مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۳۱-۱۱۹

بهبود میرایی نوسانات فرکانس ریزشبکه با کاهش مقادیر تاخیر سیستم مخابراتی و اینرسی مجازی

توحید رحیمی[۱و۲]، غلامعلی علیزاده[۳]، حسن بابایی نوزادیان[۴]

[۱] فارغ التحصیل دکتری تخصصی،دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، rahimitohid@tabrizu.ac.ir

[۲] محقق پسادکتری، دانشکده مهندسی برق ، دانشگاه شاندونگ، جینان، چین، rahimitohid@sdu.edu.cn

[۳]دانشگاه فنی و حرفه ای ارومیه، دانشکده قاضی طباطبایی، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، Alizadeh_8@yahoo.com

[۴] فارغ التحصیل دکتری تخصصی،دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، m.hasanbabay@tabrizu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۶ ویرایش اول : ۱۳۹۷/۰۹/۲۴ ویرایش دوم : ۱۳۹۸/۰۷/۰۸ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

چکیده: ریز شبکه‌ها به دلیل توسعه بسترهای مخابراتی و تجهیزات تولید و ذخیره توان و بهره مندی بالا از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه هستند. ولی ریزشبکه‌ها به دلیل نوسانات بالای تولید توان منابع تجدیدپذیر با مشکل نوسانات فرکانس در حالت جدا از شبکه روبرو هستند. در این مقاله، جهت غلبه بر چالش یادشده، از ابرخازن برای افزایش اینرسی مجازی شبکه به همراه سیستم کنترلی برای سیستم های تولید و ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده‌است. در ضمن مقدار بهینه تاخیر سیستم‌های مخابراتی نیز در تنظیم فرکانس ریزشبکه نیز در نظر گرفته شده است. جهت ارزیابی عملکرد استراتژی پیشنهادی، رفتار فرکانسی سیستم در برابر تغییرات بار و تولید مورد شبیه سازی واقع شده‌است. با توجه به افزایش هزینه سیستم به دلیل افزایش ظرفیت ابرخازن و کاهش تاخیر سیستم‌های مخابراتی در مقابل بهبود نوسانات فرکانس ریزشبکه، دو روش بهینه‌سازی چندهدفه به منظور کنترل فرکانس بار (LFC) در کنار حداقل افزایش هزینه استفاده شده‌است. شبیه‌سازی‌های شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار متلب/سیمولینک انجام پذیرفته است. در این مقاله، توجه به کاهش هزینه‌های سیستم ناشی از پایین بودن ظرفیت واحد ابرخازن نصب شده و سیستم‌های مخابراتی با تاخیر قابل قبول، از مهم‌ترین ابعاد نوآوری پژوهش صورت گرفته می‌باشد. در این مقاله، به دلیل حضور ابرخازن، دیگر نیازی به واحد های باتری نیست. باتری‌ها به دلیل عمر پایین و هزینه نگه‌داری بالا برای شبکه مشکلاتی را ممکن است ایجاد کنند. نتایج شبیه سازی نشان داده است که سیستم با مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی، ظرفیت ابرخازن و تاخیر سیستم مخابراتی به خوبی توانسته است بر اغتشاشات بار و تولید غلبه کند و رفتار فرکانسی سیستم بهبود قابل توجهی نسبت به وضعیت غیر بهینه دارد.

کلمات کلیدی: ریزشبکه، بهینه سازی چند هدفه، تاخیر سیستم مخابراتی، اینرسی مجازی، کنترل فرکانس بار

Improving the Frequency Fluctuations Attenuation of Microgrid by Determining Optimal communication System Delay and Virtual Inertia Values

Tohid Rahimi[1,2], Gholam Ali Alizadeh [3], Mohsen Hasan Babayi Nozadian [4]

Abstract: Micro grids are regarded to be crucial due to the development of communication facilities, production equipment, power storage and high utilization of renewable energy. However, micro grids are faced with the problem of frequency fluctuations in island mode because of high fluctuations in the production power of renewable sources. In this paper, the super capacitor has been used to increase the virtual inertia of the network along with the control system for energy storage and production systems in order to overcome the challenge mentioned earlier. Meanwhile, the optimal value of communication systems delay is also considered in the frequency settings of the micro grid.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

The system frequency behavior is simulated against load and power generation variations to evaluate the performance of the proposed strategy. Given the increased cost of the system due to increased super capacitor capacity and the reduction of communication delay against the improvement of micro grid frequency fluctuations, a multi-objective optimization method is used to regulate the load frequency (LFC) controllers parameters and achieve minimum cost. The simulations of the network in question have been carried out in MATLAB / SIMULINK software. In this article, the cost reduction of operation of the microgrid due to the low capacity of the installed supercapacitor unit and communication systems with acceptable delay achievement are the most important innovational aspects of the current research. Furthermore, no battery units are required in the current paper thanks due to the presence of the supercapacitor. Batteries may cause problems for the network due to their low life and high maintenance costs. Simulation results have demonstrated that the system with optimal control parameters values, super capacitor capacity and communication s system delay has been able to overcome load and power generation disturbances, and the system frequency behavior is significantly improved in comparison with the non-optimal state.

Keywords: Micro grid, Multi-objective Optimization, Telecom System Delay, Virtual Inertia, Load Frequency Control

۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها شبکه‌های کوچکی هستند که متشکل از بارها، منابع انرژی تجدیدپذیر، منابع ذخیره ساز انرژی به همراه بسترهای مخابراتی می‌باشند[۱و۲]. این شبکه‌ها به دلیل وجود انواع منابع تولیدپراکنده و ذخیره‌ساز انرژی از صدمات ناشی از خطای شبکه بالادستی در امان هستند[۳و۴]. امکان ذخیره‌سازی، خرید و فرو ش انرژی در زمان‌های مختلف توجیه اقتصادی ریزشبکه‌ها را افزایش می‌دهد. این شبکه‌ها به دلیل قابلیت اطمینان بالا برای کاربردهای حیاتی نظیر بیمارستان و شبکه‌های با نیازمندی سطح قابلیت اطمینان بالا مناسب هستند و خطرات ناشی از حوادث و اتفاقات طبیعی در این شبکه‌ها با کاهش روبرو است [۵].

در دنیای امروز، کاهش گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته از واحدهای تولید توان فسیلی توجه ویژه‌ای شده است. ولی کاهش قابل توجه این آلاینده‌ها از واحد های حمل و نقل و گرمایی در شرایط امروز و آینده هنوز میسر نیست. جوامع مدرن به سمت استفاده از منابع انرژی‌های تجدید پذیر (RESs[1]) حرکت می‌نماید[۶]. این منابع دارای ظرفیت کوچکی هستند و لذا عموما در سطح ولتاژ توزیع به شبکه متصل می‌شوند. به دلیل توسعه تجهیزات الکترونیک قدرت با بهره ولتاژ بالا و سطح قابلیت اطمینان مناسب [۱۱-۷]، امکان اتصال این منابع با ظرفیت‌های توانی بالا مهیا شده است.

ورود تکنولوژی‌های انرژی‌های تجدیدپذیر به شبکه‌های برق، چالش‌های بزرگی را برای سیستم‌های کنترلی دارد. در یک ریزشبکهٔ مبتنی بر انرژیهای نو، منابع توسط ادوات الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند. بنابراین رژیم ترانزیستوری حاکم بوده و ممان اینرسی کم منابع فرصت بسیار کمتری برای مقابله با اغتشاشات فراهم می‌کنند. بدین ترتیب یکی از مسائل مهم در ریزشبکه‌های منفصل کنترل توان و فرکانس است. عدم تعادل توان تولیدی و مصرفی باعث انحراف و تغییر فرکانس می‌شود[۱۲] و ممکن است به بارهای حساس به فرکانس آسیب جدی وارد آید که این وضع با حضور انرژی‌های تجدیدپذیر بدتر نیز می‌شود. منابع انرژی تجدیدپذیر دارای حالت تولید غیرمطمین و نوسانی است[۱۳]. این منابع با ریزشبکه تجمیع شده‌اند و سیستم‌های قدرت آینده را تشکیل می‌دهند. با افزایش سطح منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبکه، پایداری سیستم ممکن است تحت شعاع قرار گیرد. فرکانس یکی از شاخص‌های پایداری در شبکه های قدرت است. کنترل فرکانس بار در ریزشبکه ضروری است[۱۴و۱۵]. مهم‌ترین منابع انرژی در ریزشبکه، منابع انرژی تجدیدپذیر با ویژگی تصادفی است. این نوسانات سبب از دست رفتن پایداری می شود. خوشبختانه، واحدهای ذخیره‌ساز انرژی قابلیت کارکرد به صورت منبع توان و یا بار را دارا می‌باشند که تا با جذب و یا اخد توان به میرایی نوسانات فرکانس کمک کنند[۲۰-۱۶].

