

Optimal Restoration of a Multi-Area Active Distribution Network after Natural Disaster Using Peer-to-Peer Power Exchanges

Hekmat Beyranvandi¹, Amin Samanfar², Reza Saki³, Meysam Doostizadeh⁴

¹ ph.D. Student, Department of Electrical Engineering, Khor.c, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran
hekmat.beyranvandi@iau.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Khor.c, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran
a.samanfar@iau.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Doro.c, Islamic Azad University, Doroud, Iran
re.saki@iau.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran
doostizadeh.m@lu.ac.ir

Abstract:

After the occurrence of natural disasters, the connection of the independent areas in the active distribution network with the upstream power grid may be disconnected. In such a situation, these areas can reduce their operating costs by exchanging energy. In this regard, a new two-level framework for optimal restoration of a multi-area active distribution network by using peer-to-peer power exchange is proposed in this paper. In the first level of the proposed method, the status of tie-lines is determined based on the genetic algorithm. Then, peer-to-peer exchanges are settled based on the proposed structure. Finally, load shedding restrictions and other operating restrictions are examined in the second level. Since the areas are independent, they do not have access to each other's private information, such as load information, status of distributed generations, and operating costs. Therefore, in order to protect the privacy of the areas, the network structure has been determined with the aim of maximizing the peer-to-peer exchanges and also considering technical limitations. This method is applied to the modified IEEE 33-bus active distribution network with 5 areas, and the simulation results show its efficiency.

Keywords: Active distribution network, Energy trading, Peer-to-peer energy bartering, Restoration.

Article Type: Research

Received: 16. 10. 2023

Revised: 07. 05. 2024

Accepted: 11. 08. 2024

Corresponding author: A. Samanfar

Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Khor.c, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran



1. Motivation of the work

Due to climate change, the frequency and severity of natural disasters have increased at an unprecedented rate. Due to the extent of distribution networks, these networks are highly vulnerable to natural disasters such as floods and storms [1]. Natural disasters cause severe damage to distribution systems and power transmission networks.

Despite investment-based and planning-based preventive measures, natural disasters usually severely damage the power grid and lead to widespread power outages. Therefore, after natural disasters occur, the network should be restored and repaired based on an optimal plan in order to reduce their adverse effects on network performance. Determining a plan for optimal restoration and recovery of the distribution network after natural disasters can reduce the time and number of outages for subscribers [2].

2. Contributions

In this paper, a two-stage method is proposed to address the challenges of recovering a multi-area distribution network after natural disasters. In the first level, the network structure is proposed by a metaheuristic algorithm. Then, the peer-to-peer power exchanges between the areas are settled at this structure. In the second stage, the operation constraints are examined. This method has an iterative structure, and the network structure is updated by the metaheuristic algorithm according to the peer-to-peer power exchanges calculated in the first level and the operation constraint compliance evaluated in the second level. Therefore, using the proposed two-level method, the layout that maximizes the peer-to-peer exchanges between different areas while complying with the operation constraints is selected as the optimal response.

By conducting peer-to-peer power exchanges, independent areas can effectively use their local energy resources and, in addition to earning income, increase the rate of network load recovery.

The most important innovations of this paper are as follows:

- Presenting a two-level framework for organizing peer-to-peer exchanges to restore a multi-area active distribution network after natural disasters.
- Developing multi-area load flow equations from the perspective of the multi-area distribution network operator, taking into account the privacy of different areas.
- Determining the optimal layout of a multi-area active distribution network to create a suitable environment for peer-to-peer power exchanges in the network.

3. Procedures

The proposed model is a decentralized multi-agent model that, while maintaining the operational independence of different areas, determines the optimal arrangement of the active distribution network to maximize the peer-to-

peer power exchanges. In the first stage of this method, the distribution network structure is determined by a meta-heuristic method. After that, different areas try to increase their profits in this structure by using peer-to-peer power exchanges. In the second stage, the operational constraints are examined. Since the areas are independent, to maintain their privacy, they do not share their internal network information, and only the information on the tie lines and information related to the power exchanges between the neighboring areas are shared [3]. Therefore, in the second stage of the proposed method, only the load flow constraints related to the buses and distribution lines located between two neighboring areas are considered. It should be noted that the internal load flow constraints of each area are considered privately by that area itself when participating in peer-to-peer power exchanges.

The proposed two-level method is simulated on a modified IEEE 33-bus active distribution network with five areas in the MATLAB R2023b environment. The local programming model of each area is formulated using the YALMIP toolbox, and CPLEX 12.9 is used to solve it. The restoration scheduling of this multi-area active distribution network after a severe natural disaster is simulated in two cases, with and without peer-to-peer power exchanges between different areas.

4. Findings

Determining the distribution network structure based on peer-to-peer exchanges can improve the recovery of loads after natural disasters. Simulation results on the modified IEEE 33-bus test network showed that peer-to-peer power exchanges can significantly increase the profit of different areas compared to the island mode, from -\$892.58 to \$311.05. These results prove that the proposed two-level method increases the amount of peer-to-peer energy exchanges between areas while maintaining their privacy. Based on the results, the cost of load shedding in the test network has decreased from \$1292.1 to \$344.16, which shows the ability of the proposed method to utilize the potential capacity of local DERs in the restoration of the multi-area active distribution network. Also, comparing the simulation results with the centralized restoration method confirms the optimality of the proposed method.

5. Conclusion

In this paper, a two-stage method for organizing peer-to-peer power exchanges between different areas of a multi-area active distribution network for optimal network recovery after natural disasters is presented. Simulation results on the modified IEEE 33-bus test network showed that the proposed restoration method can reduce the total load shedding by maximizing inter-area power exchanges while considering operational constraints. Simulation results showed that the proposed two-level method, by determining the optimal network structure, leads to the optimal use of local DERs and, as a result, increases the total exchange power in the network. Based on the

results, using the proposed method, the operating costs can be reduced by more than \$1203.6 compared to the case where the areas operate in island mode and there is no exchange between them.



بازیابی بهینه‌ی شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای بعد از وقوع بلایای طبیعی با بهره‌گیری از تبادلات رخ به رخ توان

حکمت بیرانوندی^۱، امین سامان فر^۲، میثم دوستی زاده^۳، رضا ساکی^۴

۱- دانشجوی دکتری- گروه برق دانشکده فنی و مهندسی- واحد خرم‌آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- خرم‌آباد- ایران

h.beyranvand@khoiau.ac.ir

۲- استادیار- گروه برق دانشکده فنی و مهندسی- واحد خرم‌آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- خرم‌آباد- ایران

a.samanfar@khoiau.ac.ir

۳- دانشیار- گروه برق دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه لرستان- خرم‌آباد- ایران

doostizadeh.m@lu.ac.ir

۴- استادیار- گروه برق دانشکده فنی و مهندسی- واحد درود- دانشگاه آزاد اسلامی- درود- ایران

re.saki@iau.ac.ir

چکیده: بعد از وقوع بلایای طبیعی ممکن است اتصال نواحی مستقل موجود در شبکه‌ی توزیع فعال با شبکه‌ی برق بالادست قطع شود. در چنین شرایطی، این نواحی می‌توانند با تبادل انرژی هزینه‌های بهره‌برداری خود را کاهش دهند. در این راستا، یک چارچوب نوین دو مرحله‌ای برای بازیابی بهینه‌ی شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای با بکارگیری مبادلات رخ به رخ توان در این مقاله پیشنهاد شده است. در مرحله اول روش پیشنهادی، وضعیت در مدار بودن خطوط مانور بر اساس الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شود. سپس، مبادلات رخ به رخ بر اساس ساختار پیشنهاد شده تسویه می‌شوند. در نهایت، محدودیت‌های پخش بار و سایر قیود بهره‌برداری در مرحله دوم بررسی می‌شوند. از آنجایی که نواحی مستقل هستند به اطلاعات خصوصی یکدیگر، مانند اطلاعات بار، وضعیت منابع تولیدات پراکنده و هزینه‌های بهره‌برداری دسترسی ندارند. بنابراین، جهت حفظ حریم خصوصی نواحی، ساختار شبکه با هدف بیشینه‌سازی حجم مبادلات رخ به رخ و همچنین تحقق محدودیت‌های فنی تعیین شده است. این روش بر روی شبکه‌ی توزیع فعال ۵ ناحیه‌ای ۳۳ شینه IEEE شبیه‌سازی شده که نتایج به دست آمده کارایی آن را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: شبکه‌ی توزیع فعال، بازیابی شبکه، مبادلات رخ به رخ توان، بلایای طبیعی.

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امین سامان فر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - خرم‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد خرم‌آباد - گروه برق دانشکده‌ی فنی و مهندسی

۱- مقدمه

در پی تغییرات آب و هوایی، فراوانی و شدت بلایای طبیعی افزایش بی‌سابقه‌ای یافته است. طوفان‌های هاروی (Harvey)، ایرما (Irma) و ماریا (Maria) [۱] و همچنین سیل پلدختر در استان لرستان نمونه‌ای از این بلایای طبیعی هستند. به دلیل گستردگی شبکه‌های توزیع، این شبکه‌ها در برابر بلایای طبیعی مانند سیل و طوفان بسیار آسیب پذیر هستند [۲]. بلایای طبیعی خسارات سنگینی به سیستم‌های توزیع و شبکه انتقال برق وارد می‌کنند. در شکل (۱) بخشی از اثرات مخرب سیل در شبکه توزیع برق در شهرستان پلدختر نشان داده شده است.



شکل (۱): بخشی از خسارات وارده به شبکه توزیع برق پلدختر در اثر سیل

در طول سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲، به دلیل رویدادهای آب و هوایی تقریباً ۶۷۹ قطعی برق در ایالات متحده رخ داده که ۸۰ تا ۹۰ درصد این قطعی‌ها ناشی از خرابی سیستم‌های توزیع بوده است [۱].

مفهوم تاب آوری شبکه‌ی توزیع و نقش هر کدام از عوامل مؤثر بر آن در [۳] بررسی شده است. به منظور افزایش تاب آوری شبکه‌ی توزیع در برابر بلایای طبیعی، در حالت کلی دو دسته از اقدامات سرمایه‌گذاری محور و برنامه‌ریزی محور پیشنهاد شده است [۴]. در اقدامات سرمایه‌گذاری محور، با نصب تجهیزات جدید مانند منابع انرژی توزیع شده [۵] و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی [۶] و یا تقویت خطوط و پست‌های توزیع [۷]، تاب آوری شبکه قبل از وقوع بلایای طبیعی افزایش داده می‌شود. در اقدامات برنامه‌ریزی محور، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه توزیع به گونه‌ای اصلاح می‌شود که اثرات مخرب بلایای طبیعی بر عملکرد شبکه حداقل گردد. اقدامات برنامه‌ریزی محور به دو دسته پیشگیرانه و ترمیمی تقسیم می‌شوند. در اقدامات پیشگیرانه، سعی می‌شود شبکه به گونه‌ای بهره‌برداری شود که کمترین آسیب پذیری را در برابر حوادث پیش رو، مانند طوفان یا سیل پیش‌بینی شده داشته باشد. به عنوان نمونه، در [۸] یک چارچوب مدیریت پیشگیرانه برای مقابله با اثرات نامطلوب طوفان‌های شدید در ریزش‌بکه ارائه شده است. در این چارچوب، پس از دریافت هشدار وقوع طوفان، برنامه‌ریزی بهره‌برداری به گونه‌ای محافظه کارانه اصلاح می‌شود تا حداقل تعداد شاخه‌های آسیب‌پذیر وارد شبکه شوند و در عین حال، کل بار شبکه نیز تأمین گردد. در [۹] یک چارچوب پیشگیرانه دو سطحی جهت افزایش تاب آوری شبکه‌های برق پیشنهاد شده که در سطح بالاتر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شبکه توزیع در شرایط عادی

و اضطراری و در سطح پایین تر افزایش رفاه اجتماعی سیستم انتقال به عنوان توابع هدف مدلسازی شده‌اند.

