

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

Reza Eslami¹

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.

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

نوع مطالعه: پژوهشی

رضا اسلامی^۱

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 تبدیل شده‌اند، 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 پیشنهاد شده است. از ویژگی‌های روش پیشنهادی می‌توان به انعطاف‌پذیری، سرعت و دقت بالا اشاره کرد. روش پیشنهادی توسط نرم‌افزار قدرتمند DIGSILENT شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی با قابلیت روش پیشنهادی مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: بار زدایی - پایداری فرکانس - ریز شبکه 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

۱- مقدمه

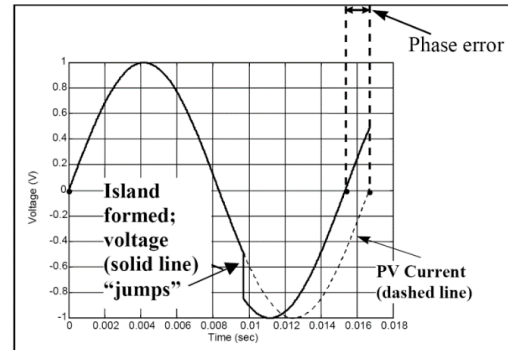
روش کنترلی در ریزشبکه های کم توان که باید در کمترین زمان ممکن پایدار شوند، نامناسب بوده و باعث ازهم‌پاشیدگی این ریز شبکه ها می‌شود. در (Kabir et al., 2020)، یک مکانیسم جدید کاهش بار تطبیقی پویا در صورت از دست دادن تصادفی تولید در شبکه ارائه شده است. در این روش باس های مختلف بر اساس شاخص ولتاژ برای شرکت در برنامه کاهش بار اولویت بندی می‌شوند. 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 قابل اجرا 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 می‌شود. در (Wang et al., 2019)، روشی در سیستم کنترل مرکزی برای انجام تخلیه سریع بار ارائه شد که در ریزشبکه های کم توان قابل اجرا نبود. در (Hirodantis 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 چندعملی سلسله مراتبی مرکزی است که مرا حل مختلف نظارت و فرآیندهای تصمیم‌گیری را هماهنگ می‌کند. این مقاله با بحث کاهش اختلالات فرکانس در شبکه با حداقل میزان خاموشی در کمترین زمان ممکن می‌شود.

در مقاله‌های 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 اسلوانی، چهار مقدار فرکانس آستانه تعریف شده است که در آن درصد بار قطع شده از کل ریز شبکه برای هر فرکانس آستانه با در نظر گرفتن نرخ اختلال تعریف شده است. مقاله مذکور بیشتر بر اصلاح ضرایب درصد بار قطع شده تمرکز داشت. این مقاله شامل نتایج مطلوب برای ریزشبکه های توان بالا است. 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 قانع کننده 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. باین حال، این روش را تنها برای شبکه‌های حاوی دو ژنراتور آبی کوچک تجزیه و تحلیل کرد. علاوه بر این، (Rudez et al., 2011) نشان داد که تقعر در فرکانس ریزش بار قابل تعیین است. اما اختلالات بزرگ منجر به کاهش فرکانس ریزشبکه شد و ولتاژ باس ها به کمبود توان‌های اکتیو و راکتیو یا به اطلاعات

درزمینه صنعت برق، تحول عظیمی در سیستم‌های تولید و انتقال انرژی در اکثر کشورهای توسعه یافته رخ داده است که دارای مزایای متعددی در موارد فنی و اقتصادی شبکه‌های تولید و انتقال است. 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 می‌شود (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، می‌تواند 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 به‌طور کلی تمامی پارامترهای اساسی شبکه باید در بازه زمانی معین (پس از وقوع شرایط اضطراری) به حالت قابل قبول خود برگردند. کاهش بار یکی از روش‌های رایج برای کنترل وضعیت‌های اضطراری شبکه است. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه کاهش بار انجام شده 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 از نظر 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 تقسیم شده و کاهش بار بر اساس نرخ اغتشاش انجام شد. در این روش زمان تأخیر هر مرحله مقدار بیشتری در نظر گرفته شد، بنابراین این

