Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 70-81

Vol. 11/ No. 1/ Spring 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

A new multi-objective load shedding method to reduce power outages and frequency stability in the islanded microgrid

Reza Eslami[1]
1- Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
Email: eslami@sut.ac.ir (Corresponding author)

Abstract:
Power systems are complex systems that are not easy to understand and analyze. Also, many faults and incidents occur in these systems, many of which are mended without human interference. Meanwhile, electricity companies are responsible for the security of power systems and operators because if any part of the power system acts as an unwanted island, it may be unsafe for grid personnel and may result in serious damages to grid equipment. Therefore, it is important and necessary to identify the parts of the grid, which have become islands, and apply load shedding to abolish these islands. This paper proposes a new approach for load shedding in the islanded microgrid in the presence of distributed generations. Features of the proposed method include high flexibility, speed, and accuracy. The proposed method is simulated by powerful DIgSILENT software, and the simulation results support the capability of the proposed method.

Keywords: Load shedding, Frequency stability, Islanded microgrid, Multi-objective optimization

Submit date: 2021/05/03
Accepted date: 2021/09/18

Corresponding author Name: Reza Eslami
Corresponding author address: Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص 81- 70

Vol. 11 / No. 1/ Spring 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

روش جدید بار زدایی چندهدفه برای کاهش قطعی برق و پایداری فرکانس در ریزشبکه جزیره‌ای

نوع مطالعه: پژوهشی

رضا اسلامی[1]

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند تبریز- تبریز- ایران
eslami@sut.ac.ir

چکیده: سیستم قدرت یک سیستم پیچیده است که درک و تحلیل آن آسان نیست. همچنین خطاها و اتفاقات زیادی در سیستم مذکور رخ می‌دهد که بسیاری از آن‌ها بدون دخالت انسان اصلاح می‌شود. در این میان شرکت‌های برق مسئولیت امنیت سیستم‌ها و اپراتورهای برق را بر عهده‌دارند، زیرا اگر هر قسمت از سیستم قدرت به‌عنوان جزیره ناخواسته عمل کند، ممکن است برای پرسنل شبکه ناامن باشد و همچنین ممکن است آسیب‌های جدی به تجهیزات شبکه وارد کند. بنابراین، شناسایی بخش‌هایی از شبکه که به جزیره تبدیل‌شده‌اند، مهم و ضروری است و برای از بین بردن این جزایر، کاهش بار اعمال می‌شود. در این مقاله، رویکرد جدیدی برای کاهش بار در ریز شبکه جزیره‌ای با حضور تولیدات پراکنده پیشنهادشده است. از ویژگی‌های روش پیشنهادی می‌توان به انعطاف‌پذیری، سرعت و دقت بالا اشاره کرد. روش پیشنهادی توسط نرم‌افزار قدرتمند DIgSILENT شبیه‌سازی‌شده و نتایج شبیه‌سازی باقابلیت روش پیشنهادی مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: بار زدایی- پایداری فرکانس- ریزشبکه جزیره‌ای- بهینه‌سازی چندهدفه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۶/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول : رضا اسلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند تبریز- تبریز- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

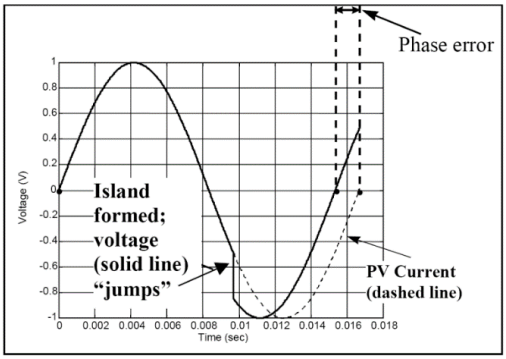
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

۱- مقدمه

درزمینه‌ی صنعت برق، تحول عظیمی در سیستم‌های تولید و انتقال انرژی در اکثر کشورهای توسعه‌یافته رخداده است که دارای مزایای متعددی در موارد فنی و اقتصادی شبکه‌های تولید و انتقال هست. این سیستم جدید تولید انرژی، تولیدات پراکنده (DG) نامیده می‌شود.

علیرغم تمام مزایای DG ها، وجود DG ممکن است اثرات منفی بر پروفیل‌های ولتاژ و هماهنگی حفاظت در شبکه‌های توزیع داشته باشد، بنابراین بهره‌برداری و کنترل شبکه پیچیده‌تر می شود (Cosovic et al., 2021). اتصال DG ها به شبکه باعث ایجاد هارمونیک و کاهش امپدانس اتصال کوتاه می‌شود. علاوه بر این، اگر DG های متصل به شبکه در هنگام قطعی برق به‌عنوان جزیره کار کنند، می‌توانند برای پرسنل شبکه خطرناک باشد. جزیره‌ای به معنای قطع برق خواسته یا ناخواسته بخشی از سیستم توزیع از منبع اصلی برق است. شکل (۱) تغییرات ولتاژ را در طول جزیره‌ای نشان می‌دهد.

کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه یکی از موارد مهم در یک پارچگی شبکه است. بنابراین فرکانس و ولتاژ و به‌طورکلی تمامی پارامتر های اساسی شبکه باید در بازه زمانی معین (پس از وقوع شرایط اضطراری) به حالت قابل‌قبول خود برگردند. کاهش بار یکی از روش‌های رایج برای کنترل وضعیت‌های اضطراری شبکه است. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی درزمینه کاهش بار انجام‌شده است.



شکل (۱): تغییرات ولتاژ در طول تشکیل ریزشبکه جزیره‌ای

طرح ارائه شده در (Sun et al., 2021) برای حفاظت از سیستم مناسب نبود. در این مطالعه استراتژی کاهش بار بر اساس شاخص‌های ولتاژ و فرکانس در نظر گرفته شد. در این استراتژی، کاهش بار خارج از محدوده ولتاژ و فرکانس موردنظر، با توجه به منحنی Q-V توان راکتیو انجام شد. علاوه بر این، تابع هدف این مقاله، سیستم را در شرایط اضطراری شدید ترکیبی قرار می‌داد که در آن میزان کاهش بار ازنظر اقتصادی مهم نبود. مرجع (Azizi et al., 2020) تجربه اپراتور را به‌عنوان مبنایی برای کاهش بار اعلام کرد و مدل دقیق بار را برای نتایج بهتر توصیه کرد. در این مقاله، ریز شبکه به جزایر کوچک‌تر تقسیم‌شده و کاهش بار بر اساس نرخ اغتشاش انجام شد. در این روش زمان تأخیر هر مرحله مقدار بیشتری در نظر گرفته شد، بنابراین این روش کنترلی در ریزشبکه های کم توان که باید در کمترین زمان ممکن پایدار شوند، نامناسب بوده و باعث ازهم‌پاشیدگی این ریز شبکه ها می‌شود. در (Kabir et al., 2020)، یک مکانیسم جدید کاهش بار تطبیقی پویا در صورت از دست دادن تصادفی تولید در شبکه ارائه‌شده است. در این روش باس های مختلف بر اساس شاخص ولتاژ برای شرکت در برنامه کاهش بار اولویت‌بندی می شوند. در (Parniani et al., 2006) سرعت و دقت به‌عنوان عوامل اساسی در کاهش بار فرکانس برای حفظ پایداری ریز شبکه معرفی و استفاده از سیستم SCADA برای بهبود کاستی‌های مدل حفاظت تطبیقی ارائه شد. اگرچه در این روش از دقت بالایی استفاده شده است، اما در صورت بروز مشکل در سیستم اسکادا قابل‌اجرا نبوده و به دلیل هزینه بالای آن در ریزشبکه های کوچک از این روش استفاده نمی‌شود. همچنین، یک استراتژی کاهش بار استاتیکی در (Yan et al., 2020) پیشنهاد شد که در آن مقدار ثابتی از بار با کاهش فرکانس قطع می شد. در (Wang et al., 2019)، روشی در سیستم کنترل مرکزی برای انجام تخلیه سریع بار ارائه شد که در ریزشبکه های کم‌توان قابل‌اجرا نبود. در (Hirodontis et al., 2009)، مشکلات کاهش بار تطبیقی مانند تخمین دامنه اختلال، موقعیت های برش و اقدامات کنترلی توسط رله‌ها معرفی شد. مرجع (Santos et al., 2019) دارای یک سیستم چندعاملی سلسله مراتبی مرکزی است که مراحل مختلف نظارت و فرآیندهای تصمیم‌گیری را هماهنگ می‌کند. این مقاله با عنوان کاهش اختلالات فرکانس در شبکه با حداقل میزان خاموشی در کمترین زمان ممکن می‌شود.