علی رغم اقدامات پیشگیرانه سرمایه‌گذاری محور و برنامه‌ریزی محور، بلایای طبیعی معمولاً به شدت به شبکه برق آسیب می‌رسانند و منجر به قطعی گسترده برق می‌شوند. لذا، بعد از وقوع بلایای طبیعی با هدف کاهش اثرات نامطلوب آن‌ها بر عملکرد شبکه باید بازیابی و ترمیم شبکه بر اساس یک برنامه‌ریزی بهینه انجام شود. تعیین برنامه‌ریزی برای ترمیم و بازیابی بهینه شبکه‌ی توزیع بعد از وقوع بلایای طبیعی می‌تواند زمان و تعداد خاموشی‌های مشترکین را کاهش دهد [۴]. در [۱۰] یک رویکرد بازسازی برای بیشینه کردن بار بازیابی شده با ایجاد هماهنگی میان پرسنل تعمیرات، منابع برق سیار، منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره انرژی و آرایش شبکه‌ی توزیع ارائه شده است. اثر شبکه حمل و نقل جاده‌ای بر بازیابی شبکه‌ی توزیع پس از بلایای طبیعی در حضور منابع سیار انرژی در [۱۱] بررسی شده است.

به منظور بازیابی بارهای حیاتی بعد از بروز بلایای طبیعی یک روش بازیابی مبتنی بر تعیین کوتاه‌ترین مسیر میان بارهای بحرانی و منابع تولید پراکنده در [۱۲] ارائه شده است. افزایش تاب آوری شبکه توزیع با استفاده از ظرفیت خودروهای برقی در ایستگاه‌های شارژ در [۱۳] بررسی شده است. در [۱۴] به منظور بازیابی سریع بارهای بحرانی، از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی سیار و ثابت به صورت همزمان با منابع تولید پراکنده استفاده شده است. با این حال، مالکیت نواحی مختلف شبکه در هنگام بازیابی در نظر گرفته نشده است.

برای افزایش قابلیت خودترمیمی شبکه توزیع هوشمند پس از وقوع خطا یک روش بازیابی بر اساس تئوری گراف و برش‌های اساسی در [۱۵] ارائه شده که به تعداد کلیدزنی کمتری نسبت به روش‌های جستجوی تصادفی نیاز دارد. در این روش، محدودیت‌های فنی مانند کاهش نامتعادلی ولتاژ و افزایش بارپذیری شبکه مدلسازی شده‌اند. با این حال، این روش نمی‌تواند هزینه تراکنش‌های انرژی میان نهادهای مستقل مختلف، مانند شبکه توزیع و ریزش‌بکه‌ها را در هنگام بازیابی مدلسازی کند.

در [۱۶]، یک روش چند عامله برای بازیابی غیرمتمرکز شبکه توزیع سنتی با توجه به اولویت فیدرهای مختلف شبکه ارائه شده است. در این روش، فرض شده که تمامی منابع تولیدات پراکنده در تملک شرکت توزیع هستند و مالکیت مجزا ندارند.

در [۱۷]، یک روش بازیابی غیرمتمرکز مبتنی بر سیستم‌های چند عامله برای شبکه‌های توزیع فعال متصل به چند ریزش‌بکه ارائه شده است. در این روش، ریزش‌بکه‌ها به صورت شبکه‌های الکتریکی مدرن در حضور ذخیره‌سازهای الکتریکی، منابع تولید پراکنده بادی و خورشیدی، و خودروهای برقی مدلسازی شده‌اند و مسئله تعادل بار و برخی از قیود بهره‌برداری آن‌ها در نظر گرفته شده است. با این حال، در این روش،

هزینه‌های بازیابی شبکه و هزینه تبادلات انرژی میان ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع در نظر گرفته نشده است.

در [۱۸]، یک روش دو لایه برای بازیابی بار در شبکه توزیع پس از وقوع یک خطای دائمی ارائه شده است. در لایه اول این روش، ساختار شبکه توزیع بر اساس یک الگوریتم اکتشافی تعیین می‌شود. سپس، بر اساس ساختار به دست آمده، برنامه‌ریزی منابع تولیدات پراکنده و میزان حذف بار در لایه دوم تعیین می‌شود. با این حال، در این روش از مبادلات رخ به رخ توان میان نواحی مختلف موجود در شبکه صرف‌نظر شده است. همچنین، مدل بهینه‌سازی لایه دوم آن یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط نامحذب است که یافتن پاسخ بهینه آن دشوار است.

جهت افزایش سرعت بازیابی بارهای شبکه بعد از بروز خطاهای چندگانه، یک طرح بازیابی بهینه برای تعیین برنامه‌ریزی هماهنگ تیم‌های تعمیر و عملیات، ناوگان منابع تولیدی سیار و سیستم اتوماسیون شبکه توزیع برای کنترل کلیدهای کنترل از راه دور در [۱۹] ارائه شده است. این مدل به صورت یک مسئله خطی-عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی شده که دارای کارایی محاسباتی مناسبی هست. با این حال، جنبه‌های اقتصادی مسئله بازیابی، مانند هزینه‌ی تولید و تبادلات انرژی میان نواحی مختلف، هزینه ارسال ناوگان منابع تولیدی سیار و غیره در نظر گرفته نشده است.

در [۲۰]، یک روش بازیابی بر اساس مفهوم زمان مصونیت برای بازیابی بارهای شبکه ارائه شده است. در این مقاله، اثر کلیدهای سکسیونر و سکشنالایزر در کنار منابع تجدیدپذیر بر میزان بار بازیابی شده بررسی شده است. با این حال، بهینگی این روش تضمین نمی‌شود. در [۲۱]، یک روش بازیابی شبکه توزیع مبتنی بر تشکیل ریزشبکه پویا با استفاده از یادگیری تقویتی عمیق و با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی و ساختاری ریزشبکه‌ها، پیشنهاد شده است. یک رویکرد بازیابی تاب‌آورانه برای شبکه‌های توزیع چند انرژی بر اساس تغییر آرایش شبکه‌های انرژی و بازبرنامه‌ریزی آن‌ها در [۲۲] پیشنهاد شده است. در [۲۳] یک تکنیک بازیابی با استفاده از تولید پراکنده برای بهبود انعطاف‌پذیری سیستم توزیع جهت تغذیه بارهای مهم پیشنهاد شده که در آن قیود مربوط به راه‌اندازی منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است. یک مدل ترکیبی سلسله‌مراتبی از یادگیری تقویتی عمیق و برنامه‌ریزی درجه دوم برای بازیابی سیستم توزیع پس از قطعی‌های عمده در [۲۴] پیشنهاد شده است. در این مدل، توزیع بهینه توان میان منابع انرژی موجود، بر اساس هوش مصنوعی و بررسی محدودیت‌های شبکه توسط یک مدل برنامه‌ریزی درجه دوم انجام می‌شود.

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که مقالات محدودی مالکیت مجزای نواحی مختلف موجود در شبکه توزیع را در هنگام بازیابی شبکه بعد از وقوع بلایای طبیعی در نظر گرفته‌اند. در یک شبکه توزیع چند ناحیه‌ای، نواحی مختلف دارای بهره‌برداران مختلف هستند [۲۵]. هر

کدام از این نواحی ممکن است یک ریزشبکه و یا بخشی از شبکه‌ی توزیع باشند که برنامه‌ریزی آن‌ها با هدف بیشینه شدن سود و یا کاهش هزینه‌های بهره‌برداری آن ناحیه به صورت مستقل انجام می‌شود. در چنین شبکه‌ای، با یک سیستم چند نهادی یا چند عاملی مواجه هستیم که هر ناحیه از شبکه یک عامل مستقل می‌باشد. از آنجایی که نواحی مختلف از طریق خطوط توزیع به یکدیگر متصل هستند، می‌توانند با یکدیگر تبادلات توان الکتریکی داشته باشند. با این حال، هر کدام از عوامل به دنبال بیشینه نمودن سود خویش است و زمانی در یک تبادل انرژی شرکت می‌کند که آن تراکنش را در راستای تحقق اهداف فردی خویش ببیند. بنابراین، یک تراکنش انرژی میان دو عامل مستقل زمانی انجام می‌گیرد که هر دو عامل با آن موافقت نمایند. برنامه‌ریزی تراکنش‌های انرژی در یک محیط چند عاملی با چالش‌های مختلفی در زمینه‌ی در نظر گرفتن رضایت عوامل مختلف، حفظ حریم خصوصی، دستیابی به توافق بهینه و غیره مواجه است. تا کنون چارچوب‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع چند عاملی در حالت عملکردی عادی ارائه شده است. به عنوان نمونه، در [۲۶]، یک رویکرد غیرمتمرکز همکارانه برای تعیین برنامه‌ریزی عملکردی شبکه‌های چند ناحیه‌ای با هدف کاهش مجموع هزینه‌های عملکردی شبکه ارائه شده است. در این روش، حریم خصوصی نواحی مختلف حفظ شده ولی انگیزه‌های فردی آن‌ها برای شرکت در مبادلات توان در نظر گرفته نشده است.

در این مقاله، برای پاسخ به چالش‌های موجود در زمینه بازیابی یک شبکه توزیع چند ناحیه‌ای بعد از وقوع بلایای طبیعی یک روش دو مرحله‌ای ارائه شده است. در مرحله اول، آرایش شبکه توسط یک الگوریتم فراابتکاری پیشنهاد می‌شود. سپس مبادلات رخ به رخ انرژی درون شبکه‌ای بر اساس این آرایش تسویه می‌شوند. در مرحله دوم، قیود بهره‌برداری بررسی می‌شوند. این روش، یک ساختار تکرار شونده دارد و آرایش شبکه، با توجه به میزان تبادلات رخ به رخ محاسبه شده در مرحله اول و میزان رعایت قیود بهره‌برداری ارزیابی شده در مرحله دوم، توسط الگوریتم فراابتکاری به روزرسانی می‌شود. بنابراین، با استفاده از روش دو مرحله‌ای پیشنهادی، آرایشی که میزان تبادلات رخ به رخ میان نواحی مختلف را همزمان با رعایت قیود بهره‌برداری بیشینه نماید، به عنوان پاسخ بهینه انتخاب می‌شود.

در جدول (۱)، ویژگی‌های روش بازیابی پیشنهادی با روش‌های ارائه شده در زمینه‌ی تعیین بهره‌برداری سیستم توزیع مقایسه شده است. این مقایسه از دیدگاه نوع برنامه‌ریزی، نحوه مدلسازی شبکه توزیع، روش مدلسازی بازار مبادلات انرژی بین ناحیه‌ای و چگونگی حفظ حریم خصوصی نواحی مستقل صورت گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود، روش بازیابی پیشنهادی، تنها روشی است که برای بازیابی شبکه توزیع در یک محیط چندعاملی یا چند نهادی مناسب است.