با منحنی فروپاشی فرکانس تغییر یافت (Zhang et al., 2006)، که بر اساس اطلاعات فرکانس، مقدار بار خارج شده تعیین شد (Kolluri et al., 2015). استراتژی کاهش بار تطبیقی به داده‌های زمان واقعی بارها و تولیدات نیاز داشت و همچنین تعیین اینرسی ریزشبهک د شوار بود. مسائل ذکر شده در بالا برای ریزشبهک حاوی منابع تولید در مقیاس نیروگاه‌های بزرگ بود. در (Mahat et al., 2010)، کاهش بار ریزشبهک جزیره‌ای، که توسط DG های کم توان تأمین می‌شود، مورد بحث قرار گرفت. کاهش بار سیستم توزیع جزیره‌ای به دلیل مشخصات متفاوت باید با سیستم‌های قدرت جلا متفاوت باشد. اکثر ژنراتورها 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 کنترل کننده مرکزی در سه مرحله پیشنهاد شده است. در مرحله اول الزامات روش پیشنهادی تعیین می‌شود. مقدار بهینه و مکان بهینه کاهش بار مورد نیاز در مرحله دوم تعیین می‌شود و در نهایت در مرحله سوم نوع رویداد رخ داده در فرآیند بلادرنگ تعیین می‌شود که بر اساس آن برنامه کاهش بار از پیش تعیین شده بر روی شبکه اعمال می‌شود.

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

۱-۲- معرفی تابع هدف مقاله

کاهش بار با حضور DG ها یک فرآیند بهینه‌سازی است که برای اهداف مختلفی انجام می‌شود. این اهداف در قالب پارامترهای تابع هدف وارد مسئله بار زدایی می‌شوند. از آنجایی که مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده 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 تجزیه و تحلیل هر یک از توابع هدف و نقاط ضعف و قوت آنها، تابع هدفی که می‌تواند نتایج بهتری داشته باشد انتخاب شده و جداول ارائه شده برای هر یک از این ۸ تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

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

روش جدید ارائه شده در این مقاله دارای مراحل زیر برای دستیابی به پایداری ریزشبهک 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) انجام شده است).

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. با این حال، در ریزشبهک‌های مدرن، حداقل در ریزشبهک‌های کم توان، بارها غالباً اولویت بندی می‌شوند و نمی‌توان گفت که کاهش بار باید طبق شرایط اولویت ریزشبهک انجام شود (Girgis et al., 2010). در (Ford et al., 2009)، یک کاهش بار تطبیقی جدید ارائه شده است که از کاهش زیاد فرکانس در شرایط اضطراری جلوگیری می‌کند و اضافه بار 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. در نتیجه، تلاش شد تا مقدار فرکانس آستانه با استفاده از این موارد در این مطالعه بهینه شود. سپس با میانگین‌گیری نمودار فرکانس ریزشبهک (کل مناطق در ریزشبهک)، اگر میانگین فرکانس ریزشبهک کمتر از مقدار فرکانس آستانه بود، کاهش بار انجام شود. در (Hirodonitis 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 نمونه برداری کوچک (زمان نمونه برداری اطلاعات برای هر سال) مشکلاتی از جمله 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 بر اساس سطح ولتاژ باس‌های 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 مورد بحث قرار گرفت. طبق (Arulampalam et al., 2010)، زمانی که فرکانس ریزشبهک 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 استفاده شده 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 آنالین و منحنی فرکانس بار بود. اما اطلاعات بار در زمان واقعی همیشه در دسترس نبود و اندازه‌گیری بار آنالین برای سیستم‌های توزیع کوچک گران بود. علاوه بر این، تعیین وابستگی فرکانس بار ریزشبهک اغلب دشوار است. در استراتژی کاهش بار تطبیقی، تنظیم رله

داده شده در رابطه (۵)، زمان افت فرکانس بهینه معرفی شده است. این زمان بهینه زمانی است که افت فرکانس در حداقل مقدار خود باشد.

$$\Delta f = Time_{f_{min}} \quad (5)$$

❖ تابع هدف ششم:

در نظر گرفتن هم‌زمان حداکثر فرکانس رخ داده در شبکه همراه با زمانی که در آن این فرکانس ایجاد می‌شود، در تابع هدف دیگری که توسط رابطه (۶) مشخص شده است، ارائه شده است. در این تابع هدف، برای نرمالایز کردن عوامل مختلف، عوامل در ضریب وزنی ضرب می‌شوند. این ضریب وزنی اهمیت عوامل را نشان می‌دهد.

$$\Delta f = \lambda \times Time_{f_{min}} + \lambda \times abs | 50 - f_{min} | \quad (6)$$

در رابطه (۶)، λ برابر با ۰.۱ است.

