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

حکمت بیرانوندی1، دانشجو دکتری، امین سامان فر2 استادیار، میثم دوستی زاده 3 دانشیار، رضا ساکی 4 استادیار

1. گروه برق دانشکده فنی و مهندسي- واحد خرم­آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- خرم آباد- ايران

H.beyranvand@khoiau.ac.ir

1. گروه برق دانشکده فنی و مهندسي- واحد خرم­آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- خرم آباد- ايران– a.samanfar@khoiau.ac.ir
2. گروه برق دانشکده فنی و مهندسي- دانشگاه لرستان- خرم آباد- ايران– doostizadeh.m@lu.ac.ir
3. گروه برق دانشکده فنی و مهندسي- واحد درود- دانشگاه آزاد اسلامی- درود- ايران– Re.saki@iau.acir

چكيده: 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 5 ناحیه‏ای 33 شینه IEEE شبیه‏سازی شده که نتایج به دست آمده کارایی آن را نشان می‏دهند.

واژه هاي كليدي: شبکه‏ی توزیع فعال، بازیابی شبکه، مبادلات رخ به رخ توان، بلایای طبیعی.

نوع مقاله: پژوهشی

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

Hekmat Beyranvandi1, PHD Candidate, Amin Samanfar2, Assistant Professor, Meysam Doostizadeh 3, Associate Professor, Reza Saki4, Assistant Professor

1 Department of Electrical Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

H.beyranvand@khoiau.ac.ir

2 Department of Electrical Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

a.samanfar@khoiau.ac.ir

3 Department of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

[doostizadeh.m@lu.ac.ir](mailto:doostizadeh.m@lu.ac.ir)

4 Department of Electrical Engineering, Doroud Branch, Islamic Azad University, Doroud, Iran

Re.saki@iau.acir

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 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.

تاریخ ارسال مقاله : -/-/1402

تاریخ پذیرش مقاله : -/-/1402

نام نویسنده­ی مسئول : دکتر امین سامان فر

نشانی نویسنده­ی مسئول : ایران – خرم آباد – دانشگاه آزاد اسلامی – واحد خرم آباد– گروه برق دانشکده­ی فنی و مهندسی

# مقدمه

در پی تغییرات آب و هوایی، فراوانی و شدت بلایای طبیعی افزایش بی‏سابقه‏ای یافته است. طوفان‏های هاروی (Harvey)، ایرما (Irma) و ماریا (Maria) [1] 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 [2]. بلایای طبیعی خسارات سنگینی به سیستم‏های توزیع و شبکه انتقال برق وارد می‏کنند. در شکل (1) بخشی از اثرات مخرب سیل در شبکه توزیع برق در شهرستان پلدختر نشان داده شده است.



شکل (1): بخشی از خسارات وارده به شبکه توزیع برق پلدختر در اثر سیل

در طول سال‏های 2003 تا 2012، به دلیل رویدادهای آب و هوایی تقریباً 679 قطعی برق در ایالات متحده رخ داده که 80 تا 90 درصد این قطعی‏ها ناشی از خرابی سیستم‏های توزیع بوده است [1].

مفهوم تاب آوری شبکه‏ی توزیع و نقش هر کدام از عوامل مؤثر بر آن در [3] 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 [4]. در اقدامات سرمایه‏گذاری محور، با نصب تجهیزات جدید مانند منابع انرژی توزیع شده [5] و ذخیره‏سازهای انرژی الکتریکی [6] و یا تقویت خطوط و پست‏های توزیع [7]، 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 [8] 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 [9] 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 پایین‏تر 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 [4]. در [10] 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 [11] 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 [12] ارائه شده است. افزایش تاب آوری شبکه توزیع با استفاده از ظرفیت خودروهای برقی در ایستگاه‏های شارژ در [13] بررسی شده است. در [14] 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 [15] 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 تراکنش های انرژی میان نهادهای مستقل مختلف، مانند شبکه توزیع و ریزشبکه‏ها را در هنگام بازیابی مدلسازی کند.

در [16]، 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 [17]، 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 [18]، یک روش دو لایه برای بازیابی بار در شبکه توزیع پس از وقوع یک خطای دائمی ارائه شده است. در لایه‏ی 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 برنامه­ ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط نامحدب 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 [19] 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 [20]، یک روش بازیابی بر اساس مفهوم زمان مصونیت برای بازیابی بارهای شبکه ارائه شده است. در این مقاله، اثر کلیدهای سکسیونر و سکشنلایزر در کنار منابع تجدیدپذیر بر میزان بار بازیابی شده بررسی شده است. با این حال، بهینگی این روش تضمین نمی‏شود.