کلانتر و موسوی رفتار دینامیکی یک سیستم ترکیبی شامل توربین بادی، میکروتوربین، آرایهٔ خورشیدی و باتری را براساس الگوریتم ژنتیک و کنترل کنندهٔ فازی مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۱]. گوا و همکاران به صورت تجربی و آزمایشگاهی توپولوژی اکتیوی را در جهت کنترل سیستم ترکیبی دیگری شامل باتری و سلول سوختی معرفی کرده‌اند [۲۲]. نویسندگان در مرجع [۲۳]، روش کنترل فرکانس PI را در یک شبکه محلی ترکیبی فتوولتائیک/توربین بادی/سلول سوختی/ابرخازن پیاده سازی کرده‌اند. به این صورت که برای هر منبع یک کنترل کنندهٔ PI در نظر گرفته شده‌است که با دریافت انحراف فرکانس، توان مرجع تولیدی هر واحد را جهت تثبیت فرکانس تعیین می‌کند. در [۲۴]، یک مجموعه فازی یا الگوریتم جستجوی هارمونی جهت تنظیم ضرایب کنترلر PI در ریزشبکه در حضور خودوری برقی معرفی شده‌است. در [۲۵]، از سیستم کنترلی فازی- pid بهینه شده به منظور غلبه بر نوسانات فرکانس ریزشبکه در برابر نامعینی‌های بار و تولید استفاده است. در مراجع [۲۶و۲۷]، در

[1] renewable energy sources

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

شبکه‌های قدرت مورد مطالعه، از ابرخازن به منظور بهبود میرایی نوسانات فرکانس استفاده شده‌است. این بهبود در میرایی نوسانات فرکانس با مفهوم اینرسی مجازی مطرح شده‌است. وجود ابرخازن می‌تواند نقش مهمی در کاهش ظرفیت باتری‌های نصب شده در شبکه داشته باشد. در شبکه‌هایی که منابع ذخیره‌ساز و تولید توان دیگری موجود باشد، می‌توان از ابرخازن استفاده نمود.

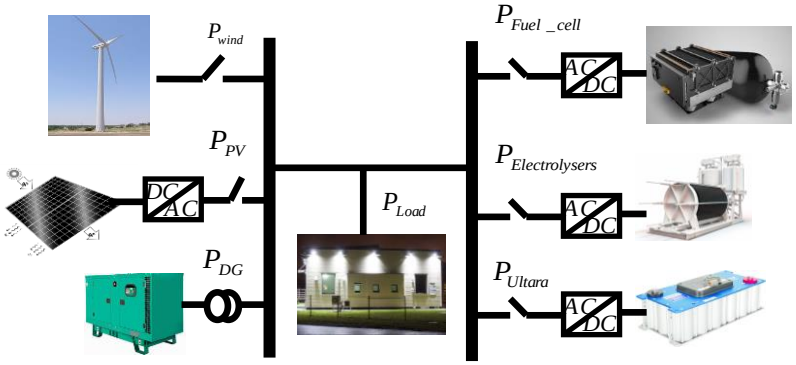
برای عملکرد پایدار ریزشبکه، باید تعادلی بین تقاضا و تولید به صورت زمان حقیقی برقرار باشد تا فرکانس در مقدار نامی خود ثابت باشد. این وظیفه با استفاده از مکانیزم کنترلی فرکانس بار ممکن است. کنترلر مرکزی ریزشبکه بار مورد نیاز را بین منابع تولید توان تقسیم می‌کند و فرکانس سیستم را در مقدار نامی حفظ می‌کند. با توسعه سیستم‌های محاسباتی و مخابراتی، رسانه‌های ارتباطی برای تبادل توان بین واحد پردازنده مرکزی و بارها استفاده می‌شود. البته با ورود شبکه‌های مخابراتی در حلقه کنترلی، تاخیر زمانی بین تبادل اطلاعات و از دست رفتن برخی اطلاعات زمان واقعی می‌شود. پایداری سیستم کنترل فرکانسی با حضور تاخیر زمانی توسط پژوهشگران بررسی شده‌است [۲۸]. دو روش برای بحث پایداری ریزشبکه وجود دارد: کنترلر مرکزی، کنترلر محلی. پایداری فرکانس با کنترلر غیرمرکزی نیز مهیا است. برای مثال، روش کنترل دروپ غیر مرکزی با تنظیم توان حقیقی و راکتیو تلاش می‌کند که فرکانس و ولتاژ شبکه را تثبیت نماید[۲۹].کنترل نوسانات فرکانس نیازمند دریافت اطلاعات فرکانس و توان ریزشبکه است و بر روی شبکه‌های مخابراتی با پهنای باند پایین استوار است و نیازمند به روز رسانی اطلاعات ولتاژ و فرکانس است.

تنظیم فرکانس و کاهش هزینه‌ها از بحث‌های متداول در حوزه ریزشبکه‌ها می‌باشد. تنظیم فرکانس برای کسری از ثانیه تا چند ثانیه مورد بحث قرار می‌گیرد. تجهیزات نصب شده در ریزشبکه به منظور حصول به شبکه‌ای پایدار دارای هزینه نصب و نگه‌داری در طولانی مدت هستند. این دو مبحث به خصوص بحث تنظیم فرکانس در چهارچوب‌های مختلف کنترلی مورد توجه بوده‌اند. بایستی در کنار تنظیم فرکانس، ظرفیت تجهیزات نصب شده حداقل باشد تا سیستم در دراز مدت متحمل هزینه‌های بالایی نشود. برای بهبود رفتار فرکانسی ریزشبکه، نیازمند بسترهای مخابراتی با حداقل تاخیر بروزرسانی اطلاعات و ظرفیت بالای ذخیره سازهای انرژی به خصوص ابرخازن است که سبب افزایش هزینه بهره برداری از ریزشبکه‌ها خواهد شد. لذا در این مقاله، با روش بهینه‌سازی چند هدفه، ظرفیت ابرخازن به عنوان اینرسی مجازی در کنار مقدار تاخیر سیستم مخابراتی به عنوان تنزل دهنده عملکرد سیستم کنترل فرکانس بار در کنار مقادیر بهینه ضرایب کنترلرها مورد توجه قرار گرفته است.

۲- شبکه مورد مطالعه

در اینجا، یک سیستم ریزشبکه جدا از شبکه سراسری، به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است . این سیستم جدا شده از شبکه ، شامل واحدهای تولید، ذخیره‌ساز و پیکربندی مخابراتی است. واحد دیزل ژنراتور، واحد پیل سوختی، واحد خورشیدی و واحد بادی وظیفه تولید توان را بر عهده دارند. واحد الکترولیزور نیز برای جذب توان اضافی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از ابرخازن نیز برای تولید و یا جذب سریع توان به منظور افزایش اینرسی مجازی شبکه استفاده شده است. کنترلر مرکزی برای این‌که فرمان مناسب به واحدهای تولید و جذب توان ریزشبکه بدهد، نیازمند اطلاعات فرکانس می‌باشد. اطلاعات فرکانس توسط بستر مخابراتی با تاخیر زمانی مشخصی صادر می شود که بر پایداری ریزشبکه بسیار موثر است. ریزشبکه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، واحدهای کوچک توان توسط واسط‌های الکترونیک قدرتی به ریز شبکه وصل می‌شوند، که این واسط‌ها برای همگام‌سازی (سنکرون کردن) منابع تولید توان با خروجی متناوب و به منظور معکوس کردن ولتاژ در منابع DC مانند پنل های خورشیدی ، پیل های سوختی ، و وسایل ذخیره کننده انرژی ، بکار می‌روند

هر منبع کوچک دارای یک بریکر می‌باشد ، تا از اثرات اختلالات شدید به ریزشبکه، یا به دلایل تعمیر و نگهداری، بتوان آن را از شبکه جدا کرد . لزوما ،یک مقدار خاصی از توان تولید شده توسط DEG ، بعنوان ذخیره‌سازی برق به هنگام کم‌باری برای کنترل فرکانس ثانوی ، در نظر گرفته می‌شود .



شکل ۱: دیاگرام تک خطی ریزشبکه مورد مطالعه با اعمال تاخیر سیستم مخابراتی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

۲-۱ مدل‌سازی منبع توان دیزل ژنراتور

دیزل ژنراتور می‌تواند با استفاده از گاورنر و سیستم دروپ سرعت به تعقیب توان مورد نیاز ریزشبکه بپردازد. گاورنر با تنظیم مکانیزم دریچه سوخت به کنترل سوخت ورودی به موتورسوختی می‌پردازد. موتور بنزینی یا گازوئیلی به عنوان توربین عمل می‌کند و یک ژنراتور سنکرون را حرکت می‌دهد. گاورنر دیزل ژنراتور می‌تواند با یک تابع تبدیل مرتبه اول قابل مدل‌سازی است که در معادله (۱) توضیح داده شده است[۳۰].

$$G_{dgs}(s)=\frac{1}{1+sT_{dgs}} \qquad (۱)$$

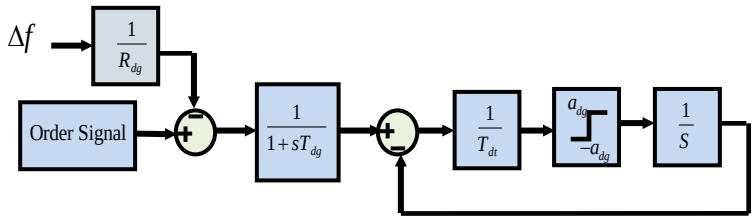
به طور مشابه، توربین این ژنراتور نیز با تابع تبدیل مرتبه اول مدل سازی می‌شود.

$$G_{dt}(s)=\frac{1}{1+sT_{dt}} \qquad (۲)$$

به دلیل عملکرد سری واحد مکانیکی و الکتریکی دیزل ژنراتور، تابع تبدیل کلی یک دیزل ژنراتور به صورت زیر خواهد بود:

$$G_{dgt}(s)=\frac{1}{1+sT_{dgs}}\times\frac{1}{1+sT_{dt}} \qquad (۳)$$

با توجه به فرمان مرجع تولید توان که با توجه به اطلاعات فرکانس مخابره شده، این واحدها توان لازم را تولید می‌کنند. وقتی فرمان تولید به دیزل ژنراتور صادر می‌شود، به دلیل تاخیر ذاتی سیستم‌های مکانیکی و محدودیت نرخ تولید (GRC)، تولید مطلوب به طور آنی به دست نمی‌آید. لذا این محدودیت نیز در مدل دینامیکی دیزل ژنراتور نیز اعمال شده‌است. مدل دینامیکی کامل دیزل ژنراتور در شکل (۲) نشان داده شده‌است.