❖ تابع هدف هفتم:

به منظور تجزیه و تحلیل جداگانه زمانی که حداکثر فرکانس در شبکه رخ می‌دهد، تابع هدف دیگری با در نظر گرفتن نکات بیان شده در مرحله قبل تعریف می‌شود.

$$\Delta f = \lambda \times Time_{f_{max}} + abs | 50 - f_{max} | \quad (7)$$

❖ تابع هدف هشتم:

به منظور بررسی جامع و مقایسه سناریوهای مختلف مهم، یک روش کاهش بار جدید در این مقاله ارائه شده است که تمام اهداف کاهش بار ذکر شده در روابط (۱) تا (۷) را پوشش می‌دهد. این تابع هدف کلی در رابطه (۸) معرفی شده است. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده خواهد شد، مطمئناً این روش انعطاف‌پذیری، سرعت و دقت بالاتری دارد.

$$\Delta f = \lambda \times Time_{f_{max}} + abs | 50 - f_{max} | + \lambda \times Time_{f_{min}} + \lambda \times abs | 50 - f_{min} | \quad (8)$$

۳-۲- مدل‌سازی سیستم توزیع مورد مطالعه

یک ریزشبهک واقعی ۲۰ کیلووات متعلق به کارخانه Himmerland Elforsynig در دانمارک برای این مطالعه انتخاب شده است (Dai et al., 2010). نمودار تک‌خطی سیستم توزیع در شکل (۲) نشان داده شده است. در این ریزشبهک، ۱۱ فیدر شعاعی به نام‌های JUEL, STK1, HJOR, FLOE, REBD, MAST, STCE, SORP, STNO, STKV, STSY وجود دارد. یک نیروگاه CHP (ترکیب حرارت و برق) با ۳ ژنراتور توربین‌گازی 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, FLOE, MAST, STCE استفاده شد. کل سیستم توزیع مورد مطالعه در مدل‌های استاندارد نرم‌افزار DIGSILENT

• 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 به منظور کاهش افت فرکانس شبکه، کاهش اورشوت فرکانس ریزشبهک 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 Matlab و DIGSILENT انجام می‌شود که در آن الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک نوشته شده است. در ادامه، استراتژی کاهش بار پیشنهادی تحلیل می‌شود که متغیرهای شبکه را در قالب ۸ تابع هدف پوشش می‌دهد.

❖ تابع هدف اول:

به عنوان اولین گام، فرمول زیر برای کاهش اختلاف بین حداکثر فرکانس ایجاد شده و فرکانس پایه معرفی شده است:

$$\Delta f = abs | 50 - f_{Overshot} | \quad (1)$$

$f_{Overshot}$ در رابطه (۱) حداکثر فرکانس تولید شده 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. به منظور بررسی میزان تأثیر این پارامتر در دستیابی به اهداف فوق، رابطه (۲) به طور جداگانه تعریف و تحلیل خواهد شد.

$$\Delta f = abs | 50 - f_{Min} | \quad (2)$$

❖ تابع هدف سوم:

یکی از عوامل در نظر گرفته شده برای دستیابی به پاسخ مناسب، تحلیل حداکثر فرکانس ایجاد شده در شبکه و همچنین حداقل فرکانس ایجاد شده در ریزشبهک به طور 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 می‌شود. بنابراین، تابع هدف برای این منظور در رابطه (۳) نوشته شده است.

$$\Delta f = abs | 50 - f_{min} | + abs | 50 - f_{Overshot} | \quad (3)$$

❖ تابع هدف چهارم:

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

$$\Delta f = Time_{f_{min}} + Time_{f_{max}} \quad (4)$$

در تابع هدف (۴)، $Time_{f_{min}}$ و $Time_{f_{max}}$ زمان‌هایی 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

در جدول انتخاب، که در آن اولویت قطع بارها تعریف شده 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 ریز شبکه چ بران شود. در این راستا ۳ سناریو در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

سناریوی اول (جدول (۱)): فرض بر این است که بارهای با توان کم تر هزینه کمتری به شرکت های توزیع می دهند. 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 از نظر توان آنهاست.