در مقاله‌ای دیگر، نویسنده ادعا کرد که اگر چندین منبع در ریز شبکه ها وجود داشته باشد، بهتر است نتیجه نمودارهای نرخ تغییر فرکانس را در نظر بگیریم. در استاندارد کاهش بار اسلوونی، چهار مقدار فرکانس آستانه تعریف‌شده است که در آن درصد بار قطع‌شده از کل ریز شبکه برای هر فرکانس آستانه با در نظر گرفتن نرخ اختلال تعریف‌شده است. مقاله مذکور بیشتر بر اصلاح ضرایب درصد بار قطع‌شده تمرکز داشت. این مقاله شامل نتایج مطلوب برای ریزشبکه های توان بالا هست. اما برای ریزشبکه های کم توان مفید نبود (Rudez et al., 2011). در (Rudez et al., 2021)، نویسندگان نشان دادند که در یک مورد از پنج مورد کاهش بار، می‌توان پاسخ مناسبی به کمبود برق به دست آورد. همچنین با توجه به اینکه شیب (نرخ تغییر فرکانس) به‌تنهایی قادر به پاسخ قانع‌کننده نیست، نویسندگان نرخ تغییر فرکانس را برحسب ولتاژ پیشنهاد کردند. مرجع (Sapari et al., 2017) فرکانس شبکه را با بیرون انداختن بارهای اضافی ثابت کرد و با حذف باس های حساس، شبکه را تثبیت کرد. بااین حال، این روش را تنها برای شبکه‌های حاوی دو ژنراتور آبی کوچک تجزیه‌وتحلیل کرد. علاوه بر این، (Rudez et al., 2011) نشان داد که تقعر در فرکانس ریزش بار قابل‌تعیین است. اما اختلالات بزرگ منجر به کاهش فرکانس ریزشبکه شد و ولتاژ باس ها به کمبود توان‌های اکتیو و راکتیو یا به اطلاعات

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

عدم تعادل بین بار و تولید وابسته بود. در (Girgis et al., 2010)، نرخ تغییر فرکانس برای تخمین دامنه اغتشاش و نرخ تغییر ولتاژ مربوط به توان راکتیو برای شناسایی باس‌ها استفاده شد که نیاز به کاهش بار داشتند. برای محاسبه نرخ تغییر فرکانس و ولتاژ، با استفاده از دستگاه‌هایی مانند پایداری عددی یا واحدهای اندازه‌گیری فاز یا روش‌هایی مانند فیلتر کالمن برای تخمین پارامترها پیشنهاد شد. این روش نتایج خوبی به همراه داشت. بااین‌حال، در ریز شبکه‌های مدرن، حداقل در ریزشبکه‌های کم‌توان، بارها غالباً اولویت‌بندی می شوند و نمی‌توان گفت که کاهش بار باید طبق شرایط اولویت ریز شبکه انجام شود (Girgis et al., 2010). در (Ford et al., 2009)، یک کاهش بار تطبیقی جدید ارائه‌شده است که از کاهش زیاد فرکانس در شرایط اضطراری جلوگیری می‌کند و اضافه‌بار خط را به حداقل می‌رساند. اندازه و موقعیت اغتشاش در مدل‌های غیرمتمرکز مشخص نبود، بنابراین نرخ اغتشاش وابسته به نرخ تغییر فرکانس و ثابت اینرسی و تغییر موضعی فرکانس اغتشاش بود. درنتیجه، تلاش شد تا مقدار فرکانس آستانه با استفاده از این موارد در این مطالعه بهینه شود. سپس با میانگین‌گیری نمودار فرکانس ریز شبکه (کل مناطق در ریزشبکه)، اگر میانگین فرکانس ریز شبکه کمتر از مقدار فرکانس آستانه بود، کاهش بار انجام شود. . در (Hirodontis et al., 2009) علاوه بر پایداری فرکانس، پایداری ولتاژ نیز در نظر گرفته شد و معادله نوسان و سیستم‌های مخابراتی به ترتیب برای محاسبه دامنه اختلال و انتقال اطلاعات استفاده شدند. در این روش، انتخاب زمان نمونه‌برداری کوچک (زمان نمونه‌برداری اطلاعات برای ارسال) مشکلاتی ازجمله انحراف در نوسانات طبیعی فرکانس ایجاد کرد. همچنین سیستم‌های مخابراتی قادر به انتقال اطلاعات در مدت کوتاهی نبودند. در این روش برای هر ایستگاه یک رله پیشنهاد شد. این رله‌ها برنامه کاهش بار را بر اساس سطح ولتاژ باس های خاص در صورت تغییر فرکانس اجرا می‌کردند و آن باس‌ها به زیر مقدار آستانه رسیدند. هزینه در این مقاله ملاک نبود و فقط جنبه فنی موردبحث قرار گرفت. طبق (Arulampalam et al., 2010)، زمانی که فرکانس ریزشبکه به مقدار کمتر از فرکانس آستانه کاهش یافت، کاهش بار بر اساس نرخ تغییر فرکانس انجام شد. در این مقاله سعی شد فرکانس آستانه اصلاح شود. اما با مشکل نوسانات فرکانس نرمال در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس نرمال مواجه شد. بنابراین در مقاله مذکور از حلقه کنترل فاز برای حل این مشکل و انتخاب فرکانس دقیق استفاده‌شده است. علاوه بر این، شش مرحله با شش فرکانس آستانه متفاوت برای کاهش بار در نظر گرفته شد. یکی دیگر از استراتژی‌های کاهش بار مبتنی بر اندازه‌گیری بار آنلاین و منحنی فرکانس بار بود. اما اطلاعات بار در زمان واقعی همیشه در دسترس نبود و اندازه‌گیری بار آنلاین برای سیستم‌های توزیع کوچک گران بود. علاوه بر این، تعیین وابستگی فرکانس بار ریزشبکه اغلب دشوار است. در استراتژی کاهش بار تطبیقی، تنظیم رله با منحنی فروپاشی فرکانس تغییر یافت (Zhang et al., 2006)، که بر اساس اطلاعات فرکانس، مقدار بار خارج‌شده تعیین شد (Kolluri et al., 2015). استراتژی کاهش بار تطبیقی به داده‌های زمان واقعی بارها و تولیدات نیاز داشت و همچنین تعیین اینرسی ریزشبکه دشوار بود. مسائل ذکرشده در بالا برای ریزشبکه حاوی منابع تولید در مقیاس نیروگاه‌های بزرگ بود. در (Mahat et al., 2010)، کاهش بار ریزشبکه جزیره‌ای، که توسط DG های کم‌توان تأمین می‌شود، موردبحث قرار گرفت. کاهش بار سیستم توزیع جزیره‌ای به دلیل مشخصات متفاوت باید با سیستم‌های قدرت بالا متفاوت باشد. اکثر ژنراتور ها دارای اینرسی کوچک در سیستم توزیع جزیره‌ای هستند، بنابراین فرکانس تمایل به فروپاشی سریع‌تر دارد. در مرجع (Shekari et al., 2018) یک روش کاهش بار توسط کنترل‌کننده مرکزی در سه مرحله پیشنهادشده است. در مرحله اول الزامات روش پیشنهادی تعیین می‌شود. مقدار بهینه و مکان بهینه کاهش بار موردنیاز در مرحله دوم تعیین می‌شود و درنهایت در مرحله سوم نوع رویداد رخداده در فرآیند بلادرنگ تعیین می‌شود که بر اساس آن برنامه کاهش بار از پیش تعیین‌شده بر روی شبکه اعمال می‌شود.

۲- روش پیشنهادی کاهش بار در ریزشبکه جزیره‌ای در حضور منابع تولید پراکنده

۲-۱- معرفی تابع هدف مقاله

کاهش بار با حضور DG ها یک فرآیند بهینه سازی است که برای اهداف مختلفی انجام می‌شود. این اهداف در قالب پارامتر های تابع هدف وارد مسئله بار زدایی می‌شوند. ازآنجایی‌که مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته‌شده در این مقاله کاهش بار با حضور DG ها بر اساس عوامل پایداری و قابلیت اطمینان در پست‌های فرعی انتقال است، این عوامل وارد تابع هدف خواهند شد. سپس با تجزیه‌وتحلیل هر یک از توابع هدف و نقاط ضعف و قوت آن‌ها، تابع هدفی که می‌تواند نتایج بهتری داشته باشد انتخاب‌شده و جداول ارائه‌شده برای هر یک از این ۸ تابع هدف مورداستفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲- عوامل مؤثر بر کاهش بار در حضور منابع تولید پراکنده

روش جدید ارائه‌شده در این مقاله دارای مراحل زیر برای دستیابی به پایداری ریزشبکه جزیره‌ای در کوتاه‌ترین زمان ممکن است:

• ایجاد جدول انتخاب بر اساس ضریب تمایل به پرداخت هر مشترک (تشکیل این جدول بر اساس روش ارائه شده در مطالعه (Mahat et al., 2010) انجام‌شده است).