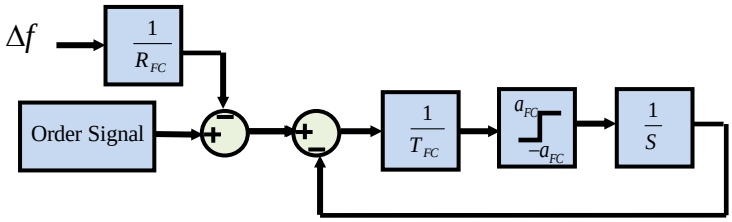
شکل ۲: مدل دینامیکی دیزل ژنراتور مورد استفاده در ریزشبکه مورد مطالعه

۲-۲ پیل سوختی

یکی از تجهیزات تولید توان استاتیک که انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در هیدروژن را به انرژی الکتریکی DC تبدیل می‌کند، پیل سوختی است. وقتی توان تولیدی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر کمتر از توان مورد نیاز بارهای الکتریکی باشد و یا میزان مصرف بارها در پیک خود باشد، پیل سوختی با تزریق هیدروژن ذخیره شده در تانک هیدروژن خود شروع به تولید توان می‌کند. از آن‌جایی که در نهایت عملکرد نهایی این سیستم شبیه به اینورتر منبع ولتاژی است لذا تابع تبدیل این منبع توان به صورت مدل مرتبه اول خواهدبود[۳۰].

$$G_{fc}(s)=\frac{1}{1+sT_{fc}} \qquad (۴)$$

محدودیت تولید و نرخ افزایش توان برای پیل سوختی نیز حاکم است. لذا مدل دینامیکی پیل سوختی در شکل (۳) نمایش داده شده‌است.



شکل ۳: مدل دینامیکی پیل سوختی مورد استفاده در ریزشبکه مورد مطالعه

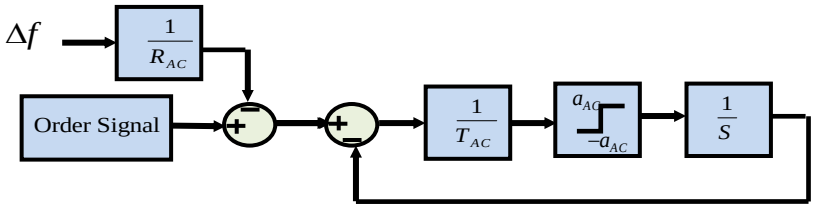
۲-۳ الکترولیزو آب

الکترولیزور آب تجهیزی برای ذخیره سازی انرژی اضافی انرژی‌های تجدیدپذیر است. تجزیه آب به هیدرژون و اکسیژن با گذراندن جریان بین دو الکترود جداشده از هم انجام می‌شود. هیدروژن تولید شده در واکنش شیمیایی در یک تانک ذخیره می‌شود و به عنوان سوخت برای پیل سوختی برای ارضای تقاضای بار استفاده شود. یک واحد الکترولیزو آب به عنوان یک منبع ولتاژ DC عمل می‌کند و نیازمند یک اینورتر VSC برای اتصال به ریزشبکه است. درنتیجه، تابع انتقال یک اکترولیزور به صورت رابطه زیر خواهدبود[۳۰].

$$G_{AE}(s)=\frac{K_{AE}}{1+sT_{AE}} \qquad (۵)$$

همانند دو واحد دیزل ژنراتور و پیل سوختی، محدودیت نرخ تولید توان برای الکترولیزور آب نیز صادق است. شکل (۴) مدل دینامیکی الکترولیزور را نشان می‌دهد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]



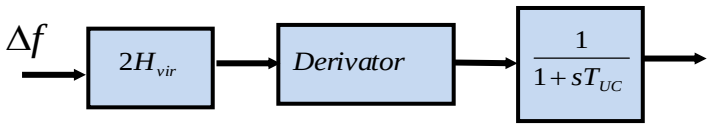
شکل ۴: مدل دینامیکی الکترولیزور مورد استفاده در ریزشبکه مورد مطالعه

۲-۴ مدل منابع انرژی تجدیدپذیر

در مورد سیستم تبدیل توان بادی و واحدهای خورشیدی، فرض می‌شود که روش تعقیب حداکثر توان برای این منبع اعمال می‌شود. لذا با اعمال این استراتژی کنترل‌پذیری بر روی تولید توان بادی ممکن نخواهدبود. این سیستم‌ها به صورت تولید مشخص در ریزشبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۵ ابرخازن

ابرخازن‌ها با تزریق و یا جذب توان، نقش مهمی درافزایش اینرسی مجازی شبکه دارند. توان تبادلی این واحدها با شبکه با مشتق نوسانات فرکانس رابطه مستقیم دارد. این واحدها دارای تاخیر بسیار اندکی هستند. لذا مدل دینامیکی ابرخازن‌ها با شکل (۵)، قابل ترسیم است [۲۷].



شکل ۵: مدل دینامیکی ابرخازن مورد استفاده در ریزشبکه مورد مطالعه

۲-۶ تاخیر سیستم مخابراتی

سیستم مخابراتی برای ارسال اطلاعات شبکه به کنترلر مرکزی استفاده می‌شود. در ضمن برای ارسال اطلاعات توان تولیدی توان هر واحد نیز بهره برداری می‌شود. کلیه تاخیرهای موجود در واحدهای ارتباطی به صورت تابع مرتبه اول مدل سازی می‌شود که در رابطه (۶) بیان شده‌است.

$$G_{Commu}(s)=\frac{1}{1+sT_{commu}} \qquad (۶)$$

۳- سیستم کنترلی ریزشبکه

در این بخش، اجزای دینامیکی ریزشبکه به همراه واحدهای کنترلی توضیح داده می‌شود. ساختارکنترلی بر مبنای جبران‌سازی تغییرات بار به منظور تثبیت فرکانس است. برای جبران سازی بار نیاز است که میزان نوسانات بار مشخص شود. تاثیر نوسانات بار در تغییرات توان و فرکانس خود را نشان می‌دهد. لذا با فیدبک گرفتن از دو سیگنال فرکانس و تغییرات توان حقیقی و به دنبال آن استفاده از جبران‌سازهای مناسب به میرایی نوسانات فرکانس پرداخت. درمطالعات فرکانسی، یکی از روش‌ها استفاده از مدل‌های دینامیکی ریزشبکه و اجزای آن است که در بخش قبل این مدل‌ها تشریح شده است. این مدل‌ها در کنار یکدیگر به همراه سیستم‌های کنترلی به منظور درک بهتر از وضعیت سیستم بایستی نمایش داده شود.

در این مقاله، از روش کنترلر مرکزی برای پیاده سازی سیستم کنترلی ریزشبکه استفاده شده است. کنترلر مرکزی دارای عملکرد بهتری نسبت به کنترلر توزیع یافته است ولی با افزایش تعداد منابع قابل کنترل، هزینه پیاده سازی آن بالا خواهد بود. در این نوع سیستم کنترلی، تاخیر سیستم مخابراتی تاثیر بالایی در کنترل فرکانسی دارد. لذا انتخاب مقدار بهینه‌ای از تاخیر سیستم مخابراتی برای این ریزشبکه به شدت مورد اهمیت است.

در تشریح روش کنترل فرکانس بار در این مقاله، بایستی دو قانون در نظر گرفته شود. این قوانین بر اساس بهبود رفتار فرکانسی ریزشبکه و عدم دخالت منابع غیرضروروی در رفتار فرکانسی ریزشبکه است. در شرایطی که میزان مصرف توان بار ریزشبکه از میزان تولید واحدهای تجدیدپذیر پایین‌تر باشد، خیزش فرکانس خود را نشان می‌دهد. لذا انتظار می‌رود تا منابعی که ممکن است این وضعیت را تشدید کنند، در سیستم دخالت نکنند. منابعی که فقط به تزریق توان می‌پردازند، این وضعیت را ممکن است تشدید کنند. چرا که به ایجاد فاصله بیش‌تر بین تولید و مصرف کمک می‌کنند. لذا قانون اول بر اساس این ضرورت نوشته می‌شود:

- قانون اول: اگر سیستم با افزایش فرکانس روبرو شد، پیل سوختی و دیزل ژنراتور نباید هیچ سهمی در تولید توان داشته باشد. لذا ارتباط آن‌ها با شبکه ضرورتی ندارد و باید قطع باشد. در این وضعیت الکترولیزور باید مشارکت موثری در بهبود رفتار فرکانسی داشته باشد.