جدول (۱): مقایسه مطالعات صورت گرفته در زمینه بازیابی سیستم توزیع

مرجع	روش	نوع	مدلسازی شبکه توزیع	بازار مبادلات انرژی درون شبکه‌ای	حفظ حریم خصوصی نواحی
[۸]	یک چارچوب پیشگیرانه برای مقابله با اثرات نامطلوب طوفان‌های شدید	متمرکز	پخش بار AC	خیر	خیر
[۹]	یک چارچوب پیشگیرانه دو سطحی جهت افزایش تاب آوری شبکه‌های برق	غیرمتمرکز	پخش بار AC	خیر	خیر
[۱۰]	یک رویکرد بازسازی برای بهینه کردن بار بازیابی شده	متمرکز	پخش بار AC	خیر	خیر
[۱۱]	بازیابی شبکه‌ی توزیع پس از بلایای طبیعی در حضور منابع سیار انرژی	متمرکز	پخش بار AC	خیر	خیر
[۱۵]	افزایش قابلیت خودترمی شبکه توزیع هوشمند پس از وقوع خطا	متمرکز	پیشرو-پسرو	خیر	خیر
[۱۷]	یک روش بازیابی غیرمتمرکز مبتنی بر سیستم‌های چند عامله برای شبکه‌های توزیع فعال متصل به چند ریزشبکه	غیرمتمرکز	پیشرو-پسرو	خیر	خیر
[۱۹]	یک مدل بازیابی برای برنامه‌ریزی هماهنگ تیم‌های تعمیر و عملیات، ناوگان منابع تولیدی سیار و اتوماسیون توزیع	متمرکز	پخش بار AC	خیر	خیر
[۲۱]	یک روش بازیابی شبکه مبتنی بر تشکیل ریزشبکه پویا با استفاده از یادگیری تقویتی عمیق	متمرکز	پخش بار AC خطی	خیر	خیر
[۲۲]	یک رویکرد بازیابی تاب آورانه برای شبکه‌های توزیع چند انرژی	متمرکز	پخش بار AC خطی	خیر	خیر
[۲۳]	یک تکنیک بازیابی با استفاده از تولید پراکنده برای بهبود انعطاف‌پذیری سیستم توزیع	متمرکز	پخش بار AC خطی	خیر	خیر
[۲۴]	یک مدل ترکیبی سلسله مراتبی از یادگیری تقویتی عمیق و برنامه ریزی درجه دوم برای بازیابی سیستم توزیع	متمرکز	پخش بار AC	خیر	خیر
روشن پیشنهادی	بازیابی شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای با بهره‌گیری از تبادلات رخ به رخ توان	غیرمتمرکز	پخش بار AC	بله	بله

نهادهای مستقل با انجام مبادلات رخ به رخ می‌توانند از منابع انرژی محلی خود به گونه‌ای مؤثر استفاده کنند و علاوه بر کسب درآمد میزان بازیابی بارهای شبکه را نیز افزایش دهند.

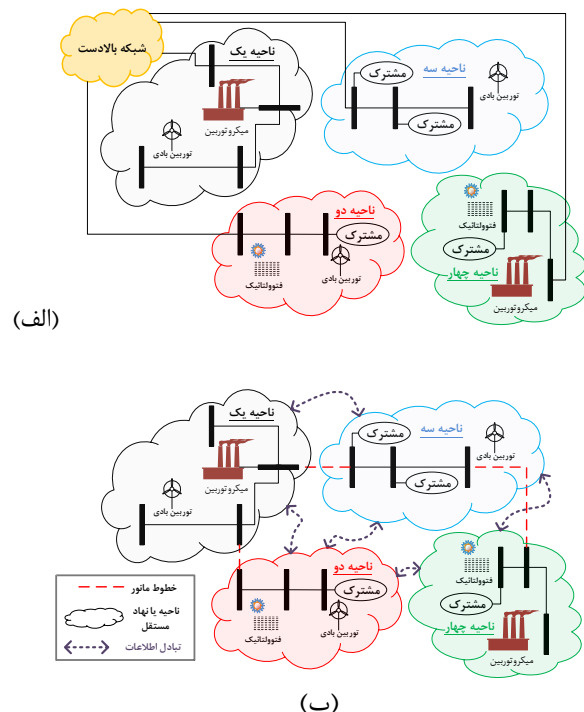
مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله به شرح ذیل است:

- ارائه یک چارچوب دو مرحله‌ای برای سازمان‌دهی مبادلات رخ به رخ جهت بازیابی شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای بعد از وقوع بلایای طبیعی.
- توسعه‌ی معادلات پخش بار چند ناحیه‌ای از دید اپراتور شبکه‌ی توزیع چند ناحیه‌ای با در نظر گرفتن حریم خصوصی نواحی مختلف.
- تعیین آرایش بهینه شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای به منظور ایجاد زمینه مناسب جهت انجام مبادلات رخ به رخ در شبکه.

در ادامه، در بخش دوم این مقاله به ساختار شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای پرداخته می‌شود. مدل برنامه‌ریزی محلی هر کدام از نواحی در بخش سوم و روش بازیابی دو مرحله‌ای پیشنهادی در بخش چهارم مقاله ارائه می‌شود. در بخش‌های پنجم و ششم نیز به ترتیب مطالعات شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

۲- شبکه‌ی توزیع فعال چند ناحیه‌ای

در شکل (۲) یک شبکه‌ی توزیع فعال چند ناحیه‌ای شامل ۴ ناحیه مستقل با نام‌های "ناحیه یک" الی "ناحیه چهار" نشان داده شده است.



شکل (۲): آرایش شبکه‌ی توزیع فعال چند ناحیه‌ای در حالت (الف) اتصال به شبکه بالادست (ب) جزیره‌ای

این روش، آرایش شبکه را به گونه‌ای تعیین می‌کند که زمینه‌ی انجام مبادلات رخ به رخ میان نواحی مختلف موجود در شبکه فراهم شود که این ویژگی در مطالعات پیشین در نظر گرفته نشده است.

بنابراین، ناحیه ی ۳ می تواند با خرید توان از نواحی ۱ و ۲ توان مورد نیاز مشترکین قرار گرفته در شین های ۸ و ۱۰ خود را تأمین کند. با این حال، آسیب وارد شده به DER4 و همچنین خروج خط توزیع ۶-۷ باعث شده که ناحیه ی ۲ نتواند از هیچ کدام از DERهای خود جهت تأمین بارهای محلی خود استفاده کند. این ناحیه می تواند برای تأمین مشترکین شماره ۵ و ۶ از طریق خط مانور ۲-۴ از ناحیه ۱ توان خریداری کند. در مبادلات رخ به رخ توان میان نواحی مختلف، علاوه بر ساختار شبکه باید قیود بهره برداری در نظر گرفته شوند. در ادامه، ابتدا مدل برنامه ریزی محلی هر ناحیه بیان شده، سپس روش دو مرحله ای پیشنهادی جهت بازیابی بهینه شبکه ارائه خواهد شد.

۳- مدل برنامه ریزی محلی

در این بخش، یک مدل محلی برای تعیین برنامه ریزی کوتاه مدت یک ناحیه با در نظر گرفتن انواع تراکنش های انرژی و انواع DERها ارائه شده است. از آنجایی که هر ناحیه به صورت یک سازمان یا نهاد مستقل برنامه ریزی می شود، جزئیات برنامه ریزی آن ناحیه از دید سایر نواحی پنهان است. بنابراین، یک ناحیه به مدل برنامه ریزی و داده های خصوصی سایر نواحی دسترسی ندارد و تنها به اطلاعات ناحیه خود دسترسی دارد. مدل برنامه ریزی ناحیه m با هدف بیشینه شدن سود این ناحیه در قالب یک مدل بهینه سازی محدب در (۱) فرمول بندی شده که در آن جهت نمایش متغیرها و پارامترهای خصوصی آن ناحیه از بالانویس m استفاده شده است.

$$\max_{x^m} PR^m = \sum_{t \in T} PR_t^m \quad (1)$$

t اندیس بازه ی زمانی و T مجموعه ی کل بازه های زمانی موجود در افق برنامه ریزی است. PR_t^m سود ناحیه m در بازه ی زمانی t ام، PR^m مجموع سود آن ناحیه در کل افق برنامه ریزی و X^m بردار متغیرهای تصمیم گیری مربوط به ناحیه m می باشند. لازم به ذکر است، در مدل پیشنهادی، برای تأکید بر خصوصی بودن متغیرها و پارامترهای مرتبط با ناحیه m ، از بالانویس m در نامگذاری پارامترها و متغیرهای مربوط به آن ناحیه استفاده شده است. به عنوان مثال، PR_t^m و PR^m جزو داده های خصوصی این ناحیه هستند که تنها ناحیه m به آن دسترسی دارد.

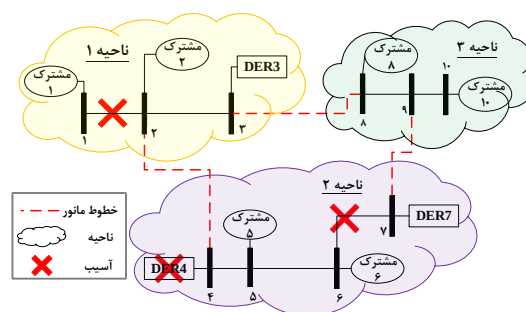
سود ناحیه m در گام زمانی t ام (PR_t^m) در رابطه ی (۲) به صورت اختلاف میان مجموع درآمد ناحیه m منهای مجموع هزینه های آن تعریف شده است.

$$PR_t^m = R_{co,t}^m + R_{ar,t}^m - C_{ar,t}^m - C_{G,t}^m - C_{LS,t}^m - C_{L,t}^m \quad (2)$$

که $R_{co,t}^m$ و $R_{ar,t}^m$ به ترتیب درآمد حاصل از فروش برق به مشترکین و نواحی دیگر، $C_{ar,t}^m$ هزینه ی خرید توان از نواحی دیگر موجود در شبکه توزیع فعال چند ناحیه ای، $C_{G,t}^m$ هزینه ی تولید میکروتوربین های محلی موجود در ناحیه m ام، $C_{LS,t}^m$ هزینه ی حذف

در این شبکه، هر ناحیه یک محدوده ی مشخص دارد که با یک رنگ منحصر به فرد در شکل ترسیم شده است. هر ناحیه می تواند دارای مشترکین محلی و منابع انرژی توزیع شده (DER) مانند میکروتوربین، توربین بادی و پنل فتوولتائیک باشد. لازم به ذکر است که در این مقاله برای تمرکز بر بحث تبادلات انرژی، DERها فقط به صورت منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر در نظر گرفته شده اند و از ذخیره سازهای انرژی صرف نظر شده است. هر کدام از این نواحی یک نهاد مستقل هستند که با هدف بیشینه سازی سود ناحیه خود برنامه ریزی می شوند. در شرایط عادی که شبکه بالادست برق دار است، هر ناحیه به شبکه ی بالادست متصل است که این اتصال در قسمت (الف) شکل (۲) نشان داده شده است. هنگام بی برق شدن شبکه بالادست، ریز شبکه ها می توانند در حالت جزیره ای کار کنند و یا با استفاده از خطوط مانور به یکدیگر متصل شوند که این حالت در قسمت (ب) شکل (۲) نشان داده شده است. با این حال، بعد از وقوع بلایای طبیعی مانند طوفان، ممکن است علاوه بر بی برق شدن شبکه ی بالادست، برخی از خطوط توزیع و DERهای موجود در شبکه ی توزیع فعال چند ناحیه ای آسیب ببینند. در چنین شرایطی، نواحی موجود در شبکه می توانند با استفاده از DERهای باقی مانده تقاضای الکتریکی برخی از مشترکین خود را تأمین کنند.

