

# بهبود میرایی نوسانات فرکانس ریز شبکه با کاهش مقادیر تاخیر سیستم مخابراتی و اینرسی مجازی

توحید رحیمی<sup>۱</sup>، غلامعلی علیزاده<sup>۳</sup>، حسن بابایی نوزادیان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، [rahimitohid@tabrizu.ac.ir](mailto:rahimitohid@tabrizu.ac.ir)

<sup>۲</sup> محقق پسادکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شانگهای، چین، [rahimitohid@sdu.edu.cn](mailto:rahimitohid@sdu.edu.cn)

<sup>۳</sup> دانشگاه فنی و حرفه ای ارومیه، دانشکده قاضی طباطبایی، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، [Alizadeh\\_8@yahoo.com](mailto:Alizadeh_8@yahoo.com)

<sup>۴</sup> فارغ التحصیل دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، [m.hasanbabay@tabrizu.ac.ir](mailto: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 ریز شبکه‌ها 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 شده است. در ضمن مقدار بهینه تاخیر سیستم‌های مخابراتی نیز در تنظیم فرکانس ریز شبکه نیز در نظر گرفته شده است. جهت ارزیابی عملکرد استراتژی پیشنهادی، رفتار فرکانسی سیستم در برابر تغییرات بار و تولید مورد شبیه سازی واقع شده است. با توجه به افزایش هزینه سیستم به دلیل افزایش ظرفیت ابرخازن و کاهش تاخیر سیستم‌های مخابراتی در مقابل بهبود نوسانات فرکانس ریز شبکه، دو روش بهینه‌سازی چندهدفه به منظور کنترل فرکانس بار (LFC) در کنار حداقل افزایش هزینه استفاده شده است. 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:** ریز شبکه، 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<sup>1,2</sup>, Gholam Ali Alizadeh<sup>3</sup>, Mohsen Hasan Babayi Nozadian<sup>4</sup>

**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.

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

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 ریزشبهه تجمع شده‌اند و سیستم‌های قدرت آینده را تشکیل می‌دهند. با افزایش سطح منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبهه، پایداری سیستم ممکن است تحت شعاع قرار گیرد. فرکانس یکی از شاخص‌های پایداری در شبکه‌های قدرت است. کنترل فرکانس بار در ریزشبهه ضروری است [۱۴ و ۱۵]. مهم‌ترین منابع انرژی در ریزشبهه، منابع انرژی تجدیدپذیر با ویژگی تصادفی است. این نوسانات سبب از دست رفتن پایداری می‌شود. خوشبختانه، واحدهای ذخیره‌ساز انرژی قابلیت کارکرد به صورت منبع توان و یا بار را دارا می‌باشند که تا با جذب و یا اخذ توان به میرایی نوسانات فرکانس کمک کنند [۲۰-۱۶].

کلاستر و موسوی رفتار دینامیکی یک سیستم ترکیبی شامل توربین بادی، میکروتوربین، آرایه خورشیدی و باتری را براساس الگوریتم ژنتیک و کنترل کننده 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 فتولتائیک/توربین بادی/سلول سوختی/ابرخازن پیاده سازی کرده‌اند. به این صورت که برای هر منبع یک کنترل کننده 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 ریزشبهه در حضور خودوری برقی معرفی شده‌است. در [۲۵]، از سیستم کنترلی فازی-pid بهینه شده به منظور غلبه بر نوسانات فرکانس ریزشبهه در برابر نامعینی‌های بار و تولید استفاده است. در مراجع [۲۶ و ۲۷]، در

## ۱- مقدمه

ریزشبهه‌ها شبکه‌های کوچکی هستند که متشکل از بارها، منابع انرژی تجدیدپذیر، منابع ذخیره ساز انرژی به همراه بسترهای مخابراتی می‌باشند [۱ و ۲]. این شبکه‌ها به دلیل وجود انواع منابع تولیدپراکنده و ذخیره‌ساز انرژی از صدمات ناشی از خطای شبکه بالادستی در امان هستند [۳ و ۴]. امکان ذخیره‌سازی، خرید و فروش انرژی در زمان‌های مختلف توجیه اقتصادی ریزشبهه‌ها 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 روپرو 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 واحد‌های حمل و نقل و گرمایی در شرایط امروز و آینده هنوز میسر نیست. جوامع مدرن به سمت استفاده از منابع انرژی‌های تجدید پذیر (RESs) حرکت می‌نمایند [۶]. این منابع دارای ظرفیت کوچکی هستند و لذا عموماً در سطح ولتاژ توزیع به شبکه متصل می‌شوند. به دلیل توسعه تجهیزات الکترونیک قدرت با بهره ولتاژ بالا و سطح قابلیت اطمینان مناسب [۷-۱۱]، 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 ریزشبهه 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 ریزشبهه‌های متصل کنترل توان و فرکانس است. عدم تعادل توان تولیدی و مصرفی باعث انحراف و تغییر فرکانس

<sup>1</sup> renewable energy sources

مخابراتی با حداقل تاخیر بروزسانی اطلاعات و ظرفیت بالای ذخیره سازهای انرژی به خصوص ابرخازن است که سبب افزایش هزینه بهره برداری از ریزشیکه‌ها 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.