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

• پس از ارائه جدول انتخاب و اولویت خروج بار، با ایجاد ۸ تابع هدف که در ادامه معرفی می‌شوند، یک پروژه اصلی و ۳ پروژه فرعی در نرم‌افزار DIgSILENT به‌منظور کاهش افت فرکانس شبکه، کاهش اورشوت فرکانس ریزشبکه و تعیین زمان‌هایی که این فرکانس‌ها رخ خواهند داد، نوشته می‌شود. توابع هدف تحلیل‌شده و بهترین تابع برای دستیابی به کوتاه‌ترین زمان ممکن برای دستیابی به پایداری انتخاب می‌شود. این کار با پیوند دادن دو نرم‌افزار DIgSILENT و Matlab انجام می‌شود که در آن الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک نوشته‌شده است. در ادامه، استراتژی کاهش بار پیشنهادی تحلیل می‌شود که متغیرهای شبکه را در قالب ۸ تابع هدف پوشش می‌دهد.

❖ تابع هدف اول:

به‌عنوان اولین گام، فرمول زیر برای کاهش اختلاف بین حداکثر فرکانس ایجادشده و فرکانس پایه معرفی‌شده است:

$$\Delta f = abs\left|50 - f_{Overshot}\right| \quad (۱)$$

$f_{Overshoot}$ در رابطه (۱) حداکثر فرکانس تولیدشده در شبکه به دلیل ایجاد حالت جزیره‌ای است.

❖ تابع هدف دوم:

با کمک این تابع هدف می‌توان تفاوت بین فرکانس و فرکانس پایه را به حداقل رساند. به‌منظور بررسی میزان تأثیر این پارامتر در دستیابی به اهداف فوق، رابطه (۲) به‌طور جداگانه تعریف و تحلیل خواهد شد.

$$\Delta f = abs\left|50 - f_{Min}\right| \quad (۲)$$

❖ تابع هدف سوم:

یکی از عوامل در نظر گرفته شده برای دستیابی به پاسخ مناسب، تحلیل حداکثر فرکانس ایجادشده در شبکه و همچنین حداقل فرکانس ایجادشده در ریزشبکه به‌طور هم‌زمان است. بنابراین در این مرحله بهترین حالتی که در آن با قطع بار حداقلی، حداقل افت فرکانس و حداقل افت فرکانس به دست می‌آید، تحلیل می شود. بنابراین، تابع هدف برای این منظور در رابطه (۳) نوشته‌شده است.

$$\Delta f = abs\left|50 - f_{\min}\right| + abs\left|50 - f_{Overshot}\right| \quad (۳)$$

❖ تابع هدف چهارم:

تابع هدف داده‌شده در رابطه (۴) برای بررسی زمان وقوع حداکثر فرکانس شبکه و حداکثر افت فرکانس استفاده می‌شود.

$$\Delta f = Time_{f_{\min}} + Time_{f_{\max}} \quad (۴)$$

در تابع هدف (۴)، $Time_{f_{\min}}$ و $Time_{f_{\max}}$ زمان هایی هستند که به ترتیب حداقل و حداکثر فرکانس شبکه رخ می‌دهد.

❖ تابع هدف پنجم:

یکی از عوامل مهم در نظر گرفته شده در این مقاله، زمان رخ دادن حداکثر افت فرکانس در شبکه است. برای این منظور، در تابع هدف داده‌شده در رابطه (۵)، زمان افت فرکانس بهینه معرفی‌شده است. این زمان بهینه زمانی است که افت فرکانس در حداقل مقدار خود باشد.

$$\Delta f = Time_{f_{\min}} \quad (۵)$$

❖ تابع هدف ششم:

در نظر گرفتن هم‌زمان حداکثر فرکانس رخ‌داده در شبکه همراه بازمانی که در آن این فرکانس ایجاد می‌شود، در تابع هدف دیگری که توسط رابطه (۶) مشخص‌شده است، ارائه‌شده است. در این تابع هدف، برای نرمالایز کردن عوامل مختلف، عوامل در ضریب وزنی ضرب می‌شوند. این ضریب وزنی اهمیت عوامل را نشان می‌دهد.

$$\Delta f = \lambda \times Time_{f_{\min}} + \lambda \times abs\left|50 - f_{\min}\right| \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، λ برابر با ۰.۱ است.

❖ تابع هدف هفتم:

به‌منظور تجزیه‌وتحلیل جداگانه زمانی که حداکثر فرکانس در شبکه رخ می‌دهد، تابع هدف دیگری با در نظر گرفتن نکات بیان‌شده در مرحله قبل تعریف می‌شود.

$$\Delta f = \lambda \times Time_{f_{\max}} + abs\left|50 - f_{\max}\right| \quad (۷)$$

❖ تابع هدف هشتم:

به‌منظور بررسی جامع و مقایسه سناریوهای مختلف مهم، یک روش کاهش بار جدید در این مقاله ارائه‌شده است که تمام اهداف کاهش بار ذکرشده در روابط (۱) تا (۷) را پوشش می‌دهد. این تابع هدف کلی در رابطه (۸) معرفی‌شده است. همان‌طور که در نتایج شبیه سازی نشان داده خواهد شد، مطمئناً این روش انعطاف پذیری، سرعت و دقت بالاتری دارد.

$$\begin{aligned}\Delta f &= \lambda \times Time_{f_{\max}} + abs\left|50 - f_{\max}\right| \\ &+ \lambda \times Time_{f_{\min}} + \lambda \times abs\left|50 - f_{\min}\right|\end{aligned} \quad (۸)$$

۳-۲- مدل‌سازی سیستم توزیع موردمطالعه

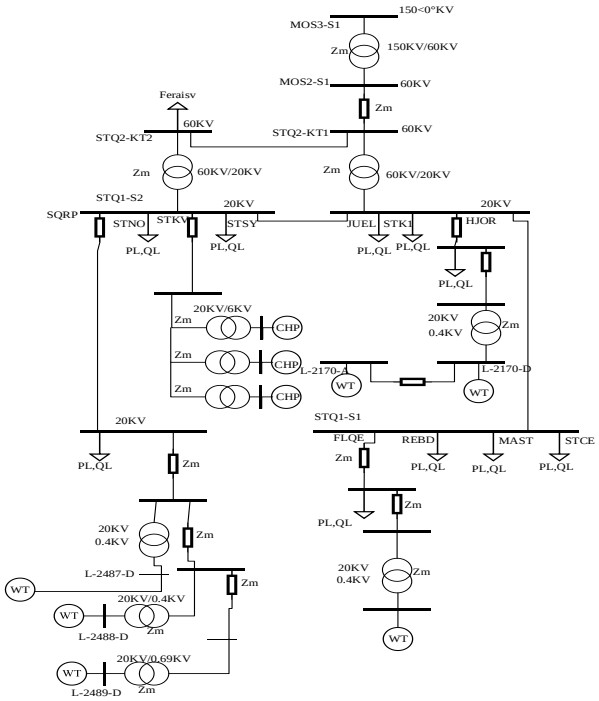
یک ریزشبکه واقعی ۲۰ کیلووات متعلق به کارخانه Himmerland Elforsynig در دانمارک برای این مطالعه انتخاب‌شده است (Dai et al., 2010). نمودار تک‌خطی سیستم توزیع در شکل (۲) نشان داده‌شده است. در این ریزشبکه، ۱۱ فیدر شعاعی به نام های JUEL، STK1، HJOR، FLOE، REBD، MAST، STCE، SORP، STNO، STKV، STSY و جود دارد. یک نیروگاه CHP (ترکیب حرارت و برق) با ۳ ژنراتور توربین گازی در فیدر STKV وجود دارد. همچنین ۳ توربین بادی با سرعت ثابت در فیدر SORP وجود دارد. برای آزمایش روش پیشنهادی از فیدرهای SORP، STKV، STNO، STSY، JUEL، FLOE، MAST، STCE استفاده شد. کل سیستم توزیع موردمطالعه در مدل‌های استاندارد نرم‌افزار DIgSILENT

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

v.14.1.3 مدل‌سازی شد. در این مطالعه توربین‌های بادی به‌عنوان یک سیستم دو جرمی مدل سازی شدند که برای مطالعه حالت گذرا سیستم قدرت مناسب است (Singh et al., 2019). ضریب قدرت تمامی توربین‌ها ۱ فرض شد.