به دلیل آسیب وارد شده به شبکه توزیع، ممکن است استفاده از تمام ظرفیت DERهای محلی برای بازیابی بارهای هر ناحیه ممکن نباشد. به عنوان مثال، شکل (۳) بخشی از یک شبکه ی توزیع فعال چندناحیه ای را بعد از وقوع یک بلای طبیعی نشان می دهد. در این شبکه DER شماره ۴ و خطوط توزیع ۱-۲ و ۶-۷ آسیب دیده و از سرویس خارج شده اند. در این حالت، DER شماره ۷ که در ناحیه ی ۲ قرار گرفته نمی تواند بارهای آن ناحیه را تأمین کند. در چنین شرایطی با تغییر آرایش شبکه می توان زمینه ی انجام معاملات رخ به رخ میان نواحی مجاور را فراهم نمود. به عنوان مثال، با ورود خط مانور ۷-۹، ناحیه ی ۲ می تواند با فروش توان به ناحیه ۳ بخشی از توان مورد نیاز مشترکین واقع در شین های ۸ و ۱۰ را تأمین نماید. با این حال، خط مانور ۳-۸ نیز می تواند مشترکین ناحیه ۳ را به DER3 متصل کند.



شکل (۳): استفاده از DERها برای بازیابی شبکه توزیع فعال چند ناحیه ای بعد از وقوع بلایای طبیعی

توان مجاز عملکردی میکروتوربین g ام هستند. $F_{G,g}^m$ یک پارامتر باینری است که آسیب وارده به میکروتوربین g ام در اثر بلایای طبیعی را بیان می‌کند. اگر میکروتوربین g ام در اثر بلای طبیعی آسیب دیده باشد و در دسترس نباشد آنگاه، $F_{G,g}^m$ برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

میزان تولید منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی با در نظر گرفتن اثر مخرب بلایای طبیعی بر عملکرد آن‌ها به ترتیب در روابط (۱۱) و (۱۲) مدل شده‌اند.

$$0 \leq Pwt_{t,w}^m \leq Pwt_{pr,t,w}^m (1 - F_{WT,w}^m) \quad \forall t \in T, \forall w \in W^m \quad (11)$$

$$0 \leq Ppv_{t,p}^m \leq Ppv_{pr,t,p}^m (1 - F_{PV,p}^m) \quad \forall t \in T, \forall p \in P^m \quad (12)$$

در این روابط، W^m و P^m مجموعه‌ی توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتائیک موجود در ناحیه‌ی m ام هستند. $F_{WT,w}^m$ و $F_{PV,p}^m$ دو پارامتر باینری هستند که به ترتیب آسیب وارده به توربین بادی w ام و سیستم فتوولتائیک p ام را نشان می‌دهند. $Pwt_{pr,t,w}^m$ و $Ppv_{pr,t,p}^m$ نشان دهنده‌ی حداکثر میزان تولید پیش‌بینی شده‌ی توربین بادی و سیستم فتوولتائیک در بازه‌ی زمانی t ام و $Pwt_{t,w}^m$ و $Ppv_{t,p}^m$ نیز میزان تولید واقعی آن‌ها را در این بازه‌ی زمانی نشان می‌دهند.

۴- روش بازیابی پیشنهادی

در این مقاله یک ساختار دو مرحله‌ای برای بازیابی بهینه شبکه‌ی توزیع فعال چند ناحیه‌ای ارائه شده که فلوچارت آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

در مرحله اول این روش، آرایش شبکه‌ی توزیع با یک روش فراابتکاری تعیین می‌شود. پس از آن، نواحی مختلف با استفاده از تبادلات رخ به رخ توان سعی می‌کنند سود خویش را در این آرایش افزایش دهند. در مرحله دوم، قیود بهره‌برداری مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مدل پیشنهادی یک مدل غیرمتمرکز چند عاملی است که با حفظ استقلال عملکردی نواحی مختلف، آرایش بهینه‌ی شبکه‌ی توزیع فعال را با هدف بیشینه‌سازی مبادلات رخ به رخ توان تعیین می‌کند. در روش پیشنهادی، مطابق (۱۳) برای هر ساختار شبکه یک شاخص تناسب با نام In محاسبه می‌شود.

$$In = P_{p2p} - B_M E_{LF} \quad (13)$$

که P_{p2p} مجموع دامنه‌ی تبادلات رخ به رخ توان در بستر شبکه، E_{LF} شاخص تحقق قیود پخش بار شبکه و B_M یک عدد نسبتاً بزرگ است. جزئیات مربوط به محاسبه‌ی P_{p2p} و E_{LF} در سطوح دوم و سوم روش پیشنهادی تشریح خواهند شد. E_{LF} یک متغیر نامفی است و در حالتی که تمامی قیود پخش بار محقق شوند برابر صفر می‌شود.

بار و $C_{l,t}^m$ هزینه تلفات توان در بازه‌ی زمانی t ام هستند که در روابط (۳) الی (۸) تعریف شده‌اند.

$$R_{co,t}^m = \tau \sum_{c \in N^m} \lambda_{L,t}^m \times PL_{t,c}^m \quad (3)$$

$$R_{ar,t}^m = \tau \sum_{a=1|a \neq m}^M \lambda_t^{m2a} \times Par_{t,a}^{m2a} \quad (4)$$

$$C_{G,t}^m = \tau \sum_{g \in G^m} \left(a_g^m \times (Pg_{t,g}^m)^2 + b_g^m \times Pg_{t,g}^m + c_g^m \right) \quad (5)$$

$$C_{ar,t}^m = \tau \sum_{a=1|a \neq m}^M \lambda_t^{a2m} \times Pa_{t,a}^{a2m} \quad (6)$$

$$C_{LS,t}^m = \tau \sum_{L \in N^m} \lambda_{L,t}^m \times Pls_{t,L}^m \quad (7)$$

$$C_{l,t}^m = \tau \sum_{kj \in B^m} \lambda_{L,t}^m \times r_{kj}^m I_{t,kj}^m \quad (8)$$

τ طول هر بازه زمانی برنامه ریزی، $\lambda_{L,t}^m$ قیمت فروش برق به مشترک c ام در زمان t ام، $PL_{t,c}^m$ تقاضای توان مشترک c ام، λ_t^{m2a} قیمت فروش برق به ناحیه‌ی a ام، $Par_{t,a}^{m2a}$ توان انتقال یافته از ناحیه‌ی m ام به ناحیه‌ی a ام، g اندیس میکروتوربین، G^m مجموعه‌ی میکروتوربین‌های موجود در ناحیه‌ی m ام، a_g^m ، b_g^m و c_g^m ضرایب تابع هزینه میکروتوربین g ام، $Pg_{t,g}^m$ میزان توان اکتیو تولید شده توسط میکروتوربین g ام، λ_t^{a2m} قیمت خرید برق از ناحیه‌ی a ام توسط ناحیه‌ی m ام در گام زمانی t ام، $Pa_{t,a}^{a2m}$ توان اکتیو انتقال یافته از ناحیه‌ی a ام به ناحیه‌ی m ام در گام زمانی t ام، L و N^m به ترتیب اندیس و مجموعه‌ی تمام مشترکین توزیع واقع در ناحیه‌ی m ام، $Pls_{t,L}^m$ باز حذف شده مشترک L ام در ناحیه‌ی m ام در گام زمانی t ام، $\lambda_{L,t}^m$ جریمه حذف بار مشترک L ام در گام زمانی t ام، kj اندیس شاخه توزیع، B^m مجموعه‌ی تمامی شاخه‌های واقع در ناحیه‌ی m ام، r_{kj} مقاومت شاخه‌ی kj ام و $I_{t,kj}^m$ مجذور دامنه‌ی جریان عبوری از شاخه‌ی kj ام در بازه‌ی زمانی t ام می‌باشند.

محدوده‌ی تولید توان اکتیو و راکتیو میکروتوربین‌ها به ترتیب در روابط (۹) و (۱۰) بیان شده‌اند.

$$Pg_{min,g}^m (1 - F_{G,g}^m) \leq Pg_{t,g}^m \leq Pg_{max,g}^m (1 - F_{G,g}^m) \quad \forall t \in T, \forall g \in G^m \quad (9)$$

$$-Qm_{t,g}^m \leq Qg_{t,g}^m \leq Qm_{t,g}^m \quad \forall t \in T, \forall g \in G^m \quad (10)$$

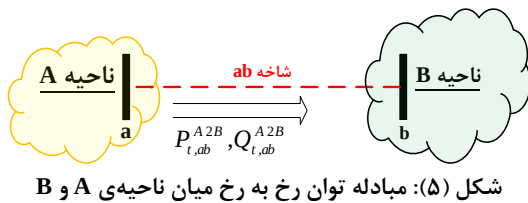
$$Qm_{t,g}^m = Pg_{t,g}^m \times \tan \left(\cos^{-1} \left(PF_{min,g}^m \right) \right)$$

که $Pg_{min,g}^m$ و $Pg_{max,g}^m$ به ترتیب حداکثر و حداقل ظرفیت تولید توان اکتیو، $Qm_{t,g}^m$ حداکثر توان راکتیو و $PF_{min,g}^m$ حداقل ضریب

همانگونه که از (۱۳) قابل برداشت است، افزایش P_{p2p} و E_{LF} به ترتیب موجب افزایش و کاهش شاخص In می‌شوند. بنابراین، برای تحقق حداکثری مبادلات رخ به رخ همراه با رعایت قیود پخش بار، می‌بایست P_{p2p} افزایش و به صورت همزمان E_{LF} کاهش یابد. بر این اساس، ساختاری که بیشترین In را داشته باشد به عنوان پاسخ بهینه انتخاب می‌شود (شکل (۴)). لازم به ذکر است، B_M میزان اهمیت تحقق معادلات پخش بار را کنترل می‌کند. از آنجایی که برقراری قیود پخش بار جهت اجرای نتایج الزامی است، B_M یک عدد نسبتاً بزرگ باید در نظر گرفته شود (در این مقاله برابر ۱۰۰۰۰ فرض شده است).