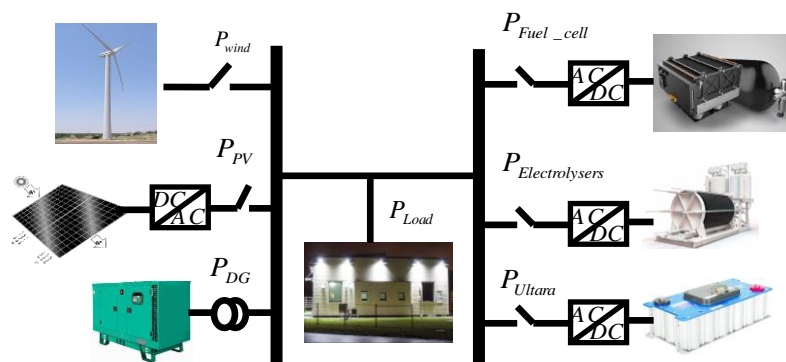
## ۲- شبکه مورد مطالعه

در اینجا، یک سیستم ریزشیکه 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 این که فرمان مناسب به واحدهای تولید و جذب توان ریزشیکه بدهد، نیازمند اطلاعات فرکانس می‌باشد. اطلاعات فرکانس توسط بستر مخابراتی با تاخیر زمانی مشخصی صادر می‌شود که بر پایداری ریزشیکه بسیار موثر است. ریزشیکه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، واحدهای کوچک توان توسط واسط‌های الکترونیک قدرتی به ریزشیکه 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 پنل‌های خورشیدی، پیل‌های سوختی، و وسایل ذخیره‌کننده انرژی، بکار می‌روند. هر منبع کوچک دارای یک بریکر می‌باشد، تا از اثرات اختلالات شدید به ریزشیکه، یا به دلایل تعمیر و نگهداری، بتوان آن را از شبکه جدا کرد. لزوماً، یک مقدار خاصی از توان تولید شده توسط DEG، بعنوان ذخیره‌سازی برق به هنگام کم‌باری برای کنترل فرکانس ثانوی، در نظر گرفته می‌شود.

شبکه‌های قدرت مورد مطالعه، از ابرخازن به منظور بهبود میرایی نوسانات فرکانس استفاده شده است. این بهبود در میرایی نوسانات فرکانس با مفهوم اینرسی مجازی مطرح شده است. 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 ریزشیکه، 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 ریزشیکه 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 فرکانس با حضور تاخیر زمانی توسط پژوهشگران بررسی شده است [۲۸]. دو روش برای بحث پایداری ریزشیکه وجود دارد: کنترلر مرکزی، کنترلر محلی. پایداری فرکانس با کنترلر غیرمرکزی نیز مهیا است. برای مثال، روش کنترل دروب 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 ریزشیکه 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 ریزشیکه‌ها می‌باشد. تنظیم فرکانس برای کسری از ثانیه تا چند ثانیه مورد بحث قرار می‌گیرد. تجهیزات نصب شده در ریزشیکه 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 ریزشیکه، نیازمند بسترهای



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

## ۲-۱ مدل سازی منبع توان دیزل ژنراتور

به دلیل عملکرد سری واحد مکانیکی و الکتریکی دیزل ژنراتور، تابع

تبدیل کلی یک دیزل ژنراتور به صورت زیر خواهد بود:

$$G_{dgt}(s) = \frac{1}{1+sT_{dgs}} \times \frac{1}{1+sT_{dt}} \quad (3)$$

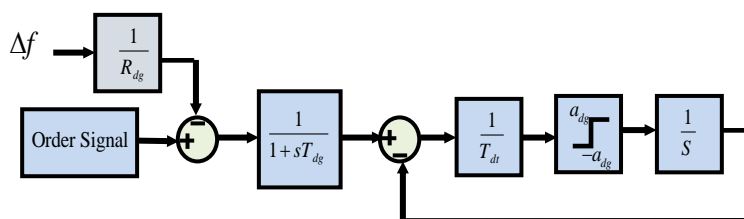
با توجه به فرمان مرجع تولید توان که با توجه به اطلاعات فرکانس مخابره شده، این واحدها توان لازم را تولید می کنند. وقتی فرمان تولید به دیزل ژنراتور صادر می شود، به دلیل تاخیر ذاتی سیستم های مکانیکی و محدودیت نرخ تولید (GRC)، تولید مطلوب به طور آنی به دست نمی آید. لذا این محدودیت نیز در مدل دینامیکی دیزل ژنراتور نیز اعمال شده است. مدل دینامیکی کامل دیزل ژنراتور در شکل (۲) نشان داده شده است.

دیزل ژنراتور می تواند با استفاد از گاورنر و سیستم دروپ سرعت به تعقیب توان مورد نیاز ریزشبهه بپردازد. گاورنر با تنظیم مکانیزم دریچه سوخت به کنترل سوخت ورودی به موتور سوختی می پردازد. موتور بنزینی یا گازوئیلی به عنوان توربین عمل می کند و یک ژنراتور سنکرون را حرکت می دهد. گاورنر دیزل ژنراتور می تواند با یک تابع تبدیل مرتبه اول قابل مدل سازی است که در معادله (۱) توضیح داده شده است [۳۰].