در هشت تابع هدف که در بالا معرفی شدند، ضریب بارهای توان ثابت ۰ و ضریب بارهایی که شدیداً به فرکانس و ولتاژ وابسته هستند، ۱ است. بنابراین به‌منظور متعادل کردن نرخ تغییر فرکانس، برای این ضرایب مقدار ۰.۵ در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۲): یک ریزشبکه محلی در دانمارک

در جدول انتخاب، که در آن اولویت قطع بارها تعریف‌شده است، نرخ تغییر هر پارامتر (یعنی نرخ تغییر فرکانس، نرخ تغییر فرکانس وابسته به ولتاژ، کمبود توان) موجود است. این جدول برای این است که ببینید چند بار باید حذف شود تا کمبود توان اکتیو ریزشبکه جبران شود. در این راستا ۳ سناریو در نظر گرفته‌شده به شرح زیر است:

سناریوی اول (جدول (۱)): فرض بر این است که بارهای با توان کمتر هزینه کمتری به شرکت‌های توزیع می‌دهند. بر این اساس، چیدمان بارها بر اساس هزینه برابر است با چیدمان بارها به ترتیب حداقل تا حداکثر توان الکتریکی.

سناریوی دوم (جدول (۲)): فرض بر این است که هزینه بارها هیچ ارتباطی با توان آن‌ها ندارد. بنابراین، چیدمان بارها بر اساس هزینه، تابعی تصادفی ازنظر توان آن‌هاست.

سناریوی سوم (جدول (۳)): مانند سناریوی دوم، بارها به صورت تصادفی مرتب می‌شوند، با این تفاوت که حداکثر توان الکتریکی در اولویت اول است.

ازآنجایی‌که تغییرات فرکانس می‌تواند در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی به دلیل رخدادهای گذرا مختلف رخ دهد، دوره زمانی تغییرات فرکانس مهم است. بنابراین نرخ تغییرات فرکانس در طول زمان برای تشخیص حالت جزیره‌ای استفاده می‌شود. رابطه (۹) نحوه محاسبه نرخ تغییر فرکانس را نشان می‌دهد.

$$R_O C_O F = \frac{df}{dt} = \frac{f_2 - f_1}{t_2 - t_1} \qquad (۹)$$

در معادله (۹)، dt برای هر بار در جدول انتخاب ۱۰ میلی‌ثانیه قرار داده‌شده است. علاوه بر این، df اختلاف فرکانس در ریز شبکه جزیره‌ای است که برابر با نیم سیکل است (فرکانس ریزشبکه ۵۰ هرتز است).

جدول (۱): جدول انتخابی مرتب‌شده بر اساس کمترین تا بیشترین توان الکتریکی بارها

مرتبه بار (LN)	سناریو اول							
	نام بار	تمایل به پرداخت هر بار	نرخ تغییر فرکانس	جمع نرخ تغییر فرکانس	نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	جمع نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	کمبود توان (dp)	جمع کمبود توان (dp)
۱	Load 09	۰.۸۱	-۲۱.۷	-۲۱.۷	-۱.۷۰۲۷	-۱.۷۰۲۷	-۸۳.۵۰۹۹	-۸۳.۵۰۹۹
۲	Load 10	۰.۸۳	-۲۱.۷	-۴۳.۴	-۱.۷۰۲۷	-۳.۴۰۵۴	-۸۳.۵۰۹۹	-۱۶۷.۰۱۹۹
۳	Load 11	۰.۸۶	-۲۱.۷	-۶۵.۱	-۱.۷۰۲۷	-۵.۱۰۸۱	-۸۳.۵۰۹۹	-۲۵۰.۵۲۹۹
۴	Load 07	۰.۸۷	-۲۵.۱	-۹۰.۲	-۱.۷۹۰۸	-۶.۸۹۸۹	-۸۸.۵۹۳۵	-۳۳۹.۱۲۳۵
۵	Load 08	۰.۸۹	-۲۸.۵	-۱۱۸.۷	-۱.۸۷۳۶	-۸.۷۷۲۶	-۹۳.۴۵۸۶	-۴۳۲.۵۸۲۱
۶	JUEL	۰.۹۱	-۲۹.۶	-۱۴۸.۳	-۱.۹۰۱۰	-۱۰.۶۷۳۷	-۹۴.۷۴۴۴	-۵۲۷.۳۲۶۶
۷	STCE	۰.۹۲	-۳۲.۵	-۱۸۰.۸	-۱.۹۸۲۴	-۱۲.۶۵۶۱	-۹۹.۴۹۴۸	-۶۲۶.۸۲۱۴
۸	FLOE	۰.۹۳	-۴۰.۹	-۲۲۱.۷	-۲.۲۰۸۴	-۱۴.۸۶۴۶	-۱۱۱.۹۸۸۳	-۷۳۸.۸۰۹۸
۹	STSY	۰.۹۵	-۴۱.۱	-۲۶۲.۸	-۲.۲۱۵۱	-۱۷.۰۷۹۷	-۱۱۲.۲۸۳۳	-۸۵۱.۰۹۳۱
۱۰	STNO	۰.۹۶	-۳۸.۷	-۳۰۱.۵	-۲.۱۴۶۹	-۱۹.۲۲۶۶	-۱۰۸.۶۳۱۵	-۹۵۹.۷۲۴۶
۱۱	MAST	۱	-۴۸.۹	-۳۵۰.۴	-۲.۴۴۰۴	-۲۱.۶۶۷۱	-۱۲۵.۱۹۱۸	-۱۰۸۴.۹۱۶۴

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

جدول (۲): جدول انتخابی مرتب‌شده بر اساس تابع تصادفی توان بارها

مرتبه بار (NL)	سناریو دوم							
	نام بار	تمایل به پرداخت هر بار	نرخ تغییر فرکانس	جمع نرخ تغییر فرکانس	نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	جمع نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	کمبود توان (dp)	جمع کمبود توان(dp)
۱	STSY	۰.۷۹	-۴۱.۱	-۴۱.۱	-۲.۲۱۵۱	-۲.۲۱۵۱	-۱۱۲.۲۸۳۳	-۱۱۲.۲۸۳۳
۲	Load 10	۰.۸۴	-۲۱.۷	-۶۲.۸	-۱.۷۰۲۷	-۳.۹۱۷۸	-۸۳.۵۰۹۹	-۱۹۵.۷۹۳۳
۳	STNO	۰.۸۵	-۳۸.۷	-۱۰۱.۵	-۲.۱۴۶۹	-۶.۰۶۴۷	-۱۰۸.۶۳۱۵	-۳۰۴.۴۲۴۸
۴	Load 09	۰.۸۶	-۲۱.۷	-۱۲۳.۲	-۱.۷۰۲۷	-۷.۷۶۷۴	-۸۳.۵۰۹۹	-۳۸۷.۹۳۴۸
۵	STCE	۰.۸۹	-۳۲.۵	-۱۵۵.۷	-۱.۹۸۲۴	-۹.۷۴۹۸	-۹۹.۴۹۴۸	-۴۸۷.۴۲۹۶
۶	Load 07	۰.۹	-۲۵.۱	-۱۸۰.۸	-۱.۷۹۰۸	-۱۱.۵۴۰۷	-۸۸.۵۹۳۵	-۵۷۶.۰۲۳۲
۷	Load 08	۰.۹۱	-۲۸.۵	-۲۰۹.۳	-۱.۸۷۳۶	-۱۳.۴۱۴۴	-۹۳.۴۵۸۶	-۶۶۹.۴۸۱۸
۸	FLOE	0.95	-۴۰.۹	-۲۵۰.۲	-۲.۲۰۸۴	-۱۵.۶۲۲۹	-۱۱۱.۹۸۸۳	-۷۸۱.۴۷۰۲
۹	Load 11	۰.۹۸	-۲۱.۷	-۲۷۱.۹	-۱.۷۰۲۷	-۱۷.۳۲۵۶	-۸۳.۵۰۹۹	-۸۶۴.۹۸۰۲
۱۰	JUEL	۰.۹۹	-۲۹.۶	-۳۰۱.۵	-۱.۹۰۱۰	-۱۹.۲۲۶۶	-۹۴.۷۴۴۴	-۹۵۹.۷۲۴۶
۱۱	MAST	۱	-۴۸.۹	-۳۵۰.۴	-۲.۴۴۰۴	-۲۱.۶۶۷۱	-۱۲۵.۱۹۱۸	-۱۰۸۴.۹۱۶۴