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

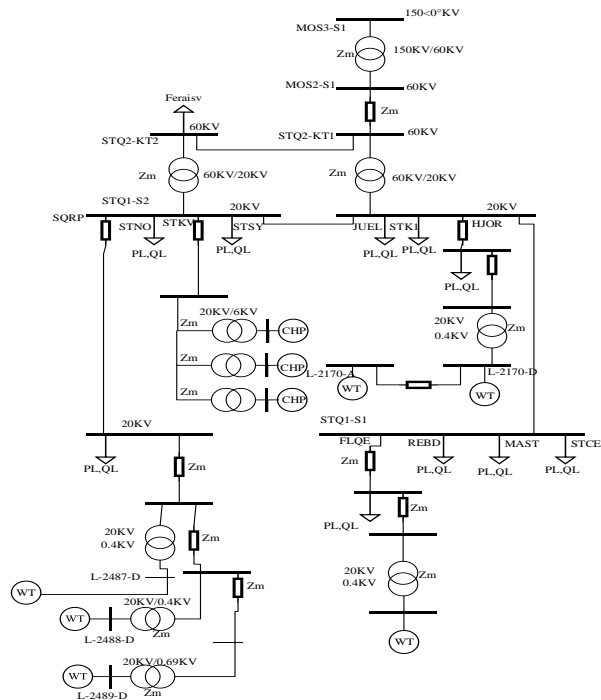
از آنجایی که تغییرات فرکانس می تواند در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی به دلیل رخداد های گذرا مختلف رخ دهد، دوره زمانی تغییرات فرکانس مهم است. بنابراین نرخ تغییرات فرکانس در طول زمان برای تشخیص حالت جزیره ای استفاده می شود. رابطه (۹) نحوه محاسب نرخ تغییر فرکانس را نشان می دهد.

$$R_o C_o F = \frac{df}{dt} = \frac{f_2 - f_1}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

در معادله (۹)، dt برای هر بار در جدول انتخاب ۱۰ میلی ثانیه قرار داده شده است. علاوه بر این، df اختلاف فرکانس در ریز شبکه جزیره ای است که برابر با نیم سیکل است (فرکانس ریز شبکه ۵۰ هرتز است).

v.14.1.3 مدل سازی شد. در این مطالعه توربین های بادی به عنوان یک سیستم دو جرمی مدل سازی شدند که برای مطالعه حالت گذرا سیستم قدرت مناسب است (Singh et al., 2019). ضریب قدرت تمامی توربین ها ۱ فرض شد.

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



شکل (۲): یک ریز شبکه محلی در دانمارک

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

سناریو اول								مرتب بار (LN)
جمع کمبود توان (dp)	کمبود توان (dp)	جمع نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	جمع نرخ تغییر فرکانس	نرخ تغییر فرکانس	تمایل به پرداخت هر بار	نام بار	
-۸۳.۵۰۹۹	-۸۳.۵۰۹۹	-۱.۷۰۲۷	-۱.۷۰۲۷	-۲۱.۷	-۲۱.۷	۰.۸۱	Load 09	۱
-۱۶۷.۰۱۹۹	-۸۳.۵۰۹۹	-۳.۴۰۵۴	-۱.۷۰۲۷	-۴۳.۴	-۲۱.۷	۰.۸۳	Load 10	۲
-۲۵۰.۵۲۹۹	-۸۳.۵۰۹۹	-۵.۱۰۸۱	-۱.۷۰۲۷	-۶۵.۱	-۲۱.۷	۰.۸۶	Load 11	۳
-۳۳۹.۱۲۳۵	-۸۸.۵۹۳۵	-۶.۸۱۹۹	-۱.۷۹۰۸	-۹۰.۲	-۲۵.۱	۰.۸۷	Load 07	۴
-۴۳۲.۵۸۲۱	-۹۳.۴۵۸۶	-۸.۷۷۲۶	-۱.۸۷۳۶	-۱۱۸.۷	-۲۸.۵	۰.۸۹	Load 08	۵
-۵۲۷.۳۲۶۶	-۹۴.۷۴۴۴	-۱۰.۶۳۳۷	-۱.۹۰۱۰	-۱۴۸.۳	-۲۹.۶	۰.۹۱	JUEL	۶
-۶۲۶.۸۲۱۴	-۹۹.۴۹۴۸	-۱۲.۶۵۶۱	-۱.۹۸۲۴	-۱۸۰.۸	-۳۲.۵	۰.۹۲	STCE	۷
-۷۳۸.۰۹۸	-۱۱۱.۹۸۸۳	-۱۴.۸۶۴۶	-۲.۲۰۸۴	-۲۲۱.۷	-۴۰.۹	۰.۹۳	FLOE	۸
-۸۵۱.۰۹۳۱	-۱۱۲.۲۸۳۳	-۱۷.۰۷۹۷	-۲.۲۱۵۱	-۲۶۲.۸	-۴۱.۱	۰.۹۵	STSY	۹
-۹۵۹.۷۲۴۶	-۱۰۸.۶۳۱۵	-۱۹.۲۲۶۶	-۲.۱۴۶۹	-۳۰۱.۵	-۳۸.۷	۰.۹۶	STNO	۱۰
-۱۰۸۴.۹۱۶۴	-۱۲۵.۱۹۱۸	-۲۱.۶۶۷۱	-۲.۴۴۰۴	-۳۵۰.۴	-۴۸.۹	۱	MAST	۱۱