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

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

$$G_{dt}(s) = \frac{1}{1+sT_{dt}} \quad (2)$$



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

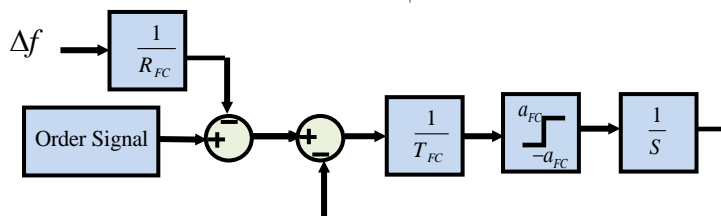
شبهه به اینورتر منبع ولتاژی است لذا تابع تبدیل این منبع توان به صورت مدل مرتبه اول خواهد بود [۳۰].

$$G_{fc}(s) = \frac{1}{1+sT_{fc}} \quad (4)$$

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

## ۲-۲ پیل سوختی

یکی از تجهیزات تولید توان استاتیک که انرژی شیمیایی ذخیره شده در هیدروژن را به انرژی الکتریکی DC تبدیل می کند، 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 می کند. از آنجایی که در نهایت عملکرد نهایی این سیستم



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

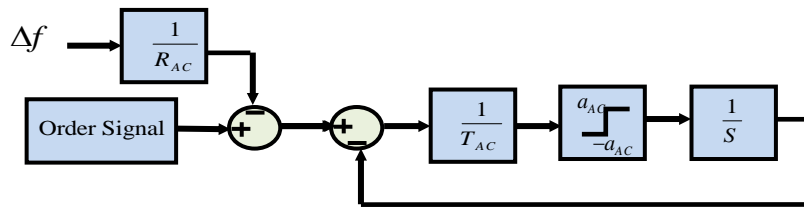
به ریزشبهه است. در نتیجه، تابع انتقال یک اکترولیزور به صورت رابطه زیر خواهد بود [۳۰].

$$G_{AE}(s) = \frac{K_{AE}}{1+sT_{AE}} \quad (5)$$

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

## ۲-۳ اکترولیزور آب

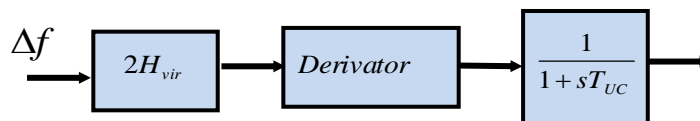
اکترولیزور آب تجهیزی برای ذخیره سازی انرژی اضافی انرژی های تجدیدپذیر است. تجزیه آب به هیدروژن و اکسیژن با گذراندن جریان بین دو الکترود جدا شده از هم انجام می شود. هیدروژن تولید شده در واکنش شیمیایی در یک تانک ذخیره می شود و به عنوان سوخت برای پیل سوختی برای ارضای تقاضای بار استفاده شود. یک واحد اکترولیزور آب به عنوان یک منبع ولتاژ DC عمل می کند و نیازمند یک اینورتر VSC برای اتصال



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

## ۲-۵ ابرخازن

ابرخازن‌ها با تزریق و یا جذب توان، نقش مهمی در افزایش اینرسی مجازی شبکه دارند. توان تبدیلی 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 ریزشیکه مورد مطالعه

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 ریزشیکه 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 ریزشیکه و عدم دخالت منابع غیر ضروری در رفتار فرکانسی ریزشیکه است. در شرایطی که میزان مصرف توان بار ریزشیکه از میزان تولید واحدهای تجدیدپذیر پایین تر 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 بیش تر 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 ریزشیکه با آن مواجه می‌شود. تا جایی که ممکن است نباید با جدل توان به شبکه، سبب افزایش بیش از پیش مصرف خالص و افت بیش تر فرکانس شد. در مقابل واحدهای تولید توان باید به طور موثر

## ۲-۶ 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 نخواهد بود. این سیستم‌ها به صورت تولید مشخص در ریزشیکه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## 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 شده است.

$$G_{Commu}(s) = \frac{1}{1 + sT_{commu}} \quad (6)$$

## ۳- سیستم کنترلی ریزشیکه

در این بخش، اجزای دینامیکی ریزشیکه به همراه واحدهای کنترلی توضیح داده می‌شود. ساختار کنترلی بر مبنای جبران سازی 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 جبران سازهای مناسب به میرایی نوسانات فرکانس پرداخت. در مطالعات فرکانسی، یکی از روش‌ها استفاده از مدل‌های دینامیکی ریزشیکه 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.