در جداول از نرخ تغییر فرکانس، نرخ تغییر فرکانس وابسته به ولتاژ و کمبود برق ریزشبکه استفاده‌شده است. اما در قطع تعدادی از بار ها درمرحله اول تفاوت معنی‌داری بین این روش و روش پیشنهادی در (Mahat et al., 2010) مشاهده نشد. روابط ریاضی این دو تابع (نرخ تغییر فرکانس بستگی به ولتاژ و کمبود توان ریز شبکه دارد) در (Sapari et al., 2017) موجود است که در رابطه (۱۰) نمایش داده‌شده است.

$$P_{def} = \frac{2H_{COI}}{f_N}.100.\frac{df_{COI}}{dt} + \sum_{i=1}^{m} P_{L0,i}.\left[\left(\frac{U_i}{U_{0,i}}\right)-1\right].\frac{100}{P_{L0}} \qquad (۱۰)$$

ریزشبکه جزیره‌ای در ثانیه صفر ایجاد شد. زمان ۸۰ میلی‌ثانیه برای عملکرد بریکر و فرمان رله‌ها در نظر گرفته‌شده است.

جدول (۳): جدول انتخابی مرتب شده بر اساس تابع تصادفی توان بارها با این تفاوت که بیشترین توان الکتریکی در مرتبه اول قرار دارد

مرتبه بار (NL)	سناریو سوم							
	نام بار	تمایل به پرداخت هر بار	نرخ تغییر فرکانس	جمع نرخ تغییر فرکانس	نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	جمع نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	کمبود توان (dp)	جمع کمبود توان (dp)
۱	MAST	۰.۸۹	-۴۸.۹	-۴۸.۹	-۲.۴۴۰۴	-۲.۴۴۰۴	-۱۲۵.۱۹۱۸	-۱۲۵.۱۹۱۸
۲	Load 07	۰.۹	-۲۵.۱	-۷۴	-۱.۷۹۰۸	-۴.۲۳۱۳	-۸۸.۵۹۳۵	-۲۱۳.۷۸۵۳
۳	Load 09	۰.۹۱	-۲۱.۷	-۹۵.۷	-۱.۷۰۲۷	-۵.۹۳۴۰	-۸۳.۵۰۹۹	-۲۹۷.۲۹۵۳
۴	Load 10	۰.۹۲	-۲۱.۷	-۱۱۷.۴	-۱.۷۰۲۷	-۷.۶۳۶۷	-۸۳.۵۰۹۹	-۳۸۰.۸۰۵۳
۵	STCE	۰.۹۳	-۳۲.۵	-۱۴۹.۹	-۱.۹۸۲۴	-۹.۶۱۹۱	-۹۹.۴۹۴۸	-۴۸۰.۳۰۰۱
۶	STNO	۰.۹۴	-۳۸.۷	-۱۸۸.۶	-۲.۱۴۶۹	-۱۱.۷۶۶۰	-۱۰۸.۶۳۱۵	-۵۸۸.۹۳۱۶
۷	Load 11	۰.۹۵	-۲۱.۷	-۲۱۰.۳	-۱.۷۰۲۷	-۱۳.۴۶۸۷	-۸۳.۵۰۹۹	-۶۷۲.۴۴۱۶
۸	JUEL	۰.۹۶	-۲۹.۶	-۲۳۹.۹	-۱.۹۰۱۰	-۱۵.۳۶۹۸	-۹۴.۷۴۴۴	-۷۶۷.۱۸۶۰
۹	FLOE	۰.۹۷	-۴۰.۹	-۲۸۰.۸	-۲.۲۰۸۴	-۱۷.۵۷۸۳	-۱۱۱.۹۸۸۳	-۸۷۹.۱۷۴۴
۱۰	Load 08	۰.۹۹	-۲۸.۵	-۳۰۹.۳	-۱.۸۷۳۶	-۱۹.۴۵۲۰	-۹۳.۴۵۸۶	-۹۷۲.۶۳۳۱
۱۱	STSY	۱	-۴۱.۱	-۳۵۰.۴	-۲.۲۱۵۱	-۲۱.۶۶۷۱	-۱۱۲.۲۸۳۳	-۱۰۸۴.۹۱۶۴

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

۳- نتایج شبیه سازی

شبکه نمونه معرفی‌شده برای شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی در دو حالت تحلیل می‌شود:

• حالت overshoot، که در آن حداکثر مقدار فرکانس ریز شبکه جزیره‌ای در طول پایداری فرکانس بیش از ۱ پریونیت شد. وضعیت بهینه برای این حالت زمانی رخ می‌دهد که این ضریب دارای حداقل مقدار باشد، زیرا ریزشبکه جزیره‌ای سریع‌تر تثبیت می‌شود.

• شبیه‌سازی دوم بر اساس حداکثر مقدار افت فرکانس در میکروگرید جزیره‌ای انجام می شود. بدیهی است که وقتی شبیه سازی انجام می‌شود هر چه مقدار افت فرکانس کمتر باشد بهتر است.

برای شناسایی قابلیت‌های مقاله حاضر در ایجاد پایداری در ریز شبکه های جزیره‌ای، مقایسه‌هایی با (Mahat et al., 2010) انجام‌شده است. زیرا هدف هر دو مقاله یکسان است. این مقایسه‌ها در ۶ حالت انجام‌شده است که تمامی حالت های درگیر در حالت جزیره‌ای را پوشش می‌دهد. این ۶ حالت عبارت‌اند از:

• حداقل فرکانس ریزشبکه

• حداکثر زمانی که در آن اورشوت فرکانس رخ می‌دهد.

• حداکثر زمانی که در آن فرکانس ریزشبکه جزیره‌ای کاهش می‌یابد.

• حداکثر افت فرکانس در ریزشبکه جزیره‌ای نمونه همراه با حداکثر زمانی که این فرکانس در آن رخ می‌دهد.

• حداکثر فرکانس اورشوت به همراه حداکثر زمانی که در آن حداکثر افت فرکانس رخ می‌دهد.

• حداکثر فرکانس ریز شبکه، حداکثر زمان اورشوت، حداکثر افت فرکانس و حداکثر زمان آن.

در ادامه هر یک از جداول پیشنهادی با توابع هدف تعریف شده مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته است.

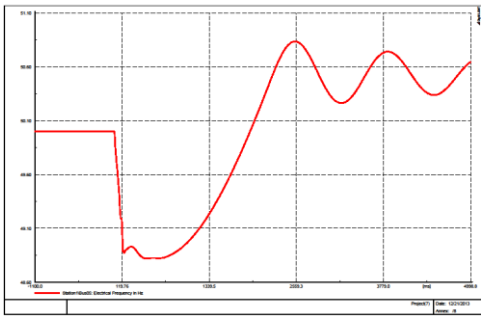
۳-۱- جدول انتخاب که بر اساس سناریوی اول مرتب‌شده است

هدف از مقایسه انجام شده در این حالت، ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی در زمان ماکزیمم اورشوت در ریز شبکه جزیره‌ای است. جدول (۴) زمان قطع بارها را با توجه به اولویت آن ها با توابع هدف اول، پنجم و هشتم نشان می‌دهد. درواقع، این جدول زمانی را نشان می‌دهد که پس از وقوع حالت جزیره‌ای، بارها باید از شبکه جدا شوند. بر این اساس، بار ۹ که کوتاه‌ترین زمان عملیاتی را دارد، کم‌اهمیت‌ترین بار در بین بارهای شبکه است و باید سریع‌تر از بار های دیگر متصل به شبکه، از برق خارج شود. از سوی دیگر، نتیجه جدول (۴) اشاره می‌کند که بار MAST بیشترین زمان کارکرد را دارد، بنابراین این بار مهم‌ترین بار است.