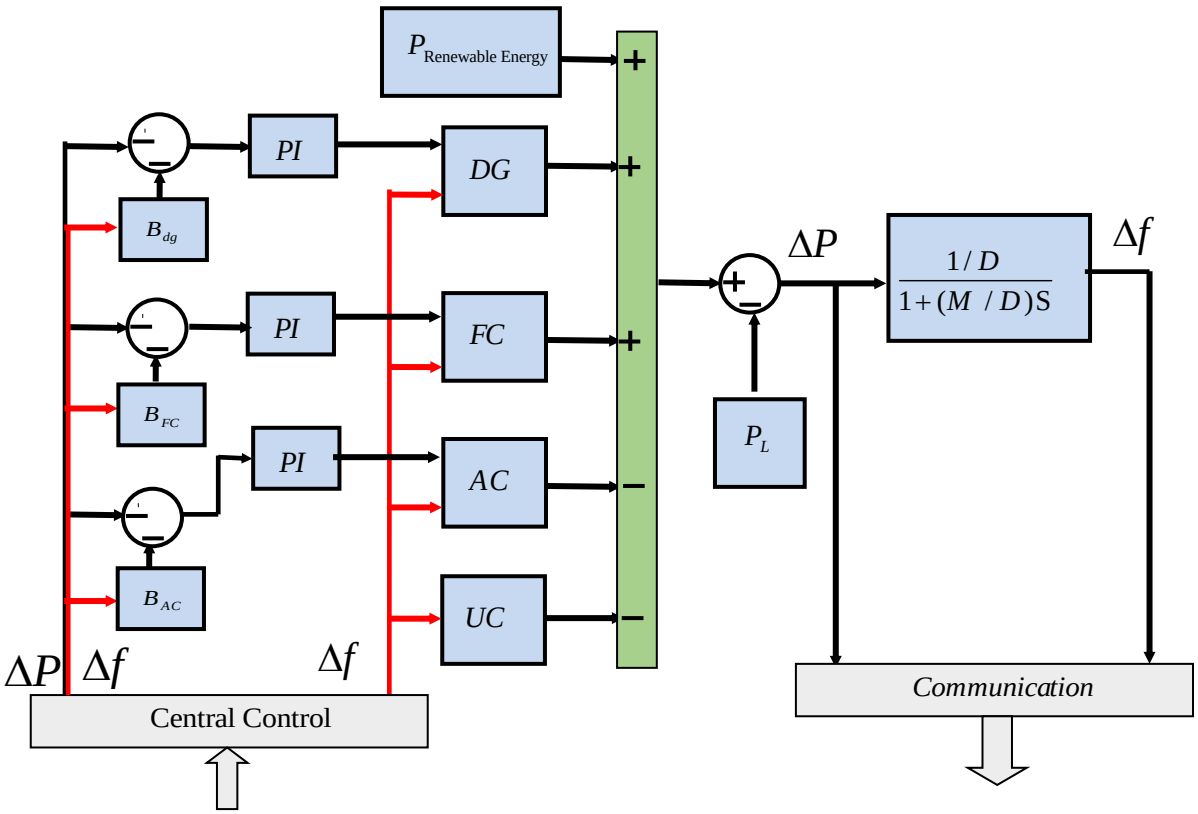
شرایطی ممکن است در سیستم ایجاد شود که میزان مصرف توان از تولید واحدهای تجدیدپذیر بالاتر باشد، در این صورت افت فرکانس پدیده‌ای است که ریزشبکه با آن مواجه می‌شود. تا جایی که ممکن است نباید با جذل توان به شبکه، سبب افزایش بیش از بیش مصرف خالص و افت بیش‌تر فرکانس شد. در مقابل واحدهای تولید توان باید به طور موثر

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

در کنترل فرکانس مشارکت کنند. لذا قانون دوم بر این اساس نوشته می‌شود:

- قانون دوم: اگر سیستم با افت فرکانس مواجه شود، پیل سوختی و دیزل ژنراتور نیز با توجه به سهم تعیین شده توسط کنترلر مرکزی بایستی در حالت دایم توان دستور داده شده را تولید نمایند. این قانون نیز بر این مبنا استوار است که در ریزشبکه با کمبود توان مواجه است و سیستم‌های تولید توان کمکی به تولید توان بپردازند.

در کنترل فرکانس ریزشبکه دو نوع کنترلر اولیه و ثانویه استفاده می‌شود. هر منبع توان دارای مشخصه دروپ منحصر به خود است. این مشخصه در فیدبک گیری از فرکانس خود را به صورت ضریب R نشان می‌دهد که در بخش قبل، جایگاه این ضریب در تمامی منابع نمایش داده شده‌است. این کنترلر اولیه در واقع توان تبادلی واحدهای توان را حول نقطه‌کار به ازای تغییرات کوچک بار، کنترل می‌کند. با تغییرات بزرگ تولید و یا بار، ریزشبکه با انحراف حالت ماندگار فرکانس روبرو می شود. لذا کنترلر تکمیلی با نام کنترل ثانویه لازم است که نقطه‌کار جدید تمامی منابع توان را به ازای تغییرات بزرگ تولید و یا مصرف، تنظیم نماید. البته با تنظیم مناسب ضرایب کنترلر ثانویه، رفتار دینامیکی سیستم نیز قابل بهبود است. در کنترل ثانویه، همزمان نوسانات فرکانس و توان درنظر گرفته شده‌است. نوسانات فرکانس در ضریب بایاس (B) ضرب شده و به جنس توان تبدیل می‌شود. تغییرات توان با ضریب منفی وارد کنترلر PI شده و نقطه‌کار جدید برای منابع توان به همراه رفتار گذرای این واحدها تعیین می‌شود تا نوسانات فرکانس و توان به صفر برسد.



شکل ۶: نمایش واحدهای کنترلی ریزشبکه مورد مطالعه

شکل (۶) نمای کلی مدل دینامیکی مورد مطالعه ریزشبکه به همراه واحدهای کنترلی را نشان می‌دهد. Δf انحراف فرکانس و سیگنال ورودی کنترلر است و تغییرات توان واحدهای تولید و ذخیره توان به عنوان خروجی این سیستم می‌باشد. M نشان‌گر اینرسی معادل کل یک ریزشبکه است. توضیحات سایر پارامترها در بخش قبل برای هر منبع توان بیان شده است. فرض بر این است که واحد خورشیدی دارای توان متغیر و غیرقابل کنترل است. در ضمن تاخیر کل سیستم مخابراتی به صورت زمانی قبل از ورودی منابع تولید و ذخیره‌ساز انرژی و بعد کنترلر PI درنظر گرفته شده است. وقتی نامتعادلی بین تولید و مصرف به دلیل افزایش یا کاهش بار یا تولید اتفاق می‌افتد، انحراف فرکانس ریزشبکه به ثابت اینرسی و ثابت تقاضای بار وابسته خواهدبود. با واحد کنترلر مرکزی اطلاعات فرکانس شبکه را با تاخیر دریافت می‌کند و به تبع آن، سیگنال‌های کنترلی با تاخیر به واحدهای قدرت ارسال می‌شود. کنترلر مرکزی با توجه دو قانون ذکر شده، فرمان قطع و وصل به واحدهای کنترل‌شونده به منظور تسریع در بهبود رفتار فرکانسی صادر می‌کند. کنترلر مرکزی برای هر واحد قدرت، یک کنترلر PI و ضریب R و B منحصر به آن واحد قدرت درنظر گرفته است. در صورتی که منبعی طبق دو قانون مطرح شده، بایستی در تثبیت فرکانس مشارکت کند، اطلاعات دریافتی توسط کنترلر مرکزی تحلیل شده و فرمان

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

مناسب به آن منبع صادر می‌شود. وقتی توان خالص تولیدی از توان خالص مصرفی کمتر می شود، افت فرکانسی در ریزشبکه اتفاق می‌افتد. در این شرایط افت فرکانس و توان با علامت منفی وارد کنترلرهای PI شده و ورودی این کنترلرها افزایش می‌یابد. با افزایش ورودی PI، خروجی PI نیز افزایش داشته و به تبع آن نقطه‌کار واحدهای تولید افزایش می‌یابد تا افت فرکانسی جبران شود. با افزایش توان تولیدی نسبت به توان مصرفی، Δf و ΔP افزایش داشته و مقدار خروجی کنترلرهای PI کاهش می یابد. این بدان معنی است که نقطه کار توان واحدهای تولیدی شدیدا کاهش داشته و به صفر می‌رسد و ذخیره‌سازهای انرژی نیز با حداکثر ظرفیت به جذب توان اضافی خواهند پرداخت.

