. Niknam, F. Blaabjerg, T. Dragičević, "A new load frequency control strategy for microgrids with considering electrical vehicles", *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 585-598, Feb. 2017 (doi: 10.1016/j.epr.2016.10.057).
- [23] S. Iqbal, A. Xin, M.U. Jan, S. Salman, A.U.M. Zaki, H.U. Rehman M.F. Shinwari, M.A. Abdelbaky, "V2G strategy for primary frequency control of an industrial microgrid considering the charging station operator", *Electronics*, vol. 9, no. 4, p. 549, March 2020 (doi: 10.3390/electronics9040549).
- [24] H. Fan, L. Jiang, C.K. Zhang, C. Mao, "Frequency regulation of multi-area power systems with plug-in electric vehicles considering communication delays", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 14, pp. 3481-3491, Nov. 2016 (doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0108).
- [25] W. Yan, L. Sheng, D. Xu, W. Yang, Q. Liu, " H_∞ robust load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system", *Applied Sciences*, vol. 8, no. 10, Article Number: 1748, Sept. 2018 (doi: 10.3390/app8101748).
- [26] Y. Xu, C. Li, Z. Wang, N. Zhang, B. Peng, "Load frequency control of a novel renewable energy integrated micro-grid containing pumped hydropower energy storage", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 29067-29077, April 2018 (doi: 10.1109/ACCESS.2018.2826015).
- [27] P. Ivanova, O. Linkevics, A. Sauhats, "Cost-benefit analysis of CHP plants taking into account air cooling technologies", *Proceeding of the IEEE/EEEIC*, pp. 1-6, Milan, Italy, June 2017 (doi: 10.1109/EEEIC.2017.79-77404).
- [28] S. Murali, R. Shankar, P. Aryan, "A novel optimization technique for LFC and virtual inertia emulation of a multi area hybrid power system", *Proceeding of the IEEE/ICEFEET*, pp. 1-6, Patna, India, July 2020 (doi: 10.1109/ICEFEET49149.2020.9186998).
- [29] 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, 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3021212).
- [30] D. Mohanty, S. Panda, "Robust frequency control of hybrid power system with EV and HP", *Proceeding of the IEEE/ICEPE*, pp. 1-5, Shillong, Meghalaya, India, March 2021 (doi: 10.1109/ICEPE50861.2021.940437-2).
- [31] H. Lund, W. Kempton, "Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G", *Energy Policy*, vol. 36, no. 9, pp. 3578-3587, Sept. 2008 (doi: 10.1016/j.enpol.2008.06.007).
- [32] S.F. Aliabadi, S.A. Taher, M. Shahidehpour, "Smart deregulated grid frequency control in presence of renewable energy resources by EVs charging control", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1073-1085, March. 2018 (doi: 10.1109/TSG.2016.2575061).
- [33] M.U. Jan, A. Xin, M.A. Abdelbaky, H.U. Rehman, S. Iqbal, "Adaptive and fuzzy PI controllers design for frequency regulation of isolated microgrid integrated with electric vehicles", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87621-87632, Jan. 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993178).
- [34] S. Amamra, J. Marco, "Vehicle-to-Grid aggregator to support power grid and reduce electric vehicle charging cost", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 178528-178538, 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2958664).

- [35] S. Kumar, K.K. Jaladi, "Grid connected electric vehicle charging station using PV source", Proceeding of the IEEE/ICMICA, pp. 1-4, Kurukshetra, India, June 2020 (doi: 10.1109/ICMICA48462.2020.9242806).
- [36] A. Annamraju, S. Nandiraju, "Robust frequency control in a renewable penetrated power system: An adaptive fractional order-fuzzy approach", Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 4, no. 1, p. 16, Dec. 2019 (doi: 10.1186/s41601-019-0130-8).
- [37] X. Liu, Y. Zhang, K.Y. Lee, "Coordinated distributed MPC for load frequency control of power system with wind farms", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 5140-5150, June 2017 (doi: 10.1109/TIE.2016.2642882).
- [38] X. Kong, X. Liu, L. Ma, K.Y. Lee, "Hierarchical distributed model predictive control of standalone wind/solar/battery power system", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 49, no. 8, pp. 1570-1581, Aug. 2019 (doi: 10.1109/TSMC.2019.2897646).
- [39] W. Eshetu, P. Sharma, C. Sharma, "ANFIS based load frequency control in an isolated micro grid", Proceeding of the IEEE/ICIT, pp. 1165-1170, Lyon, France, Feb. 2018 (doi: 10.1109/ICIT.2018.8352343).
- [40] J. Yang, Z. Zeng, Y. Tang, J. Yan, H. He, Y. Wu, "Load frequency control in an isolated micro grid system with electric vehicles based on MGPT", Energies, vol. 8, no. 3, pp. 2145-2164, Mar. 2015 (doi: 10.3390/en8-032145).
- [41] J.S.R. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, May/June 1993 (doi: 10.1109/21.256541).
- [42] N. Mathur, I. Glesk, A. Buis "Comparison of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and Gaussian processes for machine learning (GPML) algorithms for the prediction of skin temperature in lower limb prostheses", Medical Engineering and Physics, vol. 38, no. 10, pp. 1083-1089, Oct. 2016 (doi: org/10.1016/j.medengphy. 2016.07.003).
- [43] S. Prakash, A.K. Bhardwaj, S.K. Shinha "Neuro fuzzy hybrid intelligent approach for four-area load frequency control of interconnected power system", Proceeding of the IEEE/ ICPCES, pp. 1-7, Allahabad, India, Dec. 2012 (doi: 10.1109/ICPCES.2012.6508124).
- [44] C. Mu, Y. Tang, H. He, "Observer-based sliding mode frequency control for micro-grid with photovoltaic energy integration", Proceeding of the IEEE/PESGM, pp. 1-5, Boston, MA, USA, July 2016 (doi: 10.1109/PESGM.2016.7742001).
- [45] M. Tavakoli, E. Poursmaeil, 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 (doi: 10.1109/PESGM. 2016.7742001).

زیر نویس‌ها

1. Micro grid (MG)
2. Distributed energy resources (DER)
3. Combined heat and power (CHP)
4. Photo-voltaic (PV)
5. Electric vehicle (EV)
6. Controller diagram method (CDM)
7. Multi-input and single-output (MISO)
8. Model predictive control (MPC)
9. Linear matrix inequalities (LMI)
10. Load frequency control (LFC)
11. Firefly and particle swarm optimization (FF PSO)
12. Electric vehicle (EV)
13. General type-2 fuzzy logic (GT2FL)
14. Plugin electric vehicle (PEV)
15. Hybrid energy storage system (HESS)
16. Pumped hydropower energy storage (PHES)
17. Opposition based volleyball premier league (OVPL)
18. Atom search optimization
19. Fractional order proportional integral derivative (FOPID)
20. Heat pump system (HPS)
21. Battery energy system (BES)
22. Distributed model predictive control (DMPC)
23. Hierarchical distributed model predictive control (HDMPC)
24. Diesel generator (DG)
25. Artificial neural networks (ANN)
26. Fuzzy inference system (FIS)