در مدار بودن شاخه توزیع jk در بازه‌ی زمانی t ام است. در این مقاله از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای تعیین ساختار شبکه استفاده شده است. بدین صورت که بردار St به عنوان کروموزوم و هر کدام از متغیرهای باینری $St_{t,jk}$ ($\forall jk \in B, t \in T$) به عنوان ژن‌های سازنده‌ی آن در نظر گرفته شده‌اند. در الگوریتم ژنتیک، ابتدا کروموزوم‌های St به صورت تصادفی مقداردهی می‌شوند تا جمعیت اولیه آرایش‌های شبکه را ایجاد کنند. در ادامه، میزان شایستگی هر کروموزوم بر اساس شاخص In در رابطه (۱۳) ارزیابی می‌شود. لازم به ذکر است که جمعیت آرایش‌های شبکه، با توجه به میزان شایستگی کروموزوم‌ها، بر اساس عملگرهای ژنتیکی جهش و تقاطع در یک ساختار تکرارشونده مطابق شکل (۴) بهبود داده می‌شوند. بنابراین، از آنجایی که کروموزوم‌های بیانگر آرایش شبکه، توسط الگوریتم ژنتیک به روزرسانی می‌شوند، روش دو مرحله‌ای پیشنهادی دارای یک ساختار تکرار شونده است. در مرحله‌ی اول، آرایش شبکه توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهاد و بر اساس آن مبادلات رخ به رخ میان نواحی مختلف تسویه می‌شود. در این مرحله، میزان شایستگی آرایش پیشنهاد شده، با محاسبه‌ی شاخص In تعیین می‌شود. الگوریتم ژنتیک با بررسی آرایش‌های مختلف شبکه، در نهایت ساختاری را انتخاب می‌کند که بزرگترین شاخص In را ارائه دهد.

در شکل (۵) تبادل رخ به رخ میان دو ناحیه‌ی A و B از طریق شاخه‌ی ab (خط واصل شین a در ناحیه A به شین b در ناحیه‌ی B) نشان داده شده است.



همانگونه که در این شکل نمایان است، $P_{t,ab}^{A2B}$ و $Q_{t,ab}^{A2B}$ توان‌های اکتیو و راکتیو فروخته شده به ناحیه‌ی B در بازه‌ی زمانی t ام هستند. درآمد ناحیه‌ی A از فروش توان به ناحیه‌ی B با رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود.

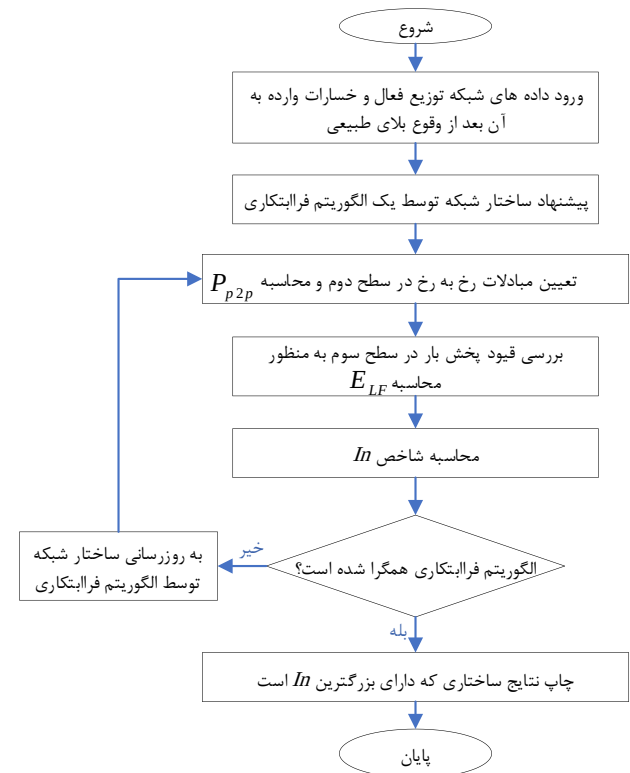
$$R_{A2B,t}^A = \tau(P_{t,ab}^{A2B} \lambda p_t^A + Q_{t,ab}^{A2B} \lambda q_t^A) \quad \forall t \in T \quad (14)$$

که λp_t^A و λq_t^A به ترتیب قیمت فروش توان اکتیو و راکتیو در بازه‌ی زمانی t ام هستند. به طور مشابه، هزینه‌ی خرید توان از دید ناحیه‌ی B به صورت رابطه‌ی (۱۵) مدل می‌شود.

$$C_{A2B,t}^B = R_{A2B,t}^A \quad \forall t \in T \quad (15)$$

که $C_{A2B,t}^B$ هزینه‌ی خرید توان از ناحیه‌ی A در بازه‌ی زمانی t ام است که توسط ناحیه‌ی B پرداخت می‌شود. نواحی مستقل موجود در

همانگونه که از (۱۳) قابل برداشت است، افزایش P_{p2p} و E_{LF} به ترتیب موجب افزایش و کاهش شاخص In می‌شوند. بنابراین، برای تحقق حداکثری مبادلات رخ به رخ همراه با رعایت قیود پخش بار، می‌بایست P_{p2p} افزایش و به صورت همزمان E_{LF} کاهش یابد. بر این اساس، ساختاری که بیشترین In را داشته باشد به عنوان پاسخ بهینه انتخاب می‌شود (شکل (۴)). لازم به ذکر است، B_M میزان اهمیت تحقق معادلات پخش بار را کنترل می‌کند. از آنجایی که برقراری قیود پخش بار جهت اجرای نتایج الزامی است، B_M یک عدد نسبتاً بزرگ باید در نظر گرفته شود (در این مقاله برابر ۱۰۰۰۰ فرض شده است).



شکل (۴): فلوچارت روش پیشنهادی برای بازیابی شبکه‌ی توزیع فعال چند ناحیه‌ای.

۴-۱- مرحله اول: پیشنهاد ساختار شبکه و تسویه تبادلات رخ به رخ

در یک شبکه‌ی توزیع فعال انجام مبادلات رخ به رخ میان نواحی مجاور به ساختار شبکه وابسته است. به عنوان مثال، در شبکه‌ی توزیع فعال نشان داده شده در شکل (۳)، مبادلات رخ به رخ میان ناحیه‌ی ۱ و ۲ به وضعیت در مدار بودن خط ۲-۴ و تبادلات رخ به رخ میان نواحی ۲ و ۳ به وضعیت خط ۷-۹ وابسته است. بنابراین، در مرحله اول روش پیشنهادی، همانند روش‌های فراابتکاری ارائه شده در [۲۷] یک آرایش برای شبکه‌ی توزیع پیشنهاد می‌شود. منظور از آرایش، تعیین وضعیت در مدار بودن خطوط توزیع بین ناحیه‌ای در هر بازه‌ی زمانی است. در این مقاله، این آرایش با بردار متغیرهای باینری $St =$

شاخه‌های بالادست متصل به شین z ام، x_{kj} راکتانس شاخه jk و $Pb_{t,jk}$ و $Qb_{t,jk}$ نیز به ترتیب توان های اکتیو و راکتیو تزریق شده به شاخه jk از سمت شین z ام در بازه‌ی زمانی t ام هستند. رابطه‌ی پخش بار میان مجذور دامنه‌ی ولتاژ دو شین z و k که به ترتیب در ابتدا و انتهای شاخه‌ی jk قرار گرفته‌اند و جریان و توان عبوری از آن شاخه در روابط (۱۹) و (۲۰) بیان شده است [۲۵].

$$\begin{aligned} -\left(1 - St_{t,jk}\right)M &\leq -v_{t,k} + v_{t,j} - 2r_{jk}Pb_{t,jk} \\ &\quad + I_{t,jk}r_{jk}^2 - 2x_{jk}Qb_{t,jk} \\ &\quad + I_{t,jk}x_{jk}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &\leq \left(1 - St_{t,jk}\right)M \quad \forall t \in T, \forall jk \in B \\ &\quad \left\| \begin{bmatrix} 2Qb_{t,jk} & 2Pb_{t,jk} & I_{t,jk} - v_{t,j} \end{bmatrix} \right\|_2 \\ &\quad \leq \left(I_{t,jk} + v_{t,j}\right) \quad \forall t \in T, \forall jk \in B \end{aligned} \quad (20)$$

که $v_{t,k}$ و $v_{t,j}$ به ترتیب مجذور دامنه‌ی ولتاژ شین‌های z و k ، $\|A\|_2$ نشان دهنده‌ی نرم-دو بردار A و B مجموعه‌ی تمام شاخه‌های میان ناحیه‌ای موجود در شبکه‌ی توزیع فعال هستند. M یک پارامتر نسبتاً بزرگ است که برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. $St_{t,jk}$ یک متغیر باینری است که وضعیت در مدار بودن خط jk در بازه‌ی زمانی t ام را کنترل می‌کند. بر اساس رابطه‌ی (۱۹)، معادله‌ی پخش بار میان ولتاژ شین‌های ابتدا و انتهای شاخه‌ی jk در بازه‌ی زمانی t ام (یعنی $v_{t,k}$ و $v_{t,j}$) و جریان و توان عبوری از این شاخه تنها زمانی که این شاخه در مدار است ($St_{t,jk} = 1$) در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت‌های مرتبط با جریان مجاز شاخه‌ها و محدوده‌ی دامنه‌ی ولتاژ شین‌ها به ترتیب در روابط (۲۱) و (۲۲) بیان شده‌اند.

$$0 \leq I_{t,jk} \leq St_{t,jk} I_{max,jk} \quad \forall t \in T, \forall jk \in B \quad (21)$$

$$v_{min}^2 \leq v_{t,j} \leq v_{max}^2 \quad \forall t \in T, \forall j \in N \quad (22)$$

که $I_{max,jk}$ مجذور جریان نامی شاخه‌ی jk و v_{min} و v_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر دامنه‌ی مجاز ولتاژ شین‌های شبکه‌ی توزیع فعال می‌باشند.

برای حفظ ساختار شعاعی شبکه نباید هیچ گونه مسیر بسته‌ای توسط شاخه‌هایی که در مدار هستند تشکیل شود. این محدودیت مهم در رابطه (۲۳) مدلسازی شده است [۲۸].

$$\sum_{jk \in lp_l} St_{t,jk} \leq NL_l - 1 \quad \forall t \in T, \forall l \in L \quad (23)$$

که l اندیس حلقه، L مجموعه‌ی تمام حلقه‌های بالقوه موجود در شبکه توزیع فعال، lp_l مجموعه‌ی شاخه‌های تشکیل دهنده‌ی حلقه l ام و NL_l تعداد شاخه‌های موجود در حلقه‌ی l ام هستند.