٤- بهینه‌سازی متغیرهای ریزشبکه

از آن‌جایی که منابع به صورت موازی قرار دارند، برای بدست آوردن یک حلقه فیدبکی پایدار، نیاز است تا پارامترهای کنترلی PI هر واحد قدرت به خوبی تعیین شود، به علاوه برای اشتراک توان در حالت دایم بین منابع، نیازمند رابطه معکوسی از R با توجه به مقدار نامی آن منبع توان هستیم. به طور مشابه، هر منبع توان دارای یک سیگنال کنترلی برای تنظیم توان خروجی متناسب با نوسانات فرکانس با نام بایاس فرکانس (B) می‌باشد. طراحی این پارمترها با توجه به عدم قطعیت‌ها و ویژگی‌های غیرخطی، سبب استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌شود. در مواردی که دو یا چند هدف در بهینه‌سازی پارامترهای سیستم کنترلی، مورد توجه باشد، بهینه‌سازی تک‌هدفه پاسخ مناسبی را در اختیار قرار نمی‌دهد. بایستی چندین مجموعه جواب در دسترس باشد تا با توجه به اهمیتی که هر هدف برای پژوهشگر دارد، جواب‌های بهینه انتخاب شود. با توجه به این که در این مقاله، دو هدف متفاوت و در تضاد هم باید بهینه سازی شود، بایستی از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه استفاده نمود. هدف اول کاهش نوسانات فرکانس ریزشبکه در برابر تغییرات تولید یا مصرف و هدف دوم تعیین حداقل ظرفیت ابرخازن و زمان تاخیر سیستم‌های مخابراتی برای کاهش هزینه‌های زیرساختی ریزشبکه. این دو هدف در تضاد هم هستند. یکی از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، استفاده از الگوریتم NSGA-II[1] است که یک روش شناخته شده می‌باشد. دو هدف مقاله در دو تابع هدف مجزا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$IAE = \sum_{i=1}^{N} |\Delta f|_i + |f|_i \qquad (۷)$$

$$CostF = \left(H_{Vir_average} - H\right) + \frac{T_{d_avarge}}{T_d} = H_{Vir} + \frac{T_{d_avarge}}{T_d} \qquad (۸)$$

در روابط (۷)و (۸)، Δf نوسانات فرکانس، H_{Vir} اینرسی مجازی بدست آمده، $H_{Vir_average}$ اینرسی مجازی متوسط قابل اعمال در ریزشبکه و از مقدار H همواره بزرگتر خواهد بود. T_d تاخیر سیستم‌های مخابراتی، T_{d_avarge} متوسط تاخیر سیستم‌های مخابراتی.

در این مقاله برای تعیین پارامترهای مجهول سیستم کنترلی، بایستی محدوده تغییرات درنظر گرفته شده برای پارامترهای مجهول ارایه شود. ثابت‌های دینامیکی منابع توان، ریزشبکه و فرکانس مبنا در بخش بعدی بیان خواهد شد. مقادیر PI، ضریب B و R برای هر منبع توان مجهول درنظر گرفته شده است. محدوده تغییرات تعریف شده در این مقاله برای این پارامترها در جدول (۱) آورده شده است. بهینه‌سازی چند هدفه بایستی با درنظر گرفتن محدودیت‌های جدول (۱) و توابع هدف نشان داده شده در روابط (۷)و (۸) انجام شود.

جدول ۱: محدوده تغییر پارامترهای ریزشبکه نسبت به مقادیر نامی

Parameter	Limitation	Parameter	Limitatation
$H_{Vir_average}$	[5-8] (s)	B_{fc}	[0.05-0.3]
kp_{dg}	[.1-1]	R_{fc}	[10-20]
ki_{dg}	[0.001-0.005]	kp_{ac}	[60-80]
B_{dg}	[0.07-0.2]	ki_{ac}	[.01-0.5]
R_{dg}	[10-20]	B_{ac}	[0.1-3]
kp_{fc}	[0.01-0.3]	T_{ac}	[10-20]
ki_{fc}	[0.001-0.005]	T_d	[1-10]

در این مقاله از بهینه سازی چند هدفه برای جستجوی راه‌حل‌های بهینه استفاده می‌شود. برخلاف روش بهینه سازی تک هدفه، در بهینه سازی چند هدفه یک راه حل نهایی به عنوان جواب در خروجی الگوریتم ارائه نمی‌شود. بلکه مجموعه ای از جواب‌های بهینه که در اصطلاح به آن جبهه پارتو[2] اطلاق می‌شود، در دسترس است. با توجه به وزن دلخواه تخصیص داده شده، جواب یا جواب‌های بهینه انتخاب می‌شود. در میان انواع الگوریتم تکاملی چندهدفه، دو نوع الگوریتم چند هدفه یعنی الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات (MOPSO[3]) شناخته می‌شود.

الگوریتم NSGA-II همانند الگوریتم ژنتیک دارای عملگرهای جهش و تقاطع در هر مرحله و تکرار مراحل تا رسیدن به جمعیتی بهینه است. مجموعه‌ی جواب برای انتخاب شدن ابتدا رتبه‌بندی می‌شوند و هر جوابی که رتبه‌ی کم‌تری داشته باشد از کیفیت بهتری برخوردار است. پاسخ‌ها بر اساس غلبه رتبه‌بندی شده و سپس بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. یعنی مجموعه جواب‌هایی که بر سایر جواب‌ها غالب هستند ولی بر اعضای مجموعه‌ی خودشان نمی‌توانند غلبه کنند، با رتبه یکسان در یک جبهه پارتو قرار می‌گیرند. شکل (۷) این مکانیزم را بهتر نمایش می‌دهد. این الگوریتم نیز کار خود را با جمعیت اولیه شروع می‌کند، براساس مقادیر توابع هدف، جواب‌ها به کمک مکانیزم فاصله ازدحامی و غلبه، رتبه بندی شده و براساس ان جمعیت جدید با عملکرهای

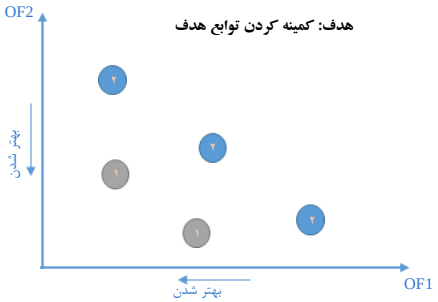
[1] Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II

[2] Pareto

[3] Multi-objective Particle Swarm Optimization

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

ازدواج و جهش تولید می‌شود. فرآیند تا جایی که شرایط خاتمه الگوریتم محقق شود.



شکل ۷: رتبه‌بندی جواب‌ها در الگوریتم NSGA-II

الگوریتم MOPSO دارای ساختار مبنایی مشابه الگوریتم PSO متداول است. این الگوریتم ذرات اولیه را تشکیل می‌دهد. به هر ذره سرعتی را تخصیص داده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اعضای نامغلوب جمیعت تفکیک شده و در یک آرشیو[1] خارجی ذخیره می‌شود. الگوریتم در مراحل کار تعیین می‌کند که پاسخ‌های جدید به آرشیو اضافه شوند و یا آرشیو دست نخورده برای مرحله بعدی استفاده شود. برای ایجاد جبهه‌های پارتو، از روش شبکه بندی تطبیقی استفاده می‌شود. در طول فرآیند، هر ذره برای خود یک رهبر تعیین کرده و به سمت آن حرکت می‌کند. جمعیت جدید تشکیل شده و بر اساس توابع هدف، جمیعت مغلوب حذف و اعضای نامغلوب به آرشیو اضافه می‌شوند. این فرآیند تا تامین شرایط توقف الگوریتم، تکرار می شود. این الگوریتم به صورت جزیی در مرجع [۳۱] تشریح شده است.

در این مقاله، از هر دو روش بهینه سازی چند هدفه تشریح شده برای تعیین جواب‌های بهینه و به دنبال آن ، انتخاب نقطه بهینه استفاده شده است.

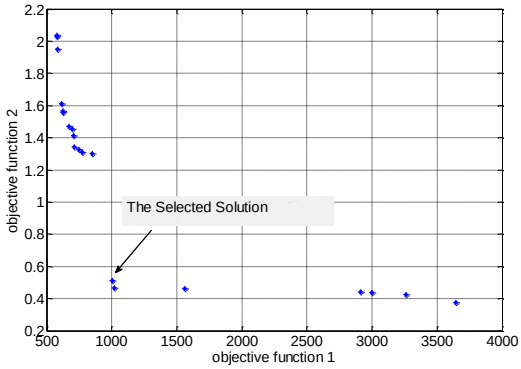
۵-نتایج شبیه سازی

سیستم کنترل فرکانس در یک ریزشبکه معرفی شده در نرم‌افزار متلب/سیمولینک پیاده‌سازی شده است. پارامترهای اولیه این ریزشبکه و واحدهای توان در جدول (۲) بیان شده‌است.