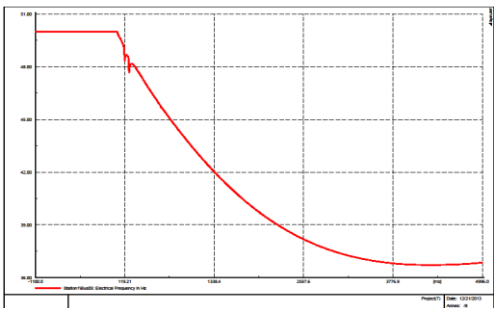
جدول (۴): زمان وقفه بارها برای توابع هدف اول، پنجم و هشتم در سناریوی اول

بریکر بار	تابع هدف اول	تابع هدف پنجم	تابع هدف هشتم
Load 09	0.0809	0.1025	0.0869
Load 10	0.095859	0.604287	0.133594
Load 11	0.096759	0.924487	0.143394
Load 07	0.100484	1.303721	0.16479
Load 08	0.116384	2.343321	0.16559
Load JUEL	0.137028	2.758584	0.200397
Load STCE	3.288928	3.193084	0.226897
Load FLOE	3.794485	3.537994	0.454497
Load STSY	4.384085	3.974594	0.535197
Load STNO	6.350155	4.484685	1.189543
Load MAST	7.233555	4.663485	2.034243

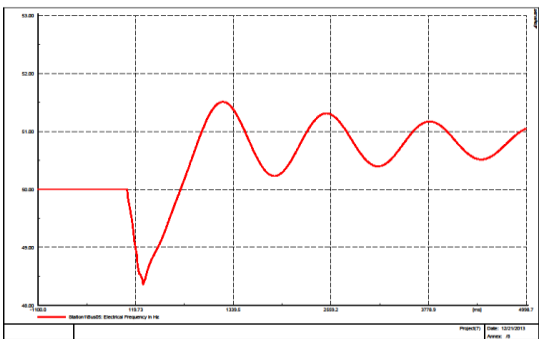
تابع هدف این حالت در بخش ۲ ارائه شده که توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بهینه‌شده و نتایج آن در جدول (۵) ارائه‌شده است. بعلاوه، شکل (۳) (الف، ب و ج) نمودار تغییرات فرکانس شبکه در ریزشبکه جزیره‌ای و کاهش بار را به ترتیب برای توابع هدف اول، پنجم و هشتم نشان می‌دهد.



الف



ب



ج

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

شکل (۳): اجرای کاهش بار در سناریوی اول
الف: با تابع هدف اول
ب: با تابع هدف پنجم
ج: با تابع هدف هشتم

جدول (۵) حالت بهینه به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی را با استفاده از توابع هدف اول، پنجم و هشتم نشان می‌دهد. همان‌طور که در ستون تابع هدف اول نشان داده‌شده است، حالت بهینه و پایداری ریزشبکه با کنار گذاشتن ۶ بار به دست می‌آید. زمان تحدب و تقعر در این حالت در جدول مشخص شده است. از حداقل و حداکثر زمان فرکانس ارائه‌شده در این جدول مشخص است که پایداری ریزشبکه با روش ارائه‌شده به‌دست‌آمده است.

جدول (۵): نتایج الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای بررسی توانایی روش پیشنهادی در زمان رخ دادن ماکزیمم اورشوت در ریزشبکه جزیره‌ای برای توابع هدف اول، پنجم و هشتم در سناریوی اول

	تابع هدف اول	تابع هدف پنجم	تابع هدف هشتم
اختلاف حداکثر فرکانس با فرکانس مبنا	0.8353	1.09	0.51
حداکثر فرکانس	50.8353	51.09	50.51
زمان تقعر	2530	4.96	1200
اختلاف حداقل فرکانس با فرکانس مبنا	1.18	12.25	1.64
حداقل فرکانس	48.8196	37.75	48.35
زمان تحدب	458	616	212
تعداد بار خروجی	6	2	7

با توجه به مقادیر نشان داده‌شده در جدول (۵)، تابع هدف مذکور در مقایسه با روش (Mahat et al., 2010) دارای سه مزیت اصلی است:

• افت فرکانس درروش پیشنهادی بسیار کمتر از روش ارائه شده در (Mahat et al., 2010) است. این مزیت منجر به قطع بارهای کمتر درروش ارائه‌شده در این مقاله می‌شود.

• حداکثر فرکانس ریزشبکه جزیره‌ای درروش پیشنهادی در مقایسه با (Mahat et al., 2010) به فرکانس استاندارد نزدیک‌تر است که پایداری فرکانس را نشان می‌دهد.

• زمان دستیابی به ثبات در این روش بسیار کوتاه‌تر از روش ارائه شده در (Mahat et al., 2010) است.

کنار گذاشتن تنها ۲ بار در ابتدا مناسب به نظر می‌رسید. اما نتایج حاصل از تابع هدف پنجم نشان داد که این تابع نمی‌تواند اهداف ما را برآورده کند. با توجه به اینکه حداکثر بار خروجی ریزشبکه کمتر از مرحله قبل بود، اما این میزان بار خروجی قادر به بازگرداندن وضعیت پایداری شبکه نبود و ادامه این روند قطعاً منجر به حذف تمامی بارهای موجود در ریزشبکه جزیره‌ای می‌شود. بنابراین صرف حذف بارهای کمتر نمی‌تواند دلیلی بر برتری این تابع هدف نسبت به توابع هدف قبلی باشد.

تابع هدف هشتم برای کاهش فرکانس ماکزیمم ریز شبکه، ماکزیمم زمان اورشوت و حداکثر افت فرکانس در نظر گرفته‌شده است. بنابراین واضح است که حداکثر و حداقل فرکانس درروش پیشنهادی در این بخش به‌طور قابل‌توجهی بهبودیافته است که می‌تواند پایداری ریزشبکه را بهبود بخشد و مزایای فنی و اقتصادی قابل‌توجهی را به همراه داشته باشد. با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده در توابع هدف بیان‌شده و با در نظر گرفتن تمامی اهداف این مقاله که حداقل افت فرکانس در زمان بهینه و همچنین کاهش افت فرکانس ریزشبکه در زمان بهینه به‌منظور داشتن حداقل بار خروجی و پایداری سریع‌تر ریز شبکه، تابع هدف هشتم می‌تواند در این مورد مناسب باشد.

۲-۳- جدول انتخاب که بر اساس سناریوی دوم مرتب‌شده است

نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک برای زمان قطع بار تابع هدف دوم، ششم و هشتم بر اساس تابع تصادفی توان بار ها در جدول (۶) ارائه‌شده است.

تابع هدف این سناریو توسط الگوریتم بهینه سازی ژنتیک بهینه شده است که نتایج آن در جدول (۷) ارائه‌شده است.

نتایج شبیه‌سازی ریزشبکه پس از ریزش بار در تابع هدف دوم در ستون دوم جدول (۷) آورده شده است که هدف آن کاهش حداکثر افت فرکانس ریزشبکه جزیره‌ای است. نتایج به‌دست‌آمده از این تابع هدف نشان می‌دهد که این تابع نمی‌تواند اهداف ما را در کاهش بار برآورده کند.

جدول (۶): زمان وقفه بارها برای توابع هدف دوم، ششم و هشتم در سناریوی دوم

بریکر بار	تابع هدف دوم	تابع هدف ششم	تابع هدف هشتم
Load STSY	0.0997	0.098	0.0935
Load 10	0.7315	0.101209	0.102941
Load STNO	0.8259	0.132609	0.119241
Load 09	1.94401	0.973655	0.559156
Load STCE	3.96241	1.137755	0.736256
Load 07	4.753467	2.850715	0.83812
Load 08	4.767467	3.343215	1.52432
Load FLOE	5.900207	4.186286	1.689759
Load 11	6.090407	5.348086	2.272759
Load JUEL	7.420477	6.002209	2.52469
Load MAST	9.340277	6.588609	3.43919

با توجه به اینکه حداکثر بار خروجی ریزشبکه کمتر از مراحل قبلی است، این مقدار بار خروجی نتوانست شبکه را به حالت پایدار بازگرداند و ادامه این روند به‌طور مطلق تمامی بارهای موجود در جزیره را قطع خواهد کرد. بنابراین خروج تنها دو بار در مرحله اول نمی‌تواند تضمینی برای موفقیت این روش باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

فرمول پیشنهادی در تابع هدف ششم با هدف کاهش حداکثر افت فرکانس در ریزشبکه جزیره‌ای نمونه همراه بازمان وقوع این فرکانس ارائه‌شده است.

فرکانس درروش پیشنهادی در مقایسه با روش مطالعه (Mahat et al., 2010) به فرکانس اصلی نزدیک‌تر است. همچنین درروش پیشنهادی زمان رسیدن به ۵۰ هرتز پس از افت فرکانس کمتر از (Mahat et al., 2010) است. بنابراین این تابع هدف برای کاهش بار مناسب است و می‌تواند زمان‌های به‌دست‌آمده از مطالعه (Mahat et al., 2010) را تا حد قابل قبولی کاهش دهد.