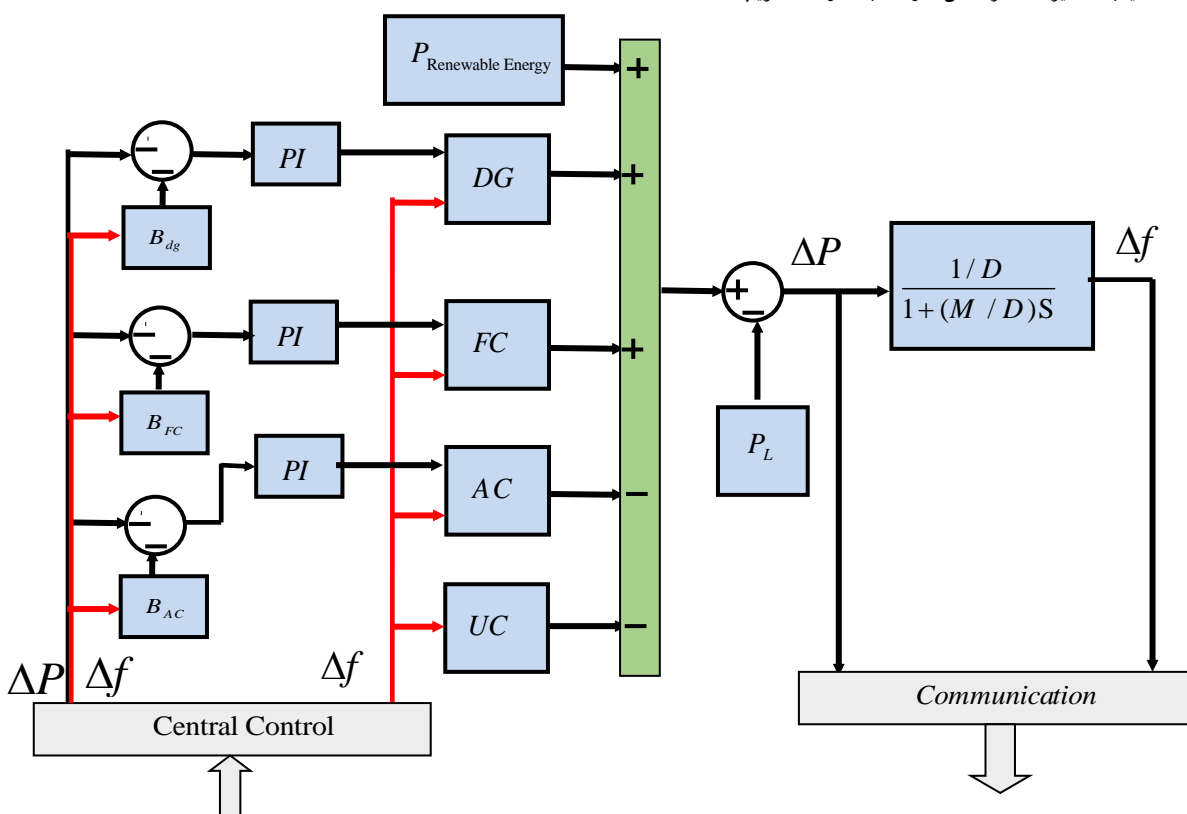
در این مقاله، از روش کنترلر مرکزی برای پیاده سازی سیستم کنترلی ریزشیکه استفاده شده است. کنترلر مرکزی دارای عملکرد بهتری نسبت به کنترلر توزیع یافته است ولی با افزایش تعداد منابع قابل کنترل، هزینه پیاده

می دهد که در بخش قبل، جایگاه این ضریب در تمامی منابع نمایش داده شده است. این کنترلر اولیه در واقع توان تبدیلی واحدهای توان را حول نقطه کار به ازای تغییرات کوچک بار، کنترل می کند. با تغییرات بزرگ تولید و یا بار، ریزشبهه با انحراف حالت ماندگار فرکانس روبرو می شود. لذا کنترلر تکمیلی با نام کنترلر ثانویه لازم است که نقطه کار 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 کنترلر ثانویه، همزمان نوسانات فرکانس و توان در نظر گرفته شده است. نوسانات فرکانس در ضریب بایاس (B) ضرب شده و به جنس توان تبدیل می شود. تغییرات توان با ضریب منفی وارد کنترلر PI شده و نقطه کار جدید برای منابع توان به همراه رفتار گذرای این واحدها تعیین می شود تا نوسانات فرکانس و توان به صفر برسد.

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

- 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 ریزشبهه با کمبود توان مواجه است و سیستم های تولید توان کمکی به تولید توان پردازند.

در کنترل فرکانس ریزشبهه دو نوع کنترلر اولیه و ثانویه استفاده می شود. هر منبع توان دارای مشخصه دروپ منحصر به خود است. این مشخصه در فیدبک گیری از فرکانس خود را به صورت ضریب R نشان



شکل ۶: نمایش واحدهای کنترلی ریزشبهه مورد مطالعه

تولید اتفاق می افتد، انحراف فرکانس ریزشبهه به ثابت اینرسی و ثابت تقاضای بار وابسته خواهد بود. با واحد کنترلر مرکزی اطلاعات فرکانس شبکه را با تاخیر دریافت می کند و به تبع آن، سیگنال های کنترلی با تاخیر به واحدهای قدرت ارسال می شود. کنترلر مرکزی با توجه دو قانون ذکر شده، فرمان قطع و وصل به واحدهای کنترل شونده به منظور تسریع در بهبود رفتار فرکانسی صادر می کند. کنترلر مرکزی برای هر واحد قدرت، یک کنترلر PI و ضریب B و R منحصر به آن واحد قدرت در نظر 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

شکل (۶) نمای کلی مدل دینامیکی مورد مطالعه ریزشبهه به همراه واحدهای کنترلی را نشان می دهد.  $\Delta f$  انحراف فرکانس و سیگنال ورودی کنترلر است و تغییرات توان واحدهای تولید و ذخیره توان به عنوان خروجی این سیستم می باشد. M نشانگر اینرسی معادل کل یک ریزشبهه 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 ذخیره ساز انرژی و بعد کنترلر PI در نظر گرفته شده است. وقتی نامعادلی بین تولید و مصرف به دلیل افزایش یا کاهش بار یا

و از مقدار  $H$  همواره بزرگتر خواهد بود.  $T_{d_i}$  تاخیر سیستم‌های مخابراتی،  $T_{d\_average}$  متوسط تاخیر سیستم‌های مخابراتی.