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

سناریو دوم							مرتب‌به بار (NL)
جمع کمبود توان (dp)	جمع نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	جمع نرخ تغییر فرکانس	نرخ تغییر فرکانس	تمایل به پرداخت هر بار	نام بار	
-۱۱۲.۲۸۳۳	-۲.۲۱۵۱	-۲.۲۱۵۱	-۴۱.۱	-۴۱.۱	۰.۷۹	STSY	۱
-۱۹۵.۷۹۳۳	-۳.۹۱۷۸	-۱.۷۰۲۷	-۶۲.۸	-۲۱.۷	۰.۸۴	Load 10	۲
-۳۰۴.۴۲۴۸	-۶.۰۶۴۷	-۲.۱۴۶۹	-۱۰۱.۵	-۳۸.۷	۰.۸۵	STNO	۳
-۳۸۷.۹۳۴۸	-۷.۷۶۷۴	-۱.۷۰۲۷	-۱۲۳.۲	-۲۱.۷	۰.۸۶	Load 09	۴
-۴۸۷.۴۲۹۶	-۹.۷۴۹۸	-۱.۹۸۲۴	-۱۵۵.۷	-۳۲.۵	۰.۸۹	STCE	۵
-۵۷۶.۰۲۳۲	-۱۱.۵۴۰۷	-۱.۷۹۰۸	-۱۸۰.۸	-۲۵.۱	۰.۹	Load 07	۶
-۶۶۹.۴۸۱۸	-۱۳.۴۱۴۴	-۱.۸۷۳۶	-۲۰۹.۳	-۲۸.۵	۰.۹۱	Load 08	۷
-۷۸۱.۴۷۰۲	-۱۵.۶۲۳۹	-۲.۲۰۸۴	-۲۵۰.۲	-۴۰.۹	0.95	FLOE	۸
-۸۶۴.۹۸۰۲	-۱۷.۳۲۵۶	-۱.۷۰۲۷	-۲۷۱.۹	-۲۱.۷	۰.۹۸	Load 11	۹
-۹۵۹.۷۲۴۶	-۱۹.۲۲۶۶	-۱.۹۰۱۰	-۳۰۱.۵	-۲۹.۶	۰.۹۹	JUEL	۱۰
-۱۰۸۴.۹۱۶۴	-۲۱.۶۶۷۱	-۲.۴۴۰۴	-۳۵۰.۴	-۴۸.۹	۱	MAST	۱۱

$$P_{def} = \frac{2H_{col}}{f_N} \cdot 100 \cdot \frac{df_{col}}{dt} + \sum_{i=1}^m P_{L0,i} \cdot \left[\left(\frac{U_i}{U_{0,i}} \right) - 1 \right] \cdot \frac{100}{P_{L0}} \quad (10)$$

ریزشبه جزیره‌ای در ثانیه صفر ایجاد شد. ز مان ۸۰ میلی‌ثانیه برای عملکرد بریکر و فرمان رله‌ها در نظر گرفته شده است.