جدول ۲: پارامترهای ریزشبکه

Parameter	Value	Parameter	Value
T_{uc}	**0.2 (s)**	T_{FC}	**4 (s)**
H	**5 (s)**	T_{AC}	**0.2 (s)**
D	**0.012 (pu/Hz)**	T_{dt}	**20 (s)**
T_{dg}	**2 (s)**	f_{base}	**50 Hz**

ابتدا سیستم در سه سناریو شبیه سازی شده‌است. در سناریوی اول ریزشبکه با اعمال تاخیر در شبکه‌های مخابراتی با مقادیرپارامترهای غیر بهینه در سناریوی اول یک ریزشبکه با مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی، اینرسی مجازی و تاخیر سیستم های مخابراتی و در سناریوی سوم، تاخیر سیستم مخابراتی درنظر گرفته نشده است. همان طور که در بخش قبل گفته شده است، پارامترهای سیستم به کمک الگوریتم NSGA-II به دست آمده است. منحنی پرتو بدست آمده در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۸: منحنی پرتو دو تابع هدف ناشی از بهینه سازی NSGA-II

جدول ۳: پارامترهای بهینه و غیر بهینه سیستم کنترلی، ظرفیت ابرخازن و تاخیر سیستم مخابراتی

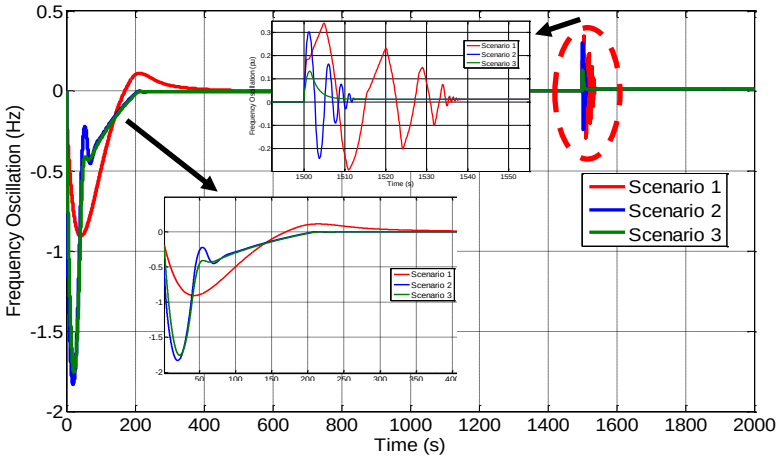
Non-Optimum Parameters		Optimum Parameters	
Parameter	Value	Parameter	Value
Hvir	1	Hvir	0.2005
kp_{dg}	0.244	kp_{dg}	.7167
ki_{dg}	0.0032	ki_{dg}	0.0024
B_{dg}	0.1386	B_{dg}	.1687
R_{dg}	19.93	R_{dg}	17.084
kp_{fc}	0.0298	kp_{fc}	0.0764
ki_{fc}	0.0043	ki_{fc}	0.0025
B_{fc}	.1878	B_{fc}	0.2338
R_{fc}	17.09	R_{fc}	12.7212
kp_{ac}	57.7635	kp_{ac}	75.3
ki_{ac}	7.08	ki_{ac}	0.4
B_{ac}	.5923	B_{ac}	0.1
R_{ac}	28.1	R_{ac}	16.1
T_d	3	T_d	4.8
CostF	1.2	*CostF*	0.513

همان‌طور که در شکل (۷) مشهود است، راه حل‌های مختلفی توسط الگوریتم NSGA-II پیشنهاد شده است که دست پژوهشگر را در انتخاب راه‌حل یا راه حل‌های مناسب باز نگه می‌دارد. با توجه به هدفی که هر پژوهشگر از عملکرد بهینه سیستم دارد، یک نقطه قابل انتخاب است. در این مقاله، تلاش می‌شود تا جایی که امکان پذیر است، هم هزینه‌های سیستم پایین (تابع هدف دوم در محور y مقدار کوچکتری به خود اختصاص دهد) و هم انحرافات فرکانس پایین (مقدار تابع هدف اول که در محور x مشخص شده‌است، حداقل شود) باشد. لذا راه حلی که در شکل (۸) با فلش نشان داده شده‌است، انتخاب می‌گردد. با توجه به اولویت حداقل هزینه و حداقل نوسان فرکانس، مقادیر بهینه بدست آمده در جدول (۳) لیست شده است. در ضمن مقادیر غیر بهینه که با روش سعی خطا نیز حاصل شده است، در این جدول آورده شده است. مطابق آن‌چه که در

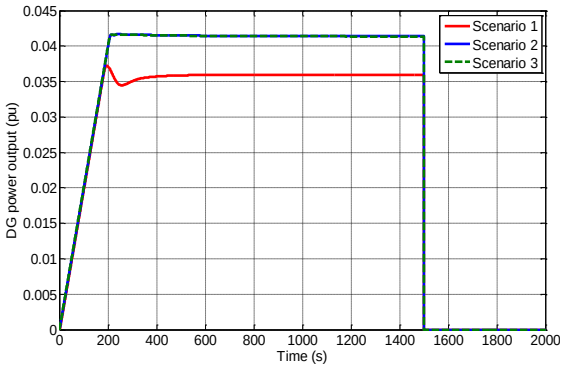
[1] Repository

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

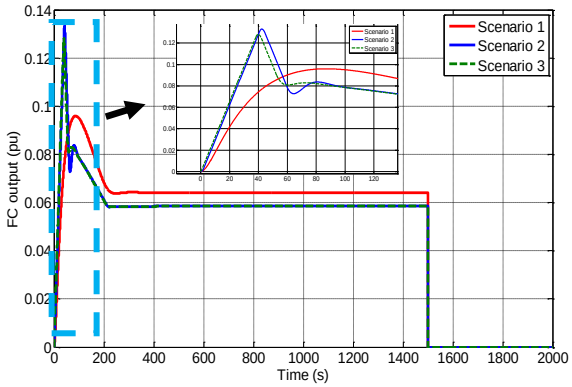
مرجع [۲۷]، بحث شده است، اینرسی مجازی (H_{Vir}) رابطه مستقیمی با ظرفیت ابرخازن دارد. با توجه به جدول (۳)، مقدار اینرسی مجازی تقریبا ۵ برابر در حالت بهینه، کوچک‌تر شده و انتظار می‌رود، طرفیت ابرخازن نیز به همین نسبت کاهش یابد.



شکل۹: مقایسه رفتار فرکانسی ریزشبکه در سناریوهای محتلف شبیه سازی

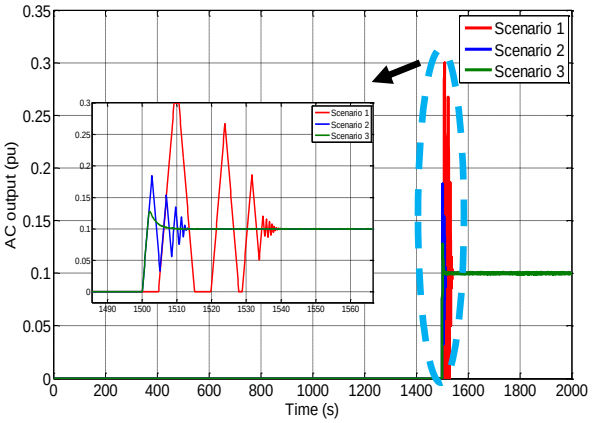


شکل ۱۰: مقایسه رفتار دیزل ژنراتور در سناریوهای محتلف شبیه سازی



شکل ۱۱: مقایسه رفتار پیل سوختی در سناریوهای محتلف شبیه سازی

برای مقایسه بهتر، نتایج سه سناریو در کنار هم در اشکال ترسیم شده است. رفتار فرکانسی ریزشبکه در این قسمت در شکل ۹ نمایش داده شده است. بهبود میرایی نوسانات فرکانسی ریزشبکه با اعمال پارامترهای بهینه کاملا مشهود است. در ضمن تاخیر در سیستم مخابراتی بر دامنه و زمان نوسانات فرکانس افزوده است. بار ریزشبکه تا زمان ۱۶۰۰ ثانیه، برابر ۱/۱ پریونیت بوده و بعد این زمان به ۰/۹ پریونیت رسیده است. در مقابل تولید واحدهای انرژی تجدیدپذیر برابر یک پریونیت در نظر گرفته شده است. انتظار می‌رود که تا زمان ۱۶۰۰ ثانیه، دیزل زنراتور و پیل سوختی به تولید تون بپردازند و بعد این زمان، واحد الکترولیزور به جذب توان اضافی بپردازد.. در شکل‌های ۱۰-۱۲ نیز خروجی واحدهای دیزل ژنراتور، پیل سوختی و الکترولیزور نیز در سه سناریوی توضیح داده شده نمایش داده شده است.