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

جدول ۱: محدوده تغییر پارامترهای ریزشبهه نسبت به مقادیر نامی

| Parameter          | Limitation    | Parameter | Limitation |
|--------------------|---------------|-----------|------------|
| $H_{Vir\_average}$ | [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 بهینه‌سازی چند هدفه برای جستجوی راه‌حل‌های بهینه استفاده می‌شود. برخلاف روش بهینه‌سازی تک هدفه، در بهینه‌سازی چند هدفه یک راه حل نهایی به عنوان جواب در خروجی الگوریتم ارائه نمی‌شود. بلکه مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه که در اصطلاح به آن جبهه پارتو<sup>۲</sup> 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 بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات (MOPSO<sup>۳</sup>) 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، بر اساس مقادیر توابع هدف، جواب‌ها به کمک مکانیزم فاصله ازدحامی و غلبه، رتبه‌بندی شده و بر اساس آن جمعیت جدید با عملگرهای

مناسب به آن منبع صادر می‌شود. وقتی توان خالص تولیدی از توان خالص مصرفی کمتر می‌شود، افت فرکانسی در ریزشبهه 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 نقطه کار واحدهای تولید افزایش می‌یابد تا افت فرکانسی جبران شود. با افزایش توان تولیدی نسبت به توان مصرفی،  $\Delta f$  و  $\Delta P$  افزایش داشته و مقدار خروجی کنترلرهای PI کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که نقطه کار توان واحدهای تولیدی شدیداً کاهش داشته و به صفر می‌رسد و ذخیره‌سازهای انرژی نیز با حداکثر ظرفیت به جذب توان اضافی خواهند پرداخت.

#### ۴- بهینه‌سازی متغیرهای ریزشبهه

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 پارامترها 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 بهینه‌سازی شود، بایستی از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه استفاده نمود. هدف اول کاهش نوسانات فرکانس ریزشبهه در برابر تغییرات تولید یا مصرف و هدف دوم تعیین حداقل ظرفیت ابرخازن و زمان تاخیر سیستم‌های مخابراتی برای کاهش هزینه‌های زیرساختی ریزشبهه. این دو هدف در تضاد هم هستند. یکی از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، استفاده از الگوریتم NSGA-II<sup>۱</sup> است که یک روش شناخته شده می‌باشد. دو هدف مقاله در دو تابع هدف مجزا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$IAE = \sum_{i=1}^N |Af|_i + |f|_i \quad (7)$$

$$CostF = (H_{Vir\_average} - H) + \frac{T_{d\_average}}{T_d} = H_{Vir} + \frac{T_{d\_average}}{T_d} \quad (8)$$

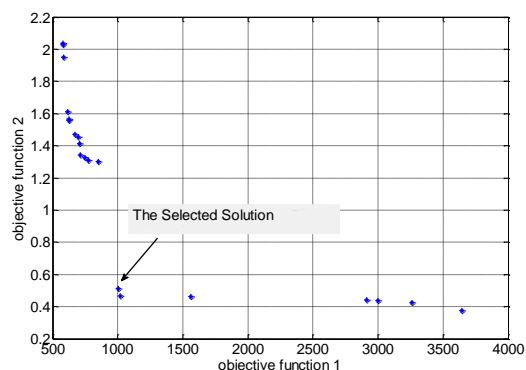
در روابط (۷) و (۸)،  $\Delta f$  نوسانات فرکانس،  $H_{Vir}$  اینرسی مجازی بدست آمده،  $H_{Vir\_average}$  اینرسی مجازی متوسط قابل اعمال در ریزشبهه

<sup>3</sup> Multi-objective Particle Swarm Optimization

<sup>1</sup> Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II

<sup>2</sup> Pareto

سیستم مخابراتی در نظر 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.



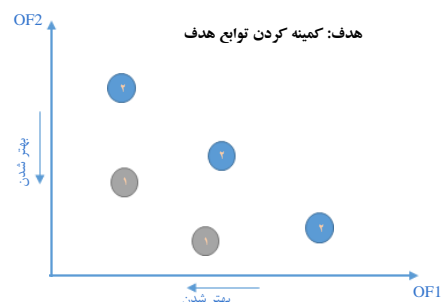
شکل ۸: منحنی پرتو دو تابع هدف ناشی از بهینه سازی NSGA-II

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 <sub>dg</sub>       | 0.244   | kp <sub>dg</sub>   | .7167   |
| ki <sub>dg</sub>       | 0.0032  | ki <sub>dg</sub>   | 0.0024  |
| B <sub>dg</sub>        | 0.1386  | B <sub>dg</sub>    | .1687   |
| R <sub>dg</sub>        | 19.93   | R <sub>dg</sub>    | 17.084  |
| kp <sub>fc</sub>       | 0.0298  | kp <sub>fc</sub>   | 0.0764  |
| ki <sub>fc</sub>       | 0.0043  | ki <sub>fc</sub>   | 0.0025  |
| B <sub>fc</sub>        | .1878   | B <sub>fc</sub>    | 0.2338  |
| R <sub>fc</sub>        | 17.09   | R <sub>fc</sub>    | 12.7212 |
| kp <sub>ac</sub>       | 57.7635 | kp <sub>ac</sub>   | 75.3    |
| ki <sub>ac</sub>       | 7.08    | ki <sub>ac</sub>   | 0.4     |
| B <sub>ac</sub>        | .5923   | B <sub>ac</sub>    | 0.1     |
| R <sub>ac</sub>        | 28.1    | R <sub>ac</sub>    | 16.1    |
| T <sub>d</sub>         | 3       | T <sub>d</sub>     | 4.8     |
| CostF                  | 1.2     | CostF              | 0.513   |