در جداول از نرخ تغییر فرکانس، نرخ تغییر فرکانس وابسته به ولتاژ و کمبود برق ریزشبه استفاده شده است. اما در قطع تعدادی از بارها در مرحله 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 ریزشبه دارد) در (Sapari et al., 2017) موجود است که در رابطه (۱۰) نمایش داده شده است.

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

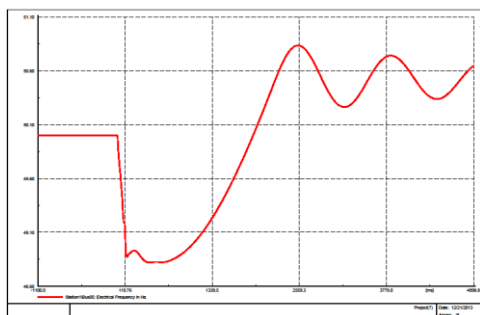
سناریو سوم							مرتب‌به بار (NL)
جمع کمبود توان (dp)	جمع نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	نرخ تغییر فرکانس برحسب ولتاژ	جمع نرخ تغییر فرکانس	نرخ تغییر فرکانس	تمایل به پرداخت هر بار	نام بار	
-۱۲۵.۱۹۱۸	-۲.۴۴۰۴	-۲.۴۴۰۴	-۴۸.۹	-۴۸.۹	۰.۸۹	MAST	۱
-۲۱۳.۷۸۵۳	-۴.۲۳۱۳	-۱.۷۹۰۸	-۷۴	-۲۵.۱	۰.۹	Load 07	۲
-۲۹۷.۲۹۵۳	-۵.۹۳۴۰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

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

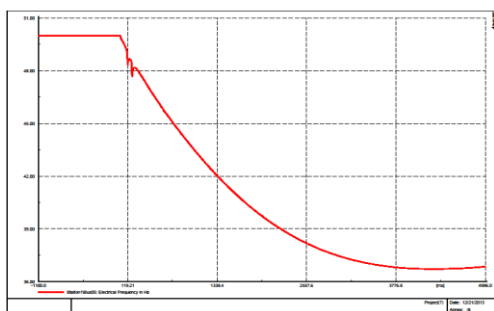
سناریوی اول

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

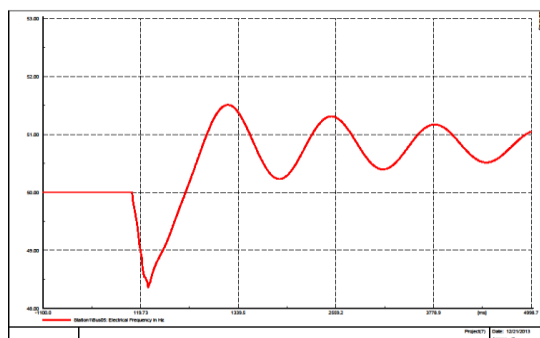
تابع هدف این حالت در بخش ۲ ارائه شده که توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بهینه‌شده و نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. بعلاوه، شکل (۳) (الف، ب و ج) نمودار تغییرات فرکانس شبکه در ریزشکته جزیره‌ای و کاهش بار را به ترتیب برای توابع هدف اول، پنجم و هشتم نشان می‌دهد.



الف



ب



ج

۳- نتایج شبیه سازی

شبکه نمونه معرفی شده 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. و وضعیت بهینه برای این حالت زمانی رخ می‌دهد که این ضریب دارای حداقل مقدار باشد، زیرا ریزشکته جزیره‌ای سریع‌تر تثبیت می‌شود.
- شبیه‌سازی دوم بر اساس حداکثر مقدار افت فرکانس در میکروگرید جزیره‌ای انجام می‌شود. بدیهی است که وقتی شبیه‌سازی 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) انجام شده است. زیرا هدف هر دو مقاله یکسان است. این مقایسه‌ها در ۶ حالت انجام شده است که تمامی حالت‌های درگیر در حالت جزیره‌ای را پوشش می‌دهد. این ۶ حالت عبارت‌اند از:
- حداقل فرکانس ریزشکته
- حداکثر زمانی که در آن اورشوت فرکانس رخ می‌دهد.
- حداکثر زمانی که در آن فرکانس ریزشکته جزیره‌ای کاهش می‌یابد.
- حداکثر افت فرکانس در ریزشکته 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 تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۳-۱- جدول انتخاب که بر اساس سناریوی اول

مرتب شده 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 آن‌ها با توابع هدف اول، پنجم و هشتم نشان می‌دهد. در واقع، 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 بارهای 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.