تابع هدف هشتم باهدف کاهش ماکزیمم فرکانس ریز شبکه، حداکثر زمان اورشوت، حداکثر افت فرکانس در نظر گرفته شده است. تعداد خروجی‌های پیشنهادی این تابع هدف سه عدد هست. زمان افت فرکانس حداکثر ریز شبکه و زمان حداکثر فرکانس شبکه درروش پیشنهادی در مقایسه با (Mahat et al., 2010) بهبودیافته است. همچنین درروش پیشنهادی زمان رسیدن به ۵۰ هرتز پس از افت فرکانس ۴۰۲ میلی‌ثانیه و درروش (Mahat et al., 2010) ۸۶۰ میلی‌ثانیه است.

جدول (۷): نتایج الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای بررسی توانایی روش پیشنهادی در زمان رخ دادن ماکزیمم اورشوت در ریزشبکه جزیره‌ای برای توابع هدف دوم، ششم و هشتم در سناریوی دوم

	تابع هدف دوم	تابع هدف ششم	تابع هدف هشتم
اختلاف حداکثر فرکانس با فرکانس مبنا	-	1.47	1.55
حداکثر فرکانس	-	51.47	51.471
زمان تقعر	-	954	941
اختلاف حداقل فرکانس با فرکانس مبنا	5.47	1.11	1.14
حداقل فرکانس	44.52	48.89	48.86
زمان تحدب	743	144	105
تعداد بار خروجی	2	3	4

حداقل افت فرکانس و کاهش اورشوت ریزشبکه، هر دو در زمان بهینه، از اهداف این مقاله به‌منظور داشتن حداقل بار خروجی و پایداری سریع‌تر ریزشبکه است. با توجه به مقایسه‌ها، توابع هدف اول و هشتم می‌توانند برای دستیابی به این اهداف مناسب باشند.

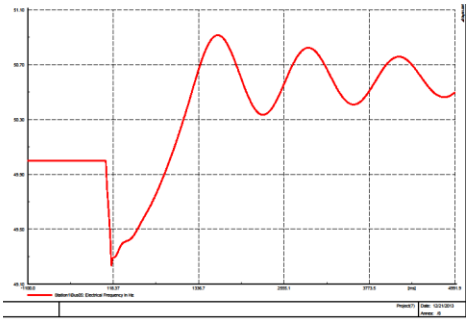
۳-۳- جدول انتخاب که بر اساس سناریوی سوم مرتب‌شده است

نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک برای زمان قطع بار توابع هدف سوم، هفتم و هشتم با توجه به اولویت‌های آن‌ها بر اساس تابع تصادفی توان بارها در جدول (۸) ارائه شده است با این تفاوت که حداکثر توان الکتریکی در وهله اول قرار دارد.

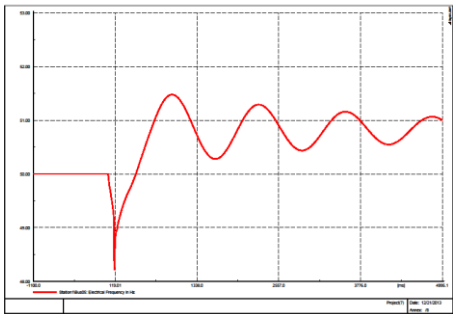
ارقام فرکانس نهایی برای توابع هدف سوم، هفتم و هشتم در شکل (۴) (الف، ب و ج) آورده شده است.

نتایج شبیه‌سازی پس از کاهش بار در جدول (۹) با استفاده از تابع هدف سوم آورده شده است. تعداد خروجی‌های پیشنهادی تابع هدف سوم ۱ است.

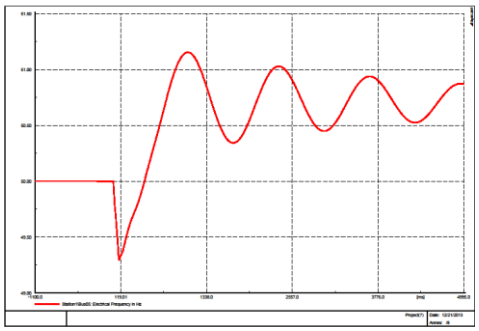
زمان قطع بارها با توجه به اولویت‌های آن در جدول (۸) در تابع هدف هفتم ارائه‌شده است تا به اهداف کاهش حداکثر زمان اورشوت و حداکثر زمان افت فرکانس برسد. شکل فرکانس نهایی و نتایج شبیه‌سازی پس از ریزش بار در ستون سوم جدول (۹) آورده شده است.



الف



ب



ج

شکل (۴): اجرای کاهش بار در سناریوی سوم

الف: با تابع هدف سوم

ب: با تابع هدف هفتم

ج: با تابع هدف هشتم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

حداکثر افت فرکانس ریزشبکه در تابع هدف هشتم ۰.۷۰۸ در ۱۰۳ میلی‌ثانیه است که درروش (Mahat et al., 2010) ۱۰.۹۰ است. حداکثر فرکانس شبکه ۵۱.۱۵۴ هرتز در ۱۰۸۳ میلی‌ثانیه است که درروش (Mahat et al., 2010) ۵۰.۹۲۶ هرتز است.

زمان رسیدن به ۵۰ هرتز پس از افت فرکانس درروش پیشنهادی ۴۶۳ میلی‌ثانیه و درروش (Mahat et al., 2010) ۹۷۰ میلی‌ثانیه است.

با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده در توابع هدف بیان‌شده و اهداف این مقاله، تابع هدف هشتم می‌تواند گزینه مناسبی برای این مورد باشد. مقایسه این سه سناریو با تابع هدف انتخابی هر کدام در شکل (۵) آورده شده است.

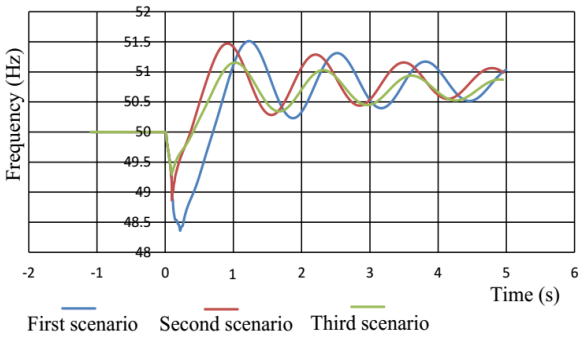
جدول (۸): زمان وقفه بارها برای توابع هدف سوم، هفتم و هشتم در سناریوی سوم

بریکر بار	تابع هدف سوم	تابع هدف هفتم	تابع هدف هشتم
Load MAST	0.0801	0.0923	0.0814
Load 07	0.88581	0.100993	0.083267
Load 09	1.00441	0.133293	1.307267
Load 10	1.408599	1.212483	2.043744
Load STCE	1.786699	1.803783	3.144644
Load STNO	1.970225	1.852836	3.295747
Load 11	2.409325	1.855336	3.314747
Load JUEL	2.82646	2.899916	3.334513
Load FLOE	3.10646	3.335916	3.588913
Load 08	3.509112	4.2736	3.716606
Load STSY	4.199612	4.6577	3.959106

با مقایسه توابع انتخاب‌شده برای هر یک از این سه سناریو، تابع هدف سوم بهترین پاسخ را برای تابع هدف پیشنهادی دارد. برای این سناریو، حداکثر ۲ بار قطع برای کاهش بار، حداکثر افت فرکانس ۰.۷۱ هرتز در بهترین زمان ۱۰۳ میلی‌ثانیه و حداکثر افزایش فرکانس ۰.۵۹ هرتز در زمان ۱۰۸۳ میلی‌ثانیه ثبت می شود. پس‌ازآن، سناریوی دوم پاسخ مناسب پیشنهادی را با حداکثر ۳ بار برای کاهش بار، حداکثر افت فرکانس ۱.۰۳۴ هرتز در ۱۰۲ میلی‌ثانیه و حداکثر افزایش فرکانس ۱.۵۵ هرتز در ۹۰۱ میلی‌ثانیه ارائه می‌دهد. درنهایت، سناریوی اول تابع هدف پیشنهادی را با حداکثر ۷ بار برای کاهش بار، حداکثر افت فرکانس ۱.۶۴ هرتز در بهترین زمان ۲۱۲ میلی‌ثانیه و حداکثر افزایش فرکانس ۱.۵۱ در ۱۲۰۰ میلی‌ثانیه ارائه می‌دهد.