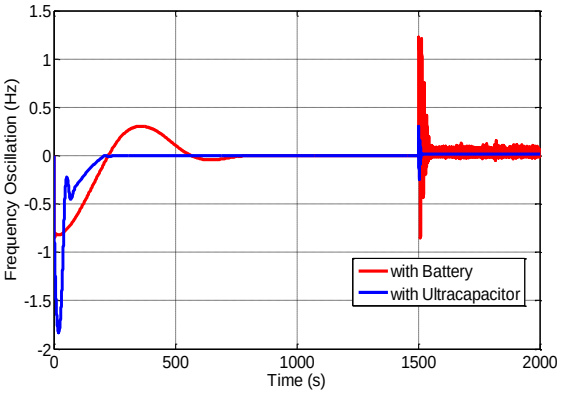


شکل ۱۲: مقایسه رفتار الکترولیزور در سناریوهای محتلف شبیه سازی

در صورتی که باتری در ریزشبکه مورد مطالعه، جایگزین ابرخازن شود، دو چالش برای ریزشبکه ایجاد می‌شود. چالش اول مربوط به هزینه‌های عملکرد و تعمیرو نگه‌داری سالیانه است. چالش دوم، کاهش

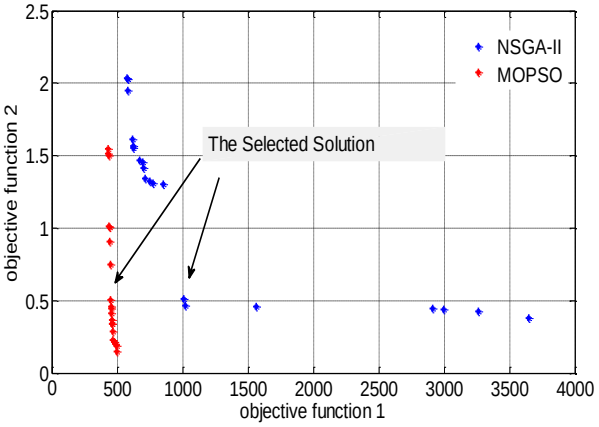
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

سرعت پاسخگویی ریزشبکه به تغییرات بار است. از آن‌جایی که در بحث تنظیم فرکانس، زمان و دامنه نوسانات فرکانس به طور قابل توجه بر علمکرد سیستم تاثیرگذار است، جایگزینی باتری به جای ابرخازن پیشنهاد نمی‌شود. برای نمایش بهتر این ادعا رفتار فرکانسی ریزشبکه در حضور ابرخازن و باتری در شکل (۱۳) نشان داده شده‌است. به دلیل رفتار دینامیکی پایین‌تر واحد باتری، در آغاز شبیه‌سازی، میرایی سیستم دیر انجام پذیرفته است. در ضمن بعد ۱۵۰۰ امین ثانیه، نوسانات فرکانس هر چند در محدوده کوچکی است، ولی نوسانات فرکانس نتوانسته میرا شود.



شکل ۱۳: مقایسه رفتار فرکانسی ریزشبکه در حضور باتری و ابرخازن

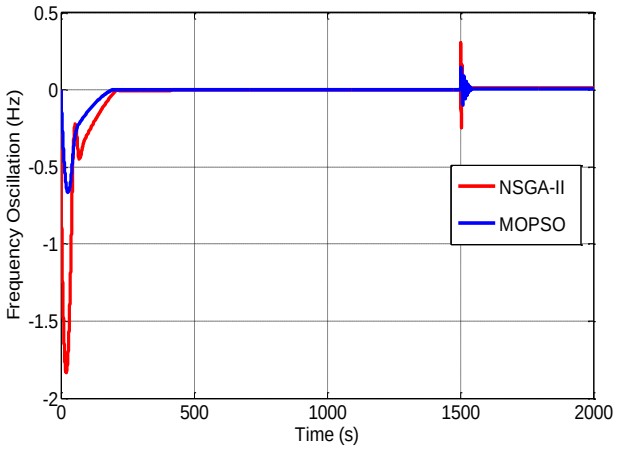
در ادامه، نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم MOPSO در قالب منحنی جبهه پرتو و جدول آورده می شود. نتایج خروجی سیستم در حضور پارامترهای بهینه با دو الگوریتم بهینه‌سازی با هم مقایسه می‌شود. جبهه پارتو در حضور دو نوع الگوریتم بهینه سازی چند هدفه در شکل (۱۴) نشان داده شده‌است. این شکل نشان می دهد که الگوریتم MOPSO توانسته جواب‌های بهتری با تمرکز داده بالاتر را پیشنهاد دهد. چرا که در حالت کلی، نقاط بهینه به دست آمده در این الگوریتم دارای هزینه (تابع هدف اول با مقادیر کوچک‌تر) و پیش‌بینی می‌شود نوسانات فرکانسی کمتری نسبت به نتایج ناشی از الگوریتم NSGA-II (مقادیر تابع هدف دوم در الگوریتم MOPSO کوچک‌تر است) داشته باشد. برای مقایسه بین نتایج این دو الگوریتم، دو نقطه از جبهه پارتو مختص هر الگوریتم، به گونه‌ای انتخاب شده‌است که هزینه یکسانی (مقدار تابع هدف دوم برای هر دو الگوریتم نزدیک به هم باشد) به سیستم تحمیل شود. مقادیر متغیرهای کنترلی ناشی از اعمال الگوریتم NSGA-II از جدول (۳) و حاصل از الگوریتم MOPSO از جدول (۴) انتخاب می‌شود. مقایسه جدول (۳) و(۴) نشان می‌دهد که مقدار اینرسی مجازی کاهش داشته که انتظار می‌رود ظرفیت ابرخازن نیز کاهش یابد و هزینه سیستم پایین بیاید. ولی مقدار تاخیر سیستم مخابراتی در الگوریتم MOPSO کاهش داشته و بستر مخابراتی مطلوب‌تری را نیازمند است که هزینه سیستم را افزایش می‌دهد. در کل، هزینه سیستم با اعمال الگوریتم MOPSO کاهش داشته که در منحنی جبهه پارتو مشهود است.



شکل ۱۴: انتخاب راه‌حل‌های بهینه از جبهه پارتو NSGA-II و MOPSO

جدول ۴: پارامترهای بهینه بدست آمده برای کنترلرها با روش MOPSO

Parameter	Value	Parame ter	Value
$H_{Vir_average}$	5.02016	B_{fc}	0.2969
kp_{dg}	0.9974	R_{fc}	10.2372
ki_{dg}	0.0044	kp_{ac}	73.798
B_{dg}	0.1982	ki_{ac}	0.016449
R_{dg}	19.4948	B_{ac}	0.46538
kp_{fc}	0.293	T_{ac}	19.61
ki_{fc}	0.005	T_d	3.511



شکل ۱۵: مقایسه رفتار فرکانسی ریزشبکه با اعمال الگوریتم‌های بهینه سازی NSGA-II و MOPSO

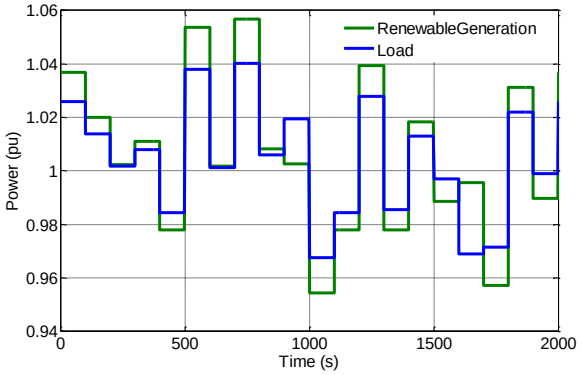
از انجایی که تولید منابع تجدیدپذیر و مصرف بار دارای عدم قطعیت است، پروفایل تولید منابع تجدیدپذیر و توان مصرفی بار به صورت توزیع گوسی درنظر گرفته شده است که در روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب برای تولید و مصرف در واحد پریونیت به صورت ریاضی بیان شده‌است.

$$g(x)=\frac{1}{\sqrt{0.0005}}\exp\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-1}{\sqrt{0.0005}}\right)^2\right) \quad (۹)$$

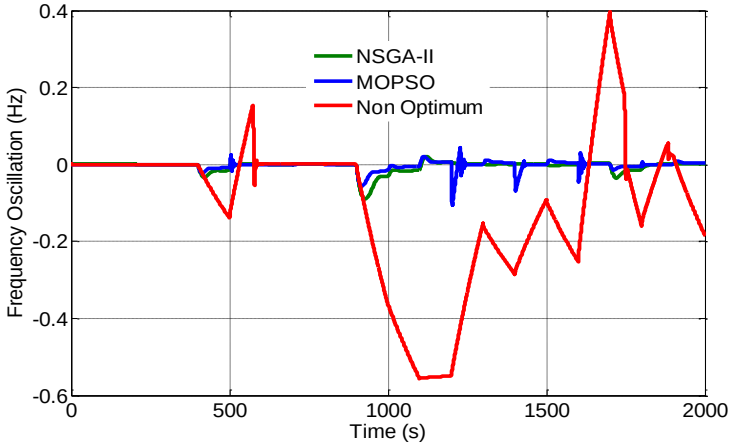
$$g(x)=\frac{1}{\sqrt{0.001}}\exp\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x-1}{\sqrt{0.001}}\right)^2\right) \quad (۱۰)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

رفتار فرکانسی ریزشبکه با اعمال جواب‌های بهینه هر دو الگوریتم بهینه‌سازی شده، و عدم قطعیت مصرف بار و تولید منابع تجدیدپذیر نیز استخراج و در شکل (۱۶) ترسیم شده است. رفتار فرکانسی مطلوب ریزشبکه در حضور پارامترهای غیربهینه و بهینه بدست آمده در شکل (۱۷) نشان داده شده است.این شکل حاکی از آن است که استراتژی پیشنهادی کارایی بالایی در میرایی نوسانات فرکانس دارد. الگوریتم MOPSO در حالت کلی کارایی بهتری در تنظیم ضرایب بهینه پارامترهای کنترلی سیستم نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد.