همان طور که در شکل (۷) مشهود است، راه حل های مختلفی توسط الگوریتم NSGA-II پیشنهاد شده است که دست پژوهشگر را در انتخاب راه حل یا راه حل های مناسب باز نگه می دارد. با توجه به هدفی که هر پژوهشگر از عملکرد بهینه سیستم دارد، یک نقطه قابل انتخاب است. در این مقاله، تلاش می شود تا جایی که امکان پذیر است، هم هزینه های 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 شده است، حداقل شود) باشد. لذا راه حلی که در شکل (۸) با فلش نشان داده شده است، انتخاب می گردد. 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

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



شکل ۷: رتبه بندی جوابها در الگوریتم NSGA-II

الگوریتم MOPSO دارای ساختار مبنایی مشابه الگوریتم PSO متداول است. این الگوریتم ذرات اولیه را تشکیل می دهد. به هر ذره سرعتی را تخصیص داده و مورد ارزیابی قرار می گیرد. اعضای نامغلوب جمعیت تفکیک شده و در یک آرشو<sup>۱</sup> خارجی ذخیره می شود. الگوریتم در مراحل کار تعیین می کند که پاسخ های جدید به آرشو اضافه شوند و یا آرشو دست نخورده برای مرحله بعدی استفاده شود. برای ایجاد جبهه های پارتو، از روش شبکه بندی تطبیقی استفاده می شود. در طول فرآیند، هر ذره برای خود یک رهبر تعیین کرده و به سمت آن حرکت می کند. جمعیت جدید تشکیل شده و بر اساس توابع هدف، جمعیت مغلوب حذف و اعضای نامغلوب به آرشو اضافه می شوند. این فرآیند تا تامین شرایط توقف الگوریتم، تکرار می شود. این الگوریتم به صورت جزئی در مرجع [۳۱] تشریح شده است.

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

## ۵- نتایج شبیه سازی

سیستم کنترل فرکانس در یک ریزشکبه معرفی شده در نرم افزار متلب/سیمولینک پیاده سازی شده است. پارامترهای اولیه این ریزشکبه و واحدهای توان در جدول (۲) بیان شده است.

جدول ۲: پارامترهای ریزشکبه

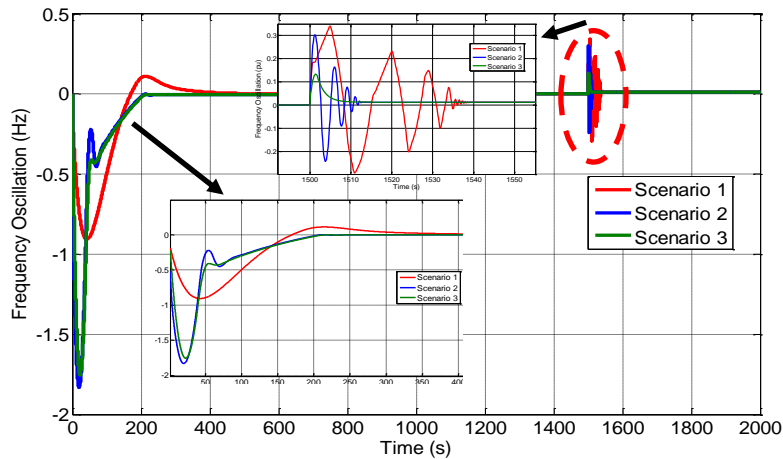
| Parameter       | Value         | Parameter         | Value   |
|-----------------|---------------|-------------------|---------|
| T <sub>uc</sub> | 0.2 (s)       | T <sub>FC</sub>   | 4 (s)   |
| H               | 5 (s)         | T <sub>AC</sub>   | 0.2 (s) |
| D               | 0.012 (pu/Hz) | T <sub>dt</sub>   | 20 (s)  |
| T <sub>dg</sub> | 2 (s)         | f <sub>base</sub> | 50 Hz   |

ابتدا سیستم در سه سناریو شبیه سازی شده است. در سناریوی اول ریزشکبه با اعمال تاخیر در شبکه های مخابراتی با مقادیر پارامترهای غیر بهینه در سناریوی اول یک ریزشکبه با مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی، اینرسی مجازی و تاخیر سیستم های مخابراتی و در سناریوی سوم، تاخیر