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 به دست آمده از روش پیشنهادی را با استفاده از توابع هدف اول، پنجم و هشتم نشان می‌دهد. همان‌طور که در ستون تابع هدف اول نشان داده شده است، حالت بهینه و پایداری ریزش شبکه با کنار گذاشتن ۶ بار به دست می‌آید. زمان تحذب و تقعر در این حالت در جدول مشخص شده است. از حداقل و حداکثر زمان فرکانس ارائه شده در این جدول مشخص است که پایداری ریزش شبکه با روش ارائه شده به دست آمده است.

جدول (۵): نتایج الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای بررسی توانایی

روش پیشنهادی در زمان رخ دادن ماکزیمم اورشوت در ریزش شبکه

جزیره‌ای برای توابع هدف اول، پنجم و هشتم در سناریوی اول

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

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

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

- حداکثر فرکانس ریزش شبکه جزیره‌ای در روش 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 ریزش شبکه 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 ریزش شبکه 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 ریزش شبکه، ماکزیمم زمان اورشوت و حداکثر افت فرکانس در نظر گرفته شده است. بنابراین واضح است که حداکثر و حداقل فرکانس در روش پیشنهادی در این بخش به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است که می‌تواند پایداری ریزش شبکه را بهبود بخشد و مزایای فنی و اقتصادی قابل توجهی را به همراه داشته باشد. با توجه به مقایسه‌های انجام شده در توابع هدف بیان شده و با در نظر گرفتن تمامی اهداف این مقاله که حداقل افت فرکانس در زمان بهینه و همچنین کاهش افت فرکانس ریزش شبکه در زمان بهینه به‌منظور داشتن حداقل بار خروجی و پایداری سریع‌تر ریزش شبکه، تابع هدف هشتم می‌تواند در این مورد مناسب باشد.

۲-۳- جدول انتخاب که بر اساس سناریوی دوم

مرتب شده است

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

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

نتایج شبیه‌سازی ریزش شبکه پس از ریزش بار در تابع هدف دوم در ستون دوم جدول (۷) آورده شده است که هدف آن کاهش حداکثر افت فرکانس ریزش شبکه جزیره‌ای است. نتایج به دست آمده 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

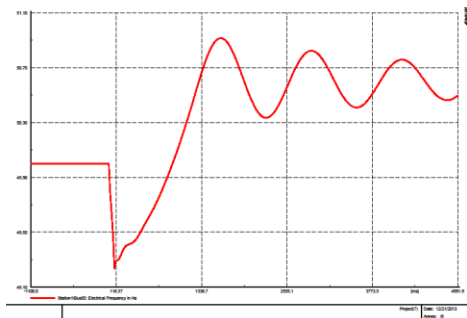
بریکر بار	تابع هدف دوم	تابع هدف ششم	تابع هدف هشتم
Load STSY	0.0997	0.098	0.0935
Load 10	0.7315	0.101209	0.102941
Load STNO	0.8259	0.132609	0.119241
Load 09	1.94401	0.973655	0.559156
Load STCE	3.96241	1.137755	0.736256
Load 07	4.753467	2.850715	0.83812
Load 08	4.767467	3.343215	1.52432
Load FLOE	5.900207	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 ریزش شبکه کمتر از مرحله قبل 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.

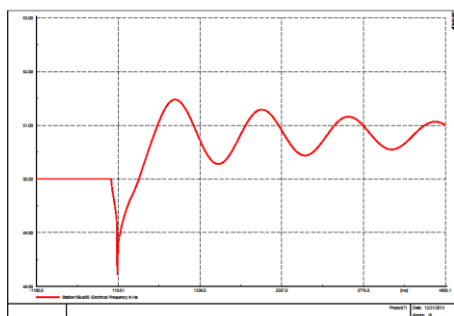
ارقام فرکانس نهایی برای توابع هدف سوم، هفتم و هشتم در شکل (۴) (الف، ب و ج) آورده شده است.