جدول (۹): نتایج الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای بررسی توانایی روش پیشنهادی در زمان رخ دادن ماکزیمم اورشوت در ریزشبکه جزیره‌ای برای توابع هدف سوم، هفتم و هشتم در سناریوی سوم

	تابع هدف سوم	تابع هدف هفتم	تابع هدف هشتم
اختلاف حداکثر فرکانس با فرکانس مبنا	0.914	1.157	1.154
حداکثر فرکانس	50.914	51.157	51.154
زمان تقعر	1611	1093	1083
اختلاف حداقل فرکانس با فرکانس مبنا	0.764	0.919	0.708
حداقل فرکانس	49.236	49.08	49.29
زمان تحدب	91	113	103
تعداد بار خروجی	1	2	3



شکل (۵): مقایسه سناریوهای اول، دوم و سوم

نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده برتری روش ارائه شده در این مقاله نسبت به مطالعه مشابه انجام شده در (Mahat et al., 2010) است، زیرا همان‌طور که نشان داده شد، زمان دستیابی به ثبات در این مقاله در همه حالات بسیار بهتر از مطالعه مذکور است. این موضوع علاوه بر بهبود پایداری شبکه و ایجاد مزایای فنی فراوان در شبکه، کمک قابل‌توجهی به کاهش هزینه‌های شرکت‌های توزیع می‌کند، زیرا با روش پیشنهادی در این مقاله، تعداد و مدت قطعی‌ها کاهش می‌یابد.

برای ارزیابی بهتر، روش کاهش بار پیشنهادی در این مقاله با روش‌های ارائه‌شده در مطالعات قبلی مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول (۱۰) ارائه‌شده است.

جدول (۱۰): مقایسه روش پیشنهادی این مقاله با سایر مطالعات

شماره مرجع	عدم وابستگی به زیرساخت‌های مخابراتی	حساسیت به افت فرکانس	حساسیت به زمان افت فرکانس	حساسیت به اورشوت فرکانس	حساسیت به زمان اورشوت فرکانس	کارایی در حالت جزیره‌ای	توجه به مسائل اقتصادی
(Sun et al., 2021)	خیر	خیر	بله	خیر	خیر	خیر	خیر
(Kabir et al., 2020)	بله	خیر	بله	خیر	خیر	خیر	بله
(Santos et al., 2019)	خیر	بله	بله	خیر	خیر	بله	خیر
(Shekari et al., 2018)	خیر	بله	بله	خیر	خیر	خیر	خیر
روش پیشنهادی این مقاله	بله	بله	بله	بله	بله	بله	بله

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

۴- نتیجه‌گیری

عملکرد DGها در حالت جزیره‌ای علیرغم مزایایی که دارد، ممکن است نگرانی‌هایی را ایجاد کند که مهم‌ترین آن‌ها پایداری فرکانس است.

با توجه به نگرانی‌ها، در این مقاله راهکارهایی برای کاهش بار شبکه‌های کوچک باهدف تثبیت فرکانس این شبکه‌ها تحلیل و ارائه شد. درروش مورداستفاده در این مقاله، اهداف فنی و اقتصادی مرتبط با استراتژی کاهش بار به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شده است. روش پیشنهادی به زیرساخت‌های مخابراتی برای برقراری ارتباط بین مؤلفه و داده‌های ریزشبکه واقعی نیاز ندارد. قطع بار خودکار با توجه به افت فرکانس، زمان افت فرکانس، اورشوت و زمان آن انجام می‌شود. از دیگر مزایای روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به مطالعات قبلی، افت فرکانس پایین و دستیابی به پایداری در زمان کوتاه‌تر است. بنابراین اهمیت نتایج حاصل از اجرای این روش را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- بهره‌برداری موفقیت‌آمیز از DG ها در حالت جزیره‌ای همراه با اطمینان از ثبات فرکانس شبکه
- افزایش میزان رضایت عمومی مصرف‌کنندگان از طریق ایجاد ثبات فرکانس و متعاقب آن کاهش قطعی بارهای حساس مشترکین.

مراجع

Cosovic, M., Rubanenko, O. and Gundebommu, S. L. (2021). Analysis of the distributed power generation with focus on power plant technical conditions. 20th International Symposium Infoteh-Jahorina (INFOTEH), pp. 1-6.

Sun, M., Liu, G., Popov, M., Terzija, V. and Azizi, S. (2021). Underfrequency Load Shedding using Locally Estimated RoCoF of the Center of Inertia. IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1-1.

Azizi, S., Sun, M., Liu, G. and Terzija, V. (2020). Local Frequency-Based Estimation of the Rate of Change of Frequency of the Center of Inertia. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, pp. 4948-4951.

Kabir, M. A., Chowdhury, A. H., and Masood, N. A. (2020). A dynamic-adaptive load shedding methodology to improve frequency resilience of power systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 122, p. 106169.

Parniani, M. and Nasri, A. (2006). SCADA based under frequency load shedding integrated with rate of frequency decline. IEEE Power Engineering Society General Meeting, p. 6.

Yan, J., Guo, F. and Wen, C. (2020). Attack Detection and Isolation for Distributed Load Shedding Algorithm in Microgrid Systems. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, vol. 1, pp. 102-110.

Wang, J., Jie, F., Wang, L., Li, P., Ma, Y., Chen, Y. (2019). Strategy on Interruptible Load Selection for Precise Load Shedding System of Source-Grid-Load Friendly Interaction System. IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), pp. 1765-1769.

Hirodontis, S., Li, H. and Crossley, P. A. (2009). Load shedding in a distribution network.

Santos, A., Monaro, R., Coury, D. and Oleskovicz, M. (2019). A new real-time multi-agent system for under frequency load shedding in a smart grid context. Electric Power Systems Research, vol. 174, p. 10585.

Rudez, U., and Mihalic, R. (2011). Monitoring the First Frequency Derivative to Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, pp. 839-846.

Rudez, U. and Mihalic, R. (2011). Analysis of Underfrequency Load Shedding Using a Frequency Gradient. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, pp. 565-575.

Sapari, N., Mokhlis, H., Laghari, J., Bakar, H., Mohamad, H. and Mohd Dahalan, M. R. (2017). Load shedding scheme based on frequency and voltage stability for an islanding operation of a distribution network connected to mini-hydro generation. Turkish Journal Of Electrical Engineering & Computer Science, vol. 25, pp. 1852-1863.

Rudez, U. and Mihalic, R. (2011). A novel approach to underfrequency load shedding. Electric Power Systems Research, vol. 81, pp. 636-643.

Girgis, A. A. and Mathure, S. (2010). Application of active power sensitivity to frequency and voltage variations on load shedding. Electric Power Systems Research, vol. 80, pp. 306-310.

Ford, J. J., Bevrani, H. and Ledwich, G. (2009). Adaptive load shedding and regional protection. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 31, pp. 611-618.

Hirodontis, S. and Li, H. (2009). An adaptive load shedding method for intentional islanding. International Conference on Clean Electrical Power, pp. 300-303.

Arulampalam, A. and Saha, T. K. (2010). Fast and adaptive under Frequency Load Shedding and restoration technique using rate of change of frequency to prevent blackouts. IEEE PES General Meeting, pp. 1-8.

Zhang, L. and Zhong, J. (2006). UFLS Design by Using f and Integrating df/dt. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 1840-1844.

Kolluri, S. V., Ramamurthy, J. R., Wong, S. M., Peterson, M., Yu, P. and Chander, M. R. (2015). Relay-based undervoltage load shedding scheme for Entergy's Western Region. IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5.

Mahat, P., Chen, Z. and Bak-Jensen, B. (2010). Underfrequency Load Shedding for an Islanded Distribution System With Distributed Generators. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 911-918.

Shekari, T., Gholami, A., Aminifar, F. and Sanaye-Pasand, M. (2018). An Adaptive Wide-Area Load Shedding Scheme

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]

Incorporating Power System Real-Time Limitations. IEEE Systems Journal, vol. 12, pp. 759-767.

Dai, F. T. (2010). Impacts of distributed generation on protection and autoreclosing of distribution networks. IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010), pp. 1-5.

Singh, V. P., Kishor, N., Samuel, P. and Singh, N. (2019). Small-signal stability analysis for two-mass and three-mass shaft model of wind turbine integrated to thermal power system. Computers & Electrical Engineering, vol. 78, pp. 271-287.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.5.7]