جهت تحقق مبادلات رخ به رخ، باید توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط توزیع قرار گرفته میان نواحی طرف قرارداد با مقادیر مبادلات

ADN، هنگامی در یک مبادله‌ی رخ به رخ شرکت می‌کنند که سود خود را در آن ببینند. لازم به ذکر است، در روش پیشنهادی، به دلیل سیاست‌های حفظ حریم خصوصی، هر ناحیه تمامی نتایج برنامه‌ریزی بازیابی خود را منتشر نمی‌کند. داده‌هایی که اجازه انتشار ندارند، همان داده‌های خصوصی آن ناحیه هستند که برای تأکید بر خصوصی بودن آن‌ها، نام آن ناحیه در بالانویس آن متغیر به صورت انحصاری درج شده است (مانند PR^m و $C_{G,t}^m$). با این حال، برنامه‌ریزی به دست آمده برای مبادلات رخ به رخ، یعنی پاسخ متغیرهای $P_{t,ab}^{A2B}$ و $Q_{t,ab}^{A2B}$ جزو اطلاعات مشترک نواحی A و B هستند که با توافق این دو ناحیه محاسبه شده‌اند. بنابراین، این داده‌ها خصوصی نیستند و انتشار آن‌ها ناقض سیاست حفظ حریم خصوصی نواحی نیست. برای تأکید بر این موضوع، این متغیرهای بالانویس انحصاری (مانند m) ندارند. از آنجایی که تبادلات توان میان ناحیه‌ای بر معادلات پخش بار اثرگذار است، لذا نواحی باید میزان توان اکتیو و راکتیو مبادله شده را اعلام کنند. پس از آن، مجموع دامنه‌ی تبادلات توان، یعنی متغیر P_{p2p} ، با رابطه‌ی (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$P_{p2p} = \sum_{t \in T} \left(\sum_{jk \in B} |P_{t,jk}^{\Gamma_j 2 \Gamma_k}| \right) \quad (16)$$

۴-۲- مرحله دوم: بررسی قیود شبکه

پس از تسویه مبادلات رخ به رخ در مرحله اول، امکان‌سنجی پیاده‌سازی آن در مرحله دوم روش پیشنهادی با بررسی معادلات پخش بار و قیود بهره‌برداری بررسی می‌شود. از آنجایی که نواحی مستقل هستند، برای حفظ حریم خصوصی خود، اطلاعات شبکه داخلی خویش را به اشتراک نمی‌گذارند و تنها اطلاعات خطوط مانور و اطلاعات مربوط به تبادلات توان رخ به رخ میان نواحی مجاور به اشتراک گذاشته می‌شود [۲۵]. بنابراین، در مرحله دوم روش پیشنهادی، تنها قیود پخش بار مرتبط با شین‌ها و خطوط توزیع قرار گرفته میان دو ناحیه‌ی مجاور بررسی می‌گردد. لازم به ذکر است که قیود پخش بار داخلی هر ناحیه، توسط خود آن ناحیه و هنگام شرکت در مبادلات رخ به رخ به صورت خصوصی بررسی می‌شود. قید تعادل توان اکتیو و راکتیو در شین‌های شبکه‌ی توزیع فعال به ترتیب با روابط (۱۷) و (۱۸) بیان شده‌اند.

$$Pi_{t,j} + \sum_{k \in D_j} (Pb_{t,kj} - r_{kj}I_{t,kj}) = \sum_{k \in D_j} Pb_{t,jk} \quad \forall t \in T, \forall j \in N \quad (17)$$

$$Qi_{t,j} + \sum_{k \in D_j} (Qb_{t,kj} - x_{kj}I_{t,kj}) = \sum_{k \in D_j} Qb_{t,jk} \quad \forall t \in T, \forall j \in N \quad (18)$$

که j اندیس شین و N مجموعه‌ی تمام شین‌های میان ناحیه‌ای موجود در شبکه‌ی توزیع فعال، $Pi_{t,j}$ و $Qi_{t,j}$ توان‌های اکتیو و راکتیو تزریق شده به شین z ام از سمت ناحیه‌ی متصل به آن در بازه‌ی زمانی t ام، D_j مجموعه‌ی تمام شاخه‌های پایین دست و U_j مجموعه‌ی تمام

برابر صفر شوند، تمامی قیود پخش بار محقق شده و E_{LF} نیز برابر صفر خواهد شد. بنابراین، در مرحله دوم روش پیشنهادی، پخش بار شبکه در قالب یک مدل بهینه سازی با هدف کاهش E_{LF} بر اساس رابطه (۲۷) انجام می شود.

$$\min_X E_{LF}$$

با توجه به قیود: (۱۷) الی (۲۶)

$$X = \begin{bmatrix} I_{t,jk}, St_{t,jk}, v_{t,j}, Pb_{t,jk}, Qb_{t,jk}, \\ Pp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}, Pn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}, Qp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}, Qn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} \end{bmatrix} \quad (27)$$

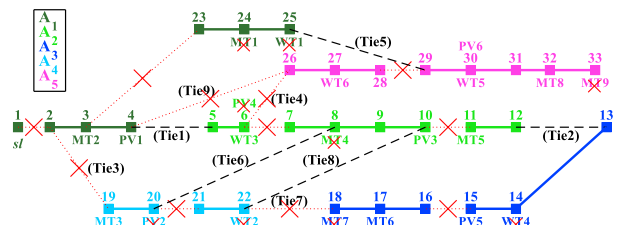
که بردار متغیرهای پخش بار شامل ولتاژ شین ها، جریان، توان اکتیو و راکتیو عبوری از شاخه های شبکه در کلیه ی بازه های برنامه ریزی است.

۵- شبیه سازی و نتایج

روش دو مرحله ای پیشنهادی بر روی شبکه توزیع فعال ۵ ناحیه ای اصلاح شده ی ۳۳ شینه ی IEEE در محیط MATLAB R2023b شبیه سازی شده است. مدل برنامه ریزی محلی هر کدام از نواحی با استفاده از جعبه ابزار YALMIP [۲۹] مطابق مدل (۱) فرمول بندی شده و برای حل آن از حل کننده ی CPLEX 12.9 [۳۰] استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک نیز با استفاده از تابع ga برای تعیین آرایش بهینه شبکه استفاده شده است. در این بخش، برنامه ریزی بازیابی این شبکه توزیع فعال چند ناحیه ای بعد از بروز یک بلای طبیعی شدید در دو حالت با و بدون وجود مبادلات رخ به رخ میان نواحی مختلف انجام شده است.

۵-۱- شبکه مورد مطالعه

شبکه ی توزیع اصلاح شده ۳۳ شینه ی IEEE به عنوان مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است. اطلاعات این شبکه از [۲۸] استخراج شده است. در این شبکه، ۵ ناحیه ی مستقل با نام های A_1 الی A_5 وجود دارد که در شکل (۷) با رنگ های مجزا نشان داده شده اند.



شکل (۷): شبکه ی توزیع فعال ۵ ناحیه ای مورد مطالعه [۲۸].

در این شبکه توزیع ۹ خط مانور قرار دارد که اطلاعات آن ها در جدول (۲) ذکر شده و با خطوط خط چین مشکی رنگ در شکل (۷) نشان داده شده اند. در این مقاله فرض شده که در اثر یک بلای طبیعی شاخه های

برابر باشد. در روش پیشنهادی، تبدلات توان اکتیو و راکتیو به ترتیب در روابط (۲۴) و (۲۵) بیان شده اند.

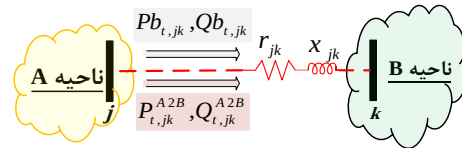
$$Pb_{t,jk} = P_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} + Pp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} - Pn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} \quad (24)$$

$$0 \leq Pp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}, Pn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} \quad \forall t \in T, \forall jk \in B^{P2P}$$

$$Qb_{t,jk} = Q_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} + Qp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} - Qn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} \quad (25)$$

$$0 \leq Qp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}, Qn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} \quad \forall t \in T, \forall jk \in B^{P2P}$$

در این روابط، $P_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ و $Q_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو عبوری از شاخه ی jk در بازه ی زمانی t ام هستند که Γ_j و Γ_k به ترتیب نشان دهنده ی نواحی ای از شبکه توزیع فعال چند ناحیه ای هستند که شین های j و k در آن ها واقع شده اند. به عنوان مثال، در شکل (۶) Γ_j و Γ_k به ترتیب بیانگر نواحی A و B هستند.



شکل (۶): مدل سازی مبادلات رخ به رخ میان دو ناحیه ی A و B در

پخش بار شبکه در مرحله دوم

$$Pp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}, Pn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}, Qp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}, Qn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$$

نامنفی هستند که برای تحقق معادلات پخش بار در مرحله دوم در نظر گرفته شده اند. $Pp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ و $Qp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ برای افزایش و $Pn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ و $Qn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ نیز برای کاهش مقادیر توان اکتیو و راکتیو مبادله شده در

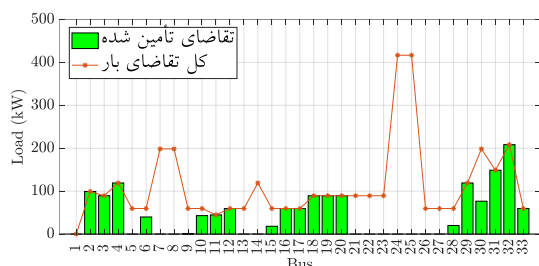
نظر گرفته شده اند. در حالت ایده آل این ۴ متغیر کمکی برابر صفر هستند که نشان دهنده ی برآورده شدن قیود پخش بار هنگام انجام مبادلات رخ به رخ در شبکه است.

در مرحله دوم روش پیشنهادی، پخش بار شبکه توزیع فعال چند ناحیه ای با فرض تحقق مبادلات رخ به رخ توان در قالب یک مسئله ی بهینه سازی مدل سازی شده است. در این راستا، یک شاخص جدید با نام E_{LF} در رابطه (۲۶) تعریف شده که میزان تحقق مبادلات رخ به رخ را بیان می کند.

$$E_{LF} = \sum_{t \in T} \left(\sum_{jk \in B} Pp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} + Pn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} + Qp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} + Qn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k} \right) \quad (26)$$

در این رابطه، E_{LF} به صورت مجموع چهار متغیر کمکی $Pp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$

$Pn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ ، $Qp_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ و $Qn_{t,jk}^{\Gamma_j 2\Gamma_k}$ در تمامی بازه های برنامه ریزی تعریف شده است. اگر این متغیرهای کمکی در تمامی گام های زمانی



شکل (۹): میزان کل بار و تقاضای تأمین شده بارهای موجود در شبکه در حالت اول

بر اساس این شکل، تقاضای بار در شین‌های شماره‌ی ۲ الی ۴ به طور کامل توسط MT2 و PV1 تأمین شده است. با این حال، به دلیل از مدار خارج شدن خطوط ۲-۱۹ و ۲-۱ امکان فروش مازاد تولید این منابع انرژی وجود ندارد.

جزئیات مربوط به هزینه‌ها و درآمدهای هر ناحیه از شبکه‌ی توزیع فعال چند ناحیه‌ای در حالت یک در جدول (۳) آمده است.

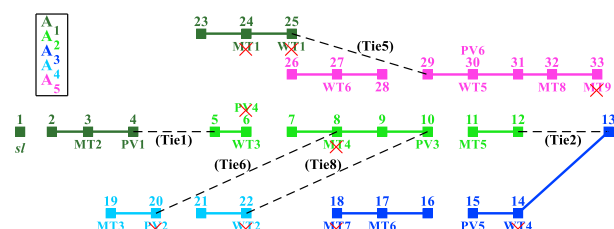
جدول (۳): هزینه‌های نواحی در حالت اول (بدون مبادلات رخ به رخ)

Area	R_{co}^m	$R_{ar}^m - C_{ar}^m$	C_G^m	C_{LS}^m	C_I^m	PR^m
A1	175.69	0	153.42	553.66	0.02	-531.4
A2	107.17	0	29.3	330.95	0	-253.09
A3	129.38	0	41.86	132	0.03	-44.5
A4	102.02	0	111.81	107.16	0.03	-116.98
A5	361.16	0	105.1	168.33	0.39	87.34
کل شبکه	875.42	0	441.5	1292.1	0.47	-858.63

براساس داده‌های ذکر شده در این جدول، به دلیل وقوع این بلای طبیعی، سود تمامی نواحی به جز ناحیه‌ی شماره‌ی ۵ (A5) منفی شده است. زیرا DERهای موجود در A5 نسبت به نواحی دیگر دچار آسیب کمتری شده‌اند.