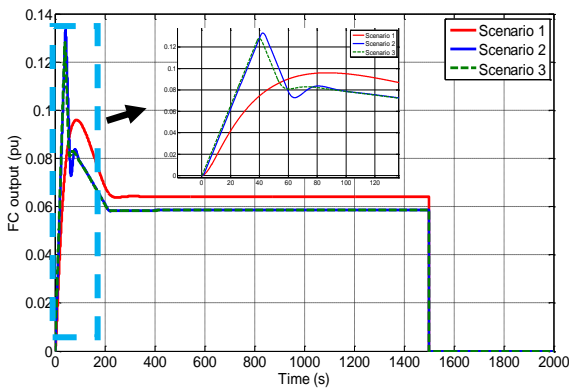
<sup>1</sup> Repository



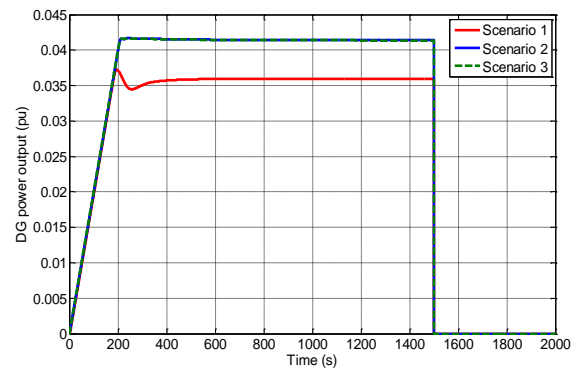
مرجع [۲۷]، بحث شده است، اینرسی مجازی ( $H_{vir}$ ) رابطه مستقیمی با ظرفیت ابرخازن دارد. با توجه به جدول (۳)، مقدار اینرسی مجازی تقریباً ۵ برابر در حالت بهینه، کوچکتر شده و انتظار می‌رود، ظرفیت ابرخازن نیز به همین نسبت کاهش یابد.



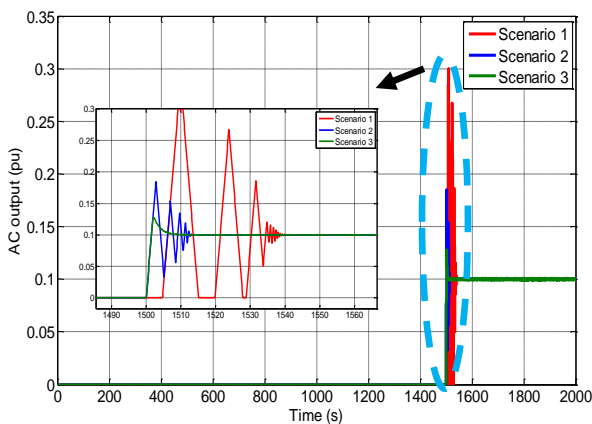
شکل ۹: مقایسه رفتار فرکانسی ریزشیکه در سناریوهای مختلف شبیه سازی



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



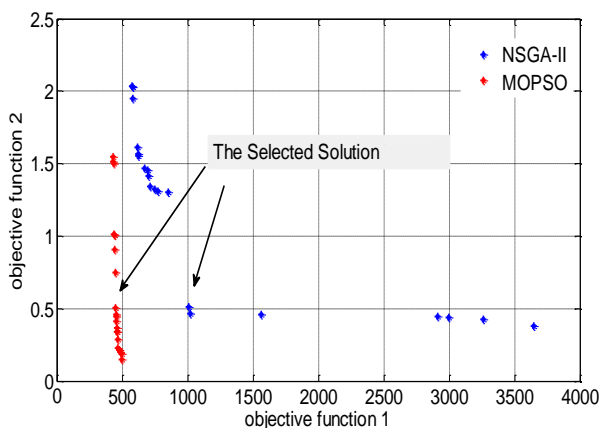
شکل ۱۱: مقایسه رفتار دیزل ژنراتور در سناریوهای مختلف شبیه سازی



شکل ۱۲: مقایسه رفتار الکترولیزور در سناریوهای مختلف شبیه سازی

برای مقایسه بهتر، نتایج سه سناریو در کنار هم در اشکال ترسیم شده است. رفتار فرکانسی ریزشیکه در این قسمت در شکل ۹ نمایش داده شده است. بهبود میرایی نوسانات فرکانسی ریزشیکه با اعمال پارامترهای بهینه کاملاً مشهود است. در ضمن تاخیر در سیستم مخابراتی بر دامنه و زمان نوسانات فرکانس افزوده است. بار ریزشیکه 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 ژنراتور 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.

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

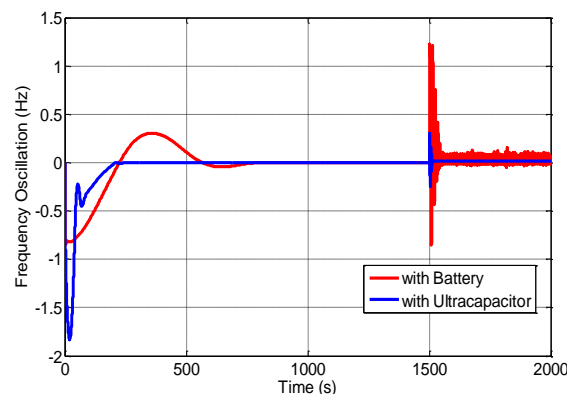


شکل ۱۴: انتخاب راه‌حل‌های بهینه از جبهه پارتو NSGA-II و MOPSO

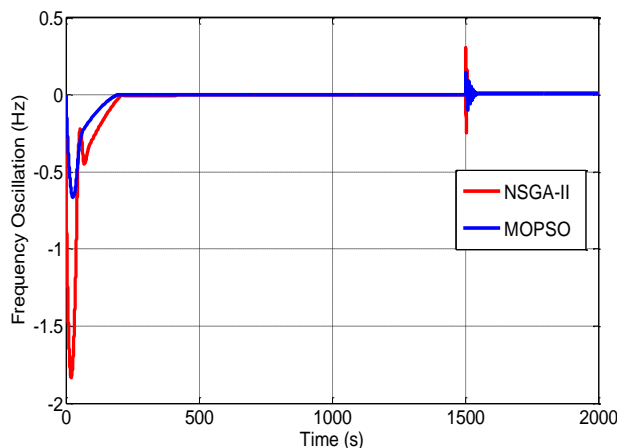
جدول ۴: پارامترهای بهینه بدست آمده برای کنترلرها با روش MOPSO

| Parameter          | Value   | Parameter | Value    |
|--------------------|---------|-----------|----------|
| $H_{Vir\_average}$ | 5.02016 | $B_{fc}$  | 0.2969   |
| $kp_{de}$          | 0.9974  | $R_{fc}$  | 10.2372  |
| $ki_{dg}$          | 0.0044  | $kp_{ac}$ | 73.798   |
| $B_{je}$           | 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    |