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.

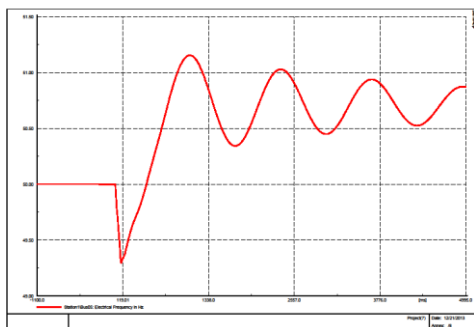
زمان قطع بارها با توجه به اولویت‌های آن در جدول (۸) در تابع هدف هفتم ارائه شده است تا به اهداف کاهش حداکثر زمان اورشوت و حداکثر زمان افت فرکانس برسد. شکل فرکانس نهایی و نتایج شبیه‌سازی پس از ریزش بار در ستون سوم جدول (۹) آورده شده است.



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

فرمول پیشنهادی در تابع هدف ششم با هدف کاهش حداکثر افت فرکانس در ریزش شبکه جزیره‌ای نمونه همراه با زمان وقوع این فرکانس ارائه شده است.

فرکانس در روش پیشنهادی در مقایسه با روش مطالعه (Mahat et al., 2010) به فرکانس اصلی نزدیک‌تر است. همچنین در روش 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 به دست آمده از مطالعه (Mahat et al., 2010) را تا حد قابل قبولی کاهش دهد.

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

جزیره‌ای برای توابع هدف دوم، ششم و هشتم در سناریوی دوم

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

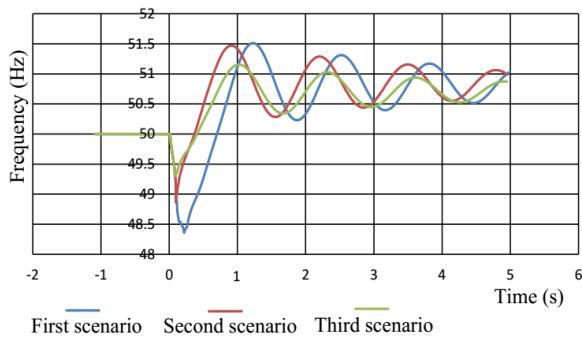
حداقل افت فرکانس و کاهش اورشوت ریزش شبکه، هر دو در زمان بهینه، از اهداف این مقاله به منظور داشتن حداقل بار خروجی و پایداری سریع‌تر ریزش شبکه است. با توجه به مقایسه‌ها، توابع هدف اول و هشتم می‌توانند برای دستیابی به این اهداف مناسب باشند.

۳-۳- جدول انتخاب که بر اساس سناریوی سوم مرتب شده 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.

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

تابع هدف سوم	تابع هدف هفتم	تابع هدف هشتم
0.914	1.157	1.154
50.914	51.157	51.154
1611	1093	1083
0.764	0.919	0.708
49.236	49.08	49.29
91	113	103
1	2	3



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

نتایج به دست آمده 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 قابل توجهی 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 ارائه شده در مطالعات قبلی مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول (۱۰) ارائه شده است.

حداکثر افت فرکانس ریزشبهه در تابع هدف هشتم ۰.۷۰۸ در ۱۰۳ میلی‌ثانیه است که در روش (Mahat et al., 2010) ۱۰.۹۰ است. حداکثر فرکانس شبکه ۵۱.۱۵۴ هرتز در ۱۰۸۳ میلی‌ثانیه است که در روش (Mahat et al., 2010) ۵۰.۹۲۶ هرتز است. زمان رسیدن به ۵۰ هرتز پس از افت فرکانس در روش پیشنهادی ۴۴۳ میلی‌ثانیه و در روش (Mahat et al., 2010) ۹۷۰ میلی‌ثانیه است. با توجه به مقایسه‌های انجام شده در توابع هدف بیان شده 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 انتخاب شده 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 می‌شود. پس از آن، 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. در نهایت، 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 (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

۴- نتیجه گیری

عملکرد DGها در حالت جزیره‌ای علاوه بر 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. در روش مورد استفاده 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 DGها 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

- 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.
- Hirodantis, 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.
- Hirodantis, 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
- 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.

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.