۵-۳- حالت دوم: با مبادلات رخ به رخ

در حالت دوم، برنامه ریزی بازایی شبکه توزیع فعال با بهره‌گیری از مبادلات رخ به رخ و با استفاده از روش دو مرحله‌ای پیشنهادی تعیین شده است.



شکل (۱۰): دیاگرام شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای در حالت دوم

در این حالت، خطوط مانور شماره ۱، ۲، ۵، ۶ و ۸ که با خطوط خط چین مشکی رنگ در شکل (۱۰) ترسیم شده‌اند، وارد مدار

توزیع ۲-۱، ۶-۷، ۱۰-۱۱، ۱۵-۱۶، ۲۰-۲۱، ۳-۲۳ و ۲۸-۲۹، خطوط مانور میان ناحیه‌ای ۲-۱۹ (Tie3)، ۲۶-۶ (Tie4)، ۲۲-۱۸ (Tie7) و ۲۶-۴ (Tie9)، میکروتوربین‌های شماره‌ی ۱، ۷ و ۹، WT‌های ۱، ۲ و ۴ و همچنین PV‌های شماره‌ی ۲ و ۴ از مدار خارج شده‌اند که در شکل (۷) با نماد ضربدر قرمز رنگ مشخص شده‌اند.

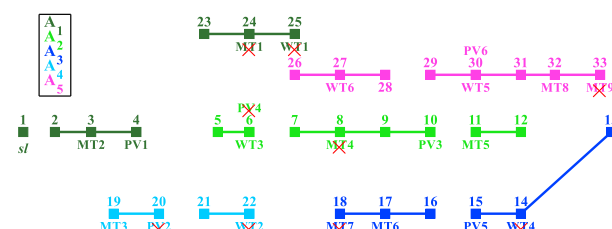
جدول (۲): اطلاعات خطوط مانور

وضعیت آسیب	شین		ناحیه		خط مانور
	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	
سالم	۵	۴	۱	۲	۱
سالم	۱۳	۱۲	۲	۳	۲
آسیب دیده	۱۹	۲	۱	۴	۳
آسیب دیده	۲۶	۶	۲	۵	۴
سالم	۲۹	۲۵	۱	۵	۵
سالم	۸	۲۰	۴	۲	۶
آسیب دیده	۱۸	۲۲	۴	۳	۷
سالم	۱۰	۲۲	۴	۲	۸
آسیب دیده	۲۶	۴	۱	۵	۹

در ادامه، برنامه ریزی این شبکه در دو حالت با و بدون وجود مبادلات رخ به رخ توان شبیه‌سازی شده است.

۵-۲- حالت اول: بدون وجود مبادلات رخ به رخ

در حالت اول فرض شده است که بعد از وقوع بلای طبیعی نواحی وارد حالت جزیره‌ای می‌شوند و هیچ گونه خط مانوری میان نواحی وجود ندارد. دیاگرام شبکه در این حالت در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): دیاگرام شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای در حالت اول

همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، در اثر خروج خط ۴-۲۳ و همزمان با آن از مدار خارج شدن میکروتوربین شماره یک (MT1) و توربین بادی شماره یک (WT1) امکان تغذیه بارهای موجود در شین‌های ۲۳ الی ۲۵ که در ناحیه‌ی یک (A1) واقع شده‌اند، وجود ندارد. میزان کل تقاضای بار همراه با تقاضای بار تأمین شده در هر کدام از شین‌های شبکه در حالت اول در شکل (۹) نشان داده شده است.

۸۷۵/۴۲ دلار به ۱۷۷۷/۸ دلار رسیده است. همچنین، به دلیل افزایش تولید میکروتوربین های محلی در حالت دوم، هزینه تولید آن ها در حالت دوم در مقایسه با حالت اول افزایش یافته و به ۱۱۱۲/۱ دلار رسیده است.

میزان توان اکتیو و راکتیو داد و ستد شده میان نواحی مختلف، از طریق هر کدام از خطوط مانور به ترتیب در جدول (۵) و جدول (۶) آمده است. میزان سود نواحی مختلف در دو حالت اول و دوم در

جدول (۷) با هم مقایسه شده است. بر اساس داده های این جدول، سود تمامی نواحی در حالت دوم از حالت اول بیشتر شده است که کارایی روش بازیابی پیشنهادی را نشان می دهد.

به منظور نشان دادن سازگاری روش دو مرحله ای پیشنهادی با سایر الگوریتم های فراابتکاری، برنامه ریزی بازیابی شبکه ی توزیع اصلاح شده ۳۳ شینه ی IEEE با الگوریتم PSO نیز انجام شده است. از آنجایی که در این شبکه تنها ۹ عدد خط ارتباطی وجود دارد، تعداد کل متغیرهای تصمیم گیری برابر ۹ عدد هستند که همگی آن ها از نوع باینری (دو دویی) می باشند.

جدول (۶): تبادل رخ به رخ توان راکتیو در حالت دوم

خط مانور	ناحیه فروشنده	ناحیه خریدار	توان راکتیو فروخته شده (kVAr)	هزینه مبادله رخ به رخ توان راکتیو (دلار)
1	1	2	46.9629	2.6825
2	2	3	124.4732	7.1099
3	4	1	0	0
4	5	2	0	0
5	5	1	447.8657	25.5821
6	4	2	128.3946	7.3339
7	3	4	0	0
8	2	4	44.0947	2.5187
9	5	1	0	0

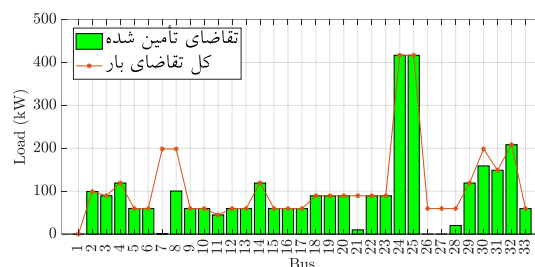
جدول (۷): مقایسه سود نواحی در دو حالت اول و دوم

Area	سود در حالت اول (دلار)	سود در حالت دوم (دلار)
A1	-531.4	-21.19
A2	-253.09	-56.2
A3	-44.5	80.11
A4	-116.98	-94.03
A5	87.34	402.37
کل شبکه	-858.63	311.05

در این حالت، الگوریتم PSO در تکرار شماره ۲۶ همگرا شده است. ساختار به دست آمده از این الگوریتم در شکل (۱۲) نشان داده شده که دقیقاً مشابه نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک در شکل (۱۰) است. همچنین، سود هر کدام از نواحی در نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و PSO در جدول (۸) با هم مقایسه شده است.

می شوند. به دنبال ورود این خطوط، امکان انجام مبادلات رخ به رخ میان نواحی ۵ گانه ایجاد شده و همزمان با آن تمامی قیود بهره برداری مانند حفظ ساختار شعاعی شبکه توزیع فعال محقق شده اند.

میزان بار تأمین شده در این حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. جزئیات هزینه ها و درآمدهای نواحی مختلف در این حالت، در جدول (۴) آمده است.



شکل (۱۱): میزان کل تقاضا بار و میزان تقاضای تأمین شده بارهای موجود در شبکه در حالت دوم

جدول (۴): هزینه ها و درآمدهای نواحی مختلف شبکه ی توزیع فعال مورد

مطالعه در حالت دوم (بر حسب دلار)

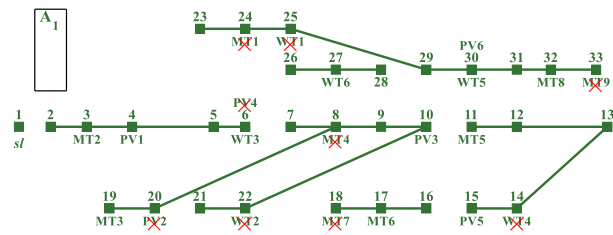
Area	R_{co}^m	$R_{ar}^m - C_{ar}^m$	C_G^m	C_{LS}^m	C_I^m	PR^m
A1	702.77	506.89	216.09	0	0.99	-21.19
A2	253.19	18.57	112.84	177.57	0.4	-56.2
A3	255.04	132.99	41.86	0	0.07	80.11
A4	158.69	-104.79	309.25	47.63	0.62	-94.03
A5	408.16	-553.66	432	118.96	8.49	402.37
کل شبکه	1777.8	0	1112.1	344.16	10.6	311.05

در ستون ۵ام این جدول، هزینه ی حذف بار نواحی مختلف بیان شده است. مقایسه این جدول با نتایج جدول (۳) نشان می دهد که با انجام مبادلات رخ به رخ، میزان حذف بار در تمامی نواحی کاهش یافته است. به گونه ای که، مجموع هزینه حذف بار بیش از ۹۴۷/۹ دلار کاهش یافته است.

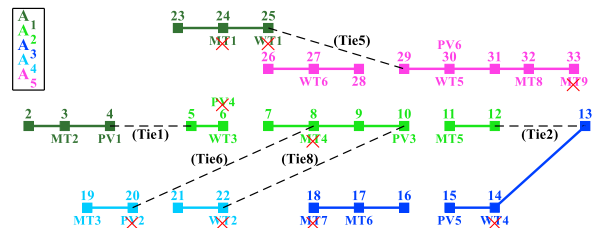
جدول (۵): تبادل رخ به رخ توان اکتیو در حالت دوم

خط مانور	ناحیه فروشنده	ناحیه خریدار	توان اکتیو فروخته شده (kW)	هزینه مبادله رخ به رخ توان اکتیو (دلار)
1	1	2	77.1927	44.0925
2	2	3	220.3853	125.8841
3	4	1	0	0
4	5	2	0	0
5	5	1	924.5085	528.0792
6	4	2	274.2416	156.6468
7	3	4	0	0
8	2	4	99.2121	56.67
9	5	1	0	0

در این حالت، مجموع سود نواحی مختلف به ۳۱۱/۰۵ دلار رسیده که نسبت به حالت اول افزایش بیش از ۱۱۶۹ دلاری را نشان می دهد. این افزایش سود به دلیل انجام مبادلات رخ به رخ میان نواحی مستقل بر اساس روش دو مرحله ای پیشنهادی است. با انجام مبادلات انرژی، علاوه بر کاهش هزینه ی حذف بار، درآمد ناشی از فروش توان به مشترکین محلی نسبت به حالت اول افزایش چشمگیری یافته و از



شکل (۱۳): آرایش بهینه‌ی به دست آمده از روش متمرکز مرجع [۲۸]



شکل (۱۲): آرایش بهینه‌ی به دست آمده از الگوریتم PSO

جدول (۹): هزینه‌ها و درآمدهای شبکه‌ی توزیع فعال مورد مطالعه با روش متمرکز مرجع [۲۸]

Area	R_{co}^m	$R_{ar}^m - C_{ar}^m$	C_G^m	C_{LS}^m	C_I^m	PR^m
A1	1777.85	0	1112.06	344.15	10.58	311.06
کل شبکه	1777.85	0	1112.06	344.15	10.58	311.06

در حالت برنامه‌ریزی متمرکز، از آنجایی که تنها یک ناحیه در شبکه وجود دارد، هزینه مبادلات انرژی میان ناحیه ای برابر صفر شده است.