سرعت پاسخگویی ریزشکبه به تغییرات بار است. از آنجایی که در بحث تنظیم فرکانس، زمان و دامنه نوسانات فرکانس به طور قابل توجه بر عملکرد سیستم تاثیر گذار است، جایگزینی باتری به جای ابرخازن پیشنهاد نمی‌شود. برای نمایش بهتر این ادعا رفتار فرکانسی ریزشکبه در حضور ابرخازن و باتری در شکل (۱۳) نشان داده شده است. به دلیل رفتار دینامیکی پایین تر 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 ریزشکبه در حضور باتری و ابرخازن



شکل ۱۵: مقایسه رفتار فرکانسی ریزشکبه با اعمال الگوریتم‌های بهینه

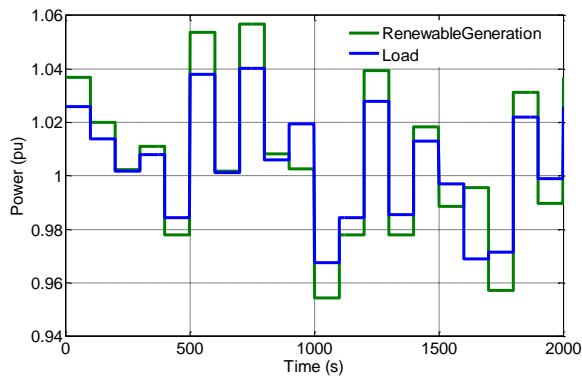
سازی NSGA-II و MOPSO

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

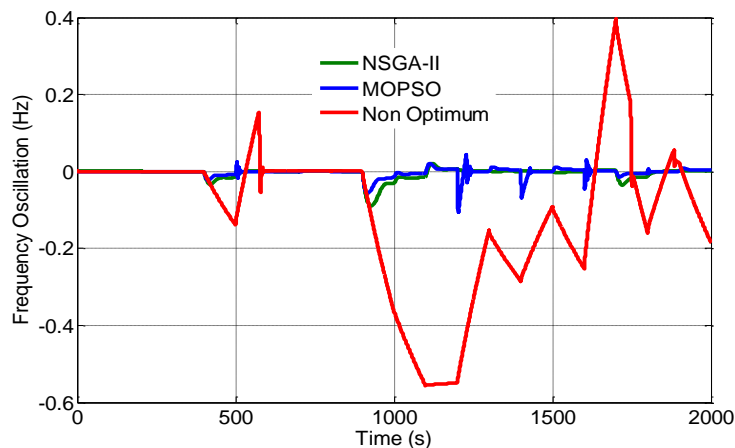
$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{0.0005}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-1}{\sqrt{0.0005}}\right)^2\right) \quad (9)$$

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{0.001}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-1}{\sqrt{0.001}}\right)^2\right) \quad (10)$$

در ادامه، نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم MOPSO در قالب منحنی جبهه پارتو و جدول آورده می‌شود. نتایج خروجی سیستم در حضور پارامترهای بهینه با دو الگوریتم بهینه‌سازی با هم مقایسه می‌شود. جبهه پارتو در حضور دو نوع الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه در شکل (۱۴) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که الگوریتم MOPSO نتوانسته 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 شده است 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 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 در نظر گرفتن نامعینی تولید منابع تجدیدپذیر بار

نسبت به الگوریتم NSGA-II دارای جواب‌های بهتری به لحاظ کاهش هزینه‌ها و بهبود رفتار فرکانسی دارد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک ریزشیکه 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 در نظر گرفته شده است. پایداری فرکانسی بار در ریزشیکه با حضور واحد ابرخازن و اعمال تاخیز ناشی از سیستم‌های ارتباطی مورد تحقیق قرار گرفت. مدل مرتبه اول برای خطا در سیستم مخابراتی لحاظ شده است. 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 می‌شود ولی هزینه بهره‌برداری از ریزشیکه 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 هزینه‌ها محقق شود. در ریزشیکه مورد مطالعه، برای بررسی کارآمدی استراتژی شبکه برای غلبه بر نوسانات فرکانس، در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی انجام شده است. نتایج نشان داد که دو الگوریتم بهینه‌سازی در بهبود رفتار فرکانسی و کاهش هزینه‌ها تاثیر به‌سزایی دارند. الگوریتم MOPSO نیز

## 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

- [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 بی؛ محمد مهدی قنبریان. "کنترل فرکانس ریزشبهه‌ی 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. Sigríst, I. Egidio, 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 Llaría, 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" *جمله 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 Villafafila-Robles, R., 2012. A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(4), pp.2154-2171.

- [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.