شکل ۱۶: نامعینی تولید منابع تجدیدپذیر و عدم قطعیت مصرف توان بار



شکل ۱۷: مقایسه رفتار فرکانسی سیستم با حضور کنترلرهای بهینه و غیر بهینه با درنظر گرفتن نامعینی تولید منابع تجدیدپذیر بار

٦- نتیجه گیری

در این مقاله، یک ریزشبکه شامل منابع کنترل شده و منابع کنترل نشده شامل خورشیدی، بادی، دیزل ژنراتور، پیل سوختی، الکترولیزور، به همراه واحد ابرخازن به منظور تقویت اینرسی مجازی شبکه درنظر گرفته شده است. پایداری فرکانسی بار در ریزشبکه با حضور واحد ابرخازن و اعمال تاخیر ناشی از سیستم‌های ارتباطی مورد تحقیق قرار گرفت. مدل مرتبه اول برای خطا در سیستم مخابراتی لحاظ شده‌است. وجود تاخیر عملکرد سیستم را در کنترل پایداری بار و فرکانس را کاهش می‌دهد. کاهش تاخیر در سیستم‌های مخابراتی و افزایش اینرسی مجازی ناشی از ظرفیت بالای ابرخازن، سبب بهبود میرایی نوسانات فرکانس می شود ولی هزینه بهره‌برداری از ریزشبکه را افزایش می‌دهد. لذا در این مقاله، با الگوریتم NSGA-II و MOPSO تلاش شده است که دو هدف میرایی بالای نوسانات فرکانس در کنار افزایش حداقل هزینه ها محقق شود. در ریز شبکه مورد مطالعه، برای بررسی کارامدی استراتژی شبکه برای غلبه بر نوسانات فرکانس، در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه سازی انجام شده‌است. نتایج نشان داد که دو الگوریتم بهینه‌سازی در بهبود رفتار فرکانسی و کاهش هزینه‌ها تاثیر به سزایی دارند. الگوریتم MOPSO نیز نسبت به الگوریتم NSGA-II دارای جواب‌های بهتری به لحاظ کاهش هزینه‌ها و بهبود رفتار فرکانسی دارد.

مراجع

[1] Hatziargyriou, N. ed., 2014. Microgrids: architectures and control. John Wiley & Sons.

[2] Liu, W., Gu, W., Sheng, W., Meng, X., Wu, Z. and Chen, W., 2014. Decentralized multi-agent system-based cooperative frequency control for autonomous microgrids with communication constraints. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 5(2), pp.446-456.

[3] R. H. Lasseter and P. Piagi, “Microgrid: A conceptual solution,” in Proc. IEEE 35th Annu. Power Electron. Spec. Conf. (PESC), Aachen, Germany, 2004, pp. 4285–4290.

[4] G. Venkataramanan and C. Marnay, 2008. A larger role for microgrids, IEEE Power Energy Mag., 6(3): 78–82.

[5] Chen, C., Wang, J., Qiu, F. and Zhao, D., 2016. Resilient distribution system by microgrids

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

[17] Shim, J.W., Cho, Y., Kim, S.J., Min, S.W. and Hur, K., 2013. Synergistic control of SMES and battery energy storage for enabling dispatchability of renewable energy sources. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(3), pp.5701205-5701205.

[18] Onar, O.C., Uzunoglu, M. and Alam, M.S., 2006. Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system. Journal of power sources, 161(1), pp.707-722.

[19] Jing, W., Lai, C.H., Wong, W.S. and Wong, M.D., 2017. Dynamic power allocation of battery-supercapacitor hybrid energy storage for standalone PV microgrid applications. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 22, pp.55-64.

[۲۰] فاطمه جمشیدی؛ سیده لی لی امامزاده یی؛ محمد مهدی قنبریان. "کنترل فرکانس ریزشبکه‌ی جزیره‌ای با کنترلگر تناسبی- انتگرالی تنظیم شده با منطق فازی و الگوریتم ازدحام ذرات". *مجله علمی-پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات*, ۶, ۱, ۱۳۹۶, -.

[21] Kalantar, M., 2010. Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage. Applied energy, 87(10), pp.3051-3064.

[22] Gao, L., Jiang, Z. and Dougal, R.A., 2004. An actively controlled fuel cell/battery hybrid to meet pulsed power demands. Journal of Power Sources, 130(1-2), pp.202-207.

[23] Nayeripour, M., Hoseintabar, M., Niknam, T., 2011. Frequency Deviation Control by Coordination Control of FC and Double-Layer Capacitor in an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation System", Renewable Energy, 36(2): pp. 1741-1746.

[24] Khoobana, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., & Dragicevic, T. (2016). A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles. Electric `Power Systems Research,1–14.

[25] L. Sigrist, I. Egido, E. Lobato Miguélez, L. Rouco, Sizing and controller setting of ultracapacitors for frequency stability enhancement of small isolated power systems, IEEE Trans. Power Syst. 30 (July (4)) (2015) 2130–2138

[26] Mehran Esmaeili, Hossein Shayeghi, Hamid Mohammad nejad, Abdollah Younesi, (2017) Reinforcement learning based PID controller design for LFC in a microgrid", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering , Vol. 36 Issue: 4, doi: 10.1108/COMPEL-09-2016-0408 Permanent link to this document: http://dx.doi.org/10.1108/COMPEL-09-2016-0408.

formation after natural disasters. IEEE Transactions on smart grid, 7(2), pp.958-966.

[6] Abdmouleh, Z., Alammari, R.A. and Gastli, A., 2015. Review of policies encouraging renewable energy integration & best practices. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, pp.249-262.

[7] Suntio, T., Messo, T. and Puukko, J., 2017. Power Electronic Converters: Dynamics and Control in Conventional and Renewable Energy Applications. John Wiley & Sons.

[8] Rahimi, T., Hosseini, S.H., Sabahi, M., Abapour, M. and Gharehpetian, G.B., 2017. Three-phase soft-switching-based interleaved boost converter with high reliability. IET Power Electronics, 10(3), pp.377-386.

[9] Karasani, R.R., Borghate, V.B., Meshram, P.M., Suryawanshi, H.M. and Sabyasachi, S., 2017. A three-phase hybrid cascaded modular multilevel inverter for renewable energy environment. IEEE Transactions on Power Electronics, 32(2), pp.1070-1087.

[10] Rahimi, T., Hosseini, S.H., Sabahi, M., Gharehpetian, G.B., and Abapour, M.. 2018. Reliability evaluation of a fault-tolerant three-phase interleaved DC-DC boost converter, accepted for publication. Doi: 10.1177/0142331218776722

[11] Ionel Vechiu, Octavian Curea, Alvaro Llaria, Haritza Camblong, (2011) "Control of power converters for microgrids", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 30 Issue: 1, pp.300-309, https://doi.org/10.1108/03321641111091575

[۱۲] علی ربانی، علی کریم پور" شناسایی و مدل سازی توربین گاز و بررسی رفتار مدل نسبت به تغییرات فرکانسی شبکه قدرت" جله کنترل، جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷

[13] Tani, A., Camara, M.B. and Dakyo, B., 2015. Energy management in the decentralized generation systems based on renewable energy—Ultracapacitors and battery to compensate the wind/load power fluctuations. IEEE Transactions on Industry Applications, 51(2), pp.1817-1827.

[14] Chen, Z. and Spooner, E., 2001. Grid power quality with variable speed wind turbines. IEEE Transactions on energy conversion, 16(2), pp.148-154.

[15] Liang, X., 2017. Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2), pp.855-866.

[16] Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. and Villafáfila-Robles, R., 2012. A review of energy storage technologies for wind power applications. Renewable and sustainable energy reviews, 16(4), pp.2154-2171.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]

[27] Fini, M.H. and Golshan, M.E.H., (2018). Determining optimal virtual inertia and frequency control parameters to preserve the frequency stability in islanded microgrids with high penetration of renewables. Electric Power Systems Research, 154, pp.13-22.

[28] Jiang, L., Yao, W., Wu, Q. H., Wen, J. Y., & Cheng, S. J. (2012). Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays. IEEE Transactions on Power Systems, 27, 932–941.

[29] Fattahi, J., Schriemer, H., Bacque, B., Or, R., Hinzer, K., & Haysom, J. E. (2016). High stability adaptive microgrid control method using fuzzy logic. Sustainable Cities and Society, 25,57–64.

[30] Mishra, S., Mallesham, G. and Jha, A.N., (2012). Design of controller and communication for frequency regulation of a smart microgrid. IET Renewable Power Generation, 6(4), pp.248-258.

[31] Coello, C.C.A., Pulido, G.T. & Lechuga, M.S. (2004). Handling Multiple Objectives With Particle Swarm Optimization. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 8(3), pp. 256-279.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.119]