مقایسه شکل (۱۳) با شکل (۱۰) و جدول (۹) با جدول (۴) نشان می‌دهد که ساختار شبکه‌ی بازیابی شده و همچنین هزینه‌ها و درآمدهای آن در هر دو روش پیشنهادی و متمرکز [۲۸] مشابه هستند. بر اساس این مقایسه، روش پیشنهادی می‌تواند همزمان با حفظ حریم خصوصی نواحی مختلف، بازیابی شبکه را بر اساس مبادلات رخ به رخ میان نواحی مختلف به صورت بهینه تعیین کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش دو مرحله‌ای برای سازماندهی مبادلات رخ به رخ توان میان نواحی مختلف یک شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای به منظور بازیابی بهینه‌ی شبکه بعد از وقوع بلایای طبیعی ارائه شده است. تعیین آرایش شبکه توزیع بر اساس مبادلات رخ به رخ از مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله است که بازیابی بارهای نواحی مختلف شبکه توزیع را بعد از بروز بلایای طبیعی با در نظر گرفتن استقلال عملکردی نواحی مختلف و انگیزه‌های شخصی آن‌ها در تجارت انرژی بهبود می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد مبادلات توان رخ به رخ می‌تواند میزان سود نواحی مختلف را نسبت به حالت جزیره‌ای افزایش قابل توجهی دهد و از ۸۹۲/۵۸- دلار به ۳۱۱/۰۵ دلار برساند. این نتایج گواه آن است که روش دو مرحله‌ای پیشنهادی همزمان با حفظ حریم خصوصی نواحی با زمینه‌سازی مناسب جهت انجام مبادلات رخ به رخ، میزان تبادلات انرژی میان نواحی را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، هزینه‌ی حذف بار در شبکه توزیع فعال از ۱۲۹۲/۱ دلار به ۳۴۴/۱۶ دلار کاهش یافته که قابلیت روش پیشنهادی در استفاده از ظرفیت بالقوه‌ی DERهای محلی را در بازیابی شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای نشان می‌دهد. همچنین، مقایسه نتایج بازیابی با روش بازیابی متمرکز، بهینه بودن نتایج روش پیشنهادی را تأیید می‌کند. در این مقاله، عدم قطعیت‌های مرتبط با کمیت‌های نایقین، مانند میزان

براساس نتایج شبیه‌سازی، هر دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و PSO به نتایج مشابهی دست یافته‌اند که نشان می‌دهد روش دو مرحله‌ای پیشنهادی قابلیت تطبیق‌پذیری بالایی با الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری را دارد. در روش پیشنهادی، وضعیت در مدار بودن خطوط ارتباطی به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله اول در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، از دید الگوریتم فراابتکاری، متغیرهای تصمیم‌گیری از نوع باینری و برابر با تعداد خطوط ارتباطی موجود در شبکه هستند. بر اساس این ویژگی، آرایش به دست آمده از الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف یکسان می‌شود که تطبیق‌پذیری روش دو مرحله‌ای پیشنهادی با الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری را نشان می‌دهد.

جدول (۸): سود نواحی در نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های GA و PSO

Area	PSO	الگوریتم ژنتیک
A1	-21.19	-21.19
A2	-56.2	-56.2
A3	80.11	80.11
A4	-94.03	-94.03
A5	402.37	402.37
کل شبکه	311.05	311.05

۵-۴- مقایسه با حالت متمرکز

در این بخش، جهت صحت‌سنجی روش پیشنهادی، نتایج آن با نتایج حالت متمرکز (یعنی حالتی که کل شبکه توسط یک ناحیه کنترل می‌شود) مقایسه شده است. در حالت متمرکز، کل شبکه‌ی توزیع فعال چند ناحیه‌ای توسط ناحیه یک ناحیه (A1) برنامه‌ریزی می‌شود. مدل متمرکز به دلیل نقض حریم خصوصی نواحی مختلف قابلیت بکارگیری در شبکه‌های چند ناحیه‌ای واقعی را ندارد ولی به دلیل دستیابی به پاسخ بهینه در بسیاری از مقالات مانند [۲۶] به عنوان شاخص ارزیابی روش‌های غیرمتمرکز در نظر گرفته می‌شود. برنامه‌ریزی بازیابی در حالت متمرکز با استفاده از مدل متمرکز (Centralized) ارائه شده در مرجع [۲۸] شبیه‌سازی شده و با استفاده از حل‌کننده‌ی MOSEK [۳۱] حل شده است. ساختار به دست آمده از روش متمرکز، در شکل (۱۳) ترسیم شده و جزئیات هزینه‌های بهره‌برداری مرتبط با آن در جدول (۹) داده شده است.

- Events", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 8(2), pp. 152-163 (2020).
- [13] m. alizadeh, m. jafari, and m. shahabi, "Resiliency improvement of distribution network considering the charge/discharge management of electric vehicles in parking lots through Bi-level optimization approach", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 19(4), pp. 195-211 (2022).
- [14] S. Ghasemi, and J. Moshtagh, "Distribution system restoration after extreme events considering distributed generators and static energy storage systems with mobile energy storage systems dispatch in transportation systems", *Applied Energy*, 310(pp. 118507 (2022).
- [15] H. Nosratpoor, and A. Zanganeh, "Optimal Self-healing of Smart Distribution Grids Based on Spanning Trees to Improve System Reliability", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 16(1), pp. 91-101 (2019).
- [16] S. Behnampour, M. R. Haghifam, A. Akhavein, et al., "Decentralized restoration of distribution network using a multi-agent system", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 19(1), pp. 237-244 (2022).
- [17] M. Khederzadeh, "A Decentralized Technique for Autonomous Distribution Network Restoration in Presence of Coupling Neighboring Microgrids", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 19(1), pp. 213-225 (2022).
- [18] S. Sanaei, M.-r. Haghifam, and A. Safdarian, "Smart load shedding and distributed generation resources rescheduling to improve distribution system restoration performance", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 19(4), pp. 241-254 (2022).
- [19] A. Jalilian, B. Taheri, and A. Safdarian, "Optimal Allocation of Human and Mobile Energy Resources in Fault Management of Power Distribution Systems", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 19(1), pp. 43-51 (2022).
- [20] M. Soleimani, and H. Mohammadnezhad Shourkaei, "Restoration in Active Electrical Distribution Systems for Reduction of Customers Financial Losses", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 18(2), pp. 131-138 (2021).
- [21] M. A. Igder, and X. Liang, "Service Restoration Using Deep Reinforcement Learning and Dynamic Microgrid Formation in Distribution Networks", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(5), pp. 5453-5472 (2023).
- [22] Z. Li, Y. Xu, P. Wang, et al., "Restoration of a Multi-Energy Distribution System With Joint District Network Reconfiguration via Distributed Stochastic Programming", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(3), pp. 2667-2680 (2024).
- [23] V. Vita, G. Fotis, C. Pavlatos, et al., "A New Restoration Strategy in Microgrids after a Blackout with Priority in Critical Loads", *Sustainability*, 15(3), pp. 1974 (2023).
- [24] M. M. Hosseini, L. Rodriguez-Garcia, and M. Parvania, "Hierarchical Combination of Deep Reinforcement Learning and Quadratic Programming for Distribution System Restoration", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 14(2), pp. 1088-1098 (2023).
- [25] H. Bastami, M. R. Shakarami, and M. Doostizadeh, "A decentralized cooperative framework for multi-area active distribution network in presence of inter-area soft open points", *Applied Energy*, 300(pp. 117416 (2021).

تقاضای بار و همچنین تولید منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده است. مدلسازی این عدم قطعیت‌ها و همچنین مدلسازی انرژی رزرو در نواحی مختلف در هنگام بازیابی شبکه‌ی توزیع فعال چند ناحیه‌ای در ادامه‌ی کار این مقاله پیشنهاد می‌شود. همچنین، ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع فعال چند ناحیه‌ای با در نظر گرفتن حریم خصوصی نواحی مختلف و مبادلات رخ به رخ توان در ادامه‌ی کار این مقاله پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

- [1] A. Gholami, T. Shekari, M. H. Amirioun, et al., "Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience", *IEEE Access*, 6(pp. 32035-32053 (2018).
- [2] M. H. Amirioun, A. Dadashzadeh, M. mottaghizadeh, et al., "Prioritizing Resilience Enhancement Measures for Electric Distribution Networks Against Hurricanes", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 19(4), pp. 213-221 (2022).
- [3] M. Karimi, S. Najafi Ravadanegh, and M. Haghifam, "A Planning Framework for Resilient Distribution Networks against Natural Disasters", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 18(2), pp. 119-129 (2021).
- [4] M. Mehri Arsoon, and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Peer-to-peer energy bartering for the resilience response enhancement of networked microgrids", *Applied Energy*, 261(pp. 114413 (2020).
- [5] Y. Gilasi, S. H. Hosseini, and H. Ranjbar, "Resiliency-oriented optimal siting and sizing of distributed energy resources in distribution systems", *Electric Power Systems Research*, 208(pp. 107875 (2022).
- [6] V. B. Venkateswaran, D. K. Saini, and M. Sharma, "Techno-economic hardening strategies to enhance distribution system resilience against earthquake", *Reliability Engineering & System Safety*, 213(pp. 107682 (2021).
- [7] M. Haghshenas, R.-A. Hooshmand, and M. Gholipour, "Power distribution system resilience enhancement planning against extreme dust storms via pre- and post-event actions considering uncertainties", *Sustainable Cities and Society*, 78(pp. 103626 (2022).
- [8] M. H. Amirioun, F. Aminifar, and H. Lesani, "Resilience-Oriented Proactive Management of Microgrids Against Windstorms", *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(4), pp. 4275-4284 (2018).
- [9] H. Haggi, W. Sun, J. M. Fenton, et al., "Proactive Rolling-Horizon-Based Scheduling of Hydrogen Systems for Resilient Power Grids", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(2), pp. 1737-1746 (2022).
- [10] H. Wu, Y. Xie, Y. Xu, et al., "Robust coordination of repair and dispatch resources for post-disaster service restoration of the distribution system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136(pp. 107611 (2022).
- [11] Z. Li, W. Tang, X. Lian, et al., "A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135(pp. 107497 (2022).
- [12] S. Ghasemi, A. Khodabakhshian, and R. Hooshmand, "Active Distribution Networks Restoration after Extreme

- [26] H. Bastami, M. R. Shakarami, and M. Doostizadeh, "A non-hierarchical ATC framework for parallel scheduling of active distribution network with multiple autonomous microgrids", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 133(pp. 107293 (2021).
- [27] M. H. Hemmatpour, and M. h. Rezaeian koochi, "A Multi-Objective Reconfiguration Scheme for Reliability and Energy Usage Enhancement of Distribution Systems in the Presence of Wind Turbines Using the MOHSA Optimization Algorithm", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, 12(4), pp. 13-30 (2021).
- [28] H. Bastami, M. R. Shakarami, and M. Doostizadeh, "Optimal scheduling of a reconfigurable active distribution network with multiple autonomous microgrids", *Electric Power Systems Research*, 201(pp. 107499 (2021).
- [29] J. Lofberg, "YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB" presented at the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508).(2004).
- [30] S. Nickel, C. Steinhardt, H. Schlenker, et al., "IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.9," in *Angewandte Optimierung mit IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*: Springer, 2020, pp. 9-23.
- [31] A. Mosek, "The MOSEK optimization software", Online at <http://www.mosek.com>, 54(2-1), pp. 5 (2010).

زیر نویس ها

¹ Distributed Energy Resource