در [21]، 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 تاب آورانه برای شبکه‏های توزیع چند انرژی بر اساس تغییر آرایش شبکه‏های انرژی و بازیرنامه‏ریزی آن‏ها در [22] پیشنهاد شده است. در [23] 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 راه‏انداری منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است. یک مدل ترکیبی سلسله مراتبی از یادگیری تقویتی عمیق و برنامه ریزی درجه دوم برای بازیابی سیستم توزیع پس از قطعی‌های عمده در [24] 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 [25]. 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 [26]، 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 (1)، 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 (1): مقایسه مطالعات صورت گرفته در زمینه‏ی بازیابی سیستم توزیع

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| مرجع | روش | نوع | مدلسازی شبکه توزیع | بازار مبادلات انرژی درون شبکه‏ای | حفظ حریم خصوصی نواحی |
| [8] | یک چارچوب پیشگیرانه برای مقابله با اثرات نامطلوب طوفان‌های شدید | متمرکز | پخش بار AC | خیر | خیر |
| [9] | یک چارچوب پیشگیرانه دو سطحی جهت افزایش تاب آوری شبکه‏های برق | غیرمتمرکز | پخش بار AC | خیر | خیر |
| [10] | یک رویکرد بازسازی برای بیشینه کردن بار بازیابی شده | متمرکز | پخش بار AC | خیر | خیر |
| [11] | بازیابی شبکه‏ی توزیع پس از بلایای طبیعی در حضور منابع سیار انرژی | متمرکز | پخش بار AC | خیر | خیر |
| [15] | افزایش قابلیت خودترمی شبکه توزیع هوشمند پس از وقوع خطا | متمرکز | پیشرو-پسرو | خیر | خیر |
| [17] | یک روش بازیابی غیرمتمرکز مبتنی بر سیستم‌های چند عامله برای شبکه‏های توزیع فعال متصل به چند ریزشبکه | غیرمتمرکز | پیشرو-پسرو | خیر | خیر |
| [19] | یک مدل بازیابی برای برنامه­ریزی هماهنگ تیم­های تعمیر و عملیات، ناوگان منابع تولیدی سیار و اتوماسیون توزیع | متمرکز | پخش بار AC | خیر | خیر |
| [21] | یک روش بازیابی شبکه مبتنی بر تشکیل ریزشبکه پویا با استفاده از یادگیری تقویتی عمیق | متمرکز | پخش بار AC خطی | خیر | خیر |
| [22] | یک رویکرد بازیابی تاب آورانه برای شبکه‏های توزیع چند انرژی | متمرکز | پخش بار AC خطی | خیر | خیر |
| [23] | یک تکنیک بازیابی با استفاده از تولید پراکنده برای بهبود انعطاف‌پذیری سیستم توزیع | متمرکز | پخش بار AC خطی | خیر | خیر |
| [24] | یک مدل ترکیبی سلسله مراتبی از یادگیری تقویتی عمیق و برنامه ریزی درجه دوم برای بازیابی سیستم توزیع | متمرکز | پخش بار AC | خیر | خیر |
| روش پیشنهادی | بازیابی شبکه توزیع فعال چند ناحیه‏ای با بهره‏گیری از تبادلات رخ به رخ توان | غیرمتمرکز | پخش بار AC | بله | بله |

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.

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 شبیه سازی و نتیجه‏گیری مقاله آورده شده‏ است.

# شبکه‏ی توزیع فعال چند ناحیه‏ای

در شکل (2) یک شبکه‏ی توزیع فعال چند ناحیه‏ای شامل 4 ناحیه مستقل با نام‏های "ناحیه یک" الی "ناحیه چهار" نشان داده شده است.

**(الف)**



(ب)

شکل (2): آرایش شبکه‏ی توزیع فعال چند ناحیه‏ای در حالت الف) اتصال به شبکه بالادست ب) جزیره‏ای

در این شبکه، هر ناحیه یک محدوده‏ی مشخص دارد که با یک رنگ منحصر به فرد در شکل ترسیم شده است. هر ناحیه می‏تواند دارای مشترکین محلی و منابع انرژی توزیع شده (DER)[[1]](#endnote-1) 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 شده‏اند و از ذخیره‏سازهای انرژی صرف‏نظر شده است. هر کدام از این نواحی یک نهاد مستقل هستند که با هدف بیشینه سازی سود ناحیه خود برنامه‏ریزی می‏شوند. در شرایط عادی که شبکه بالادست برق‏دار است، هر ناحیه به شبکه‏ی بالادست متصل است که این اتصال در قسمت (الف) شکل (2) نشان داده شده است. هنگام بی­برق شدن شبکه بالادست، ریزشبکه‏ها می‏توانند در حالت جزیره‏ای کار کنند و یا با استفاده از خطوط مانور به یکدیگر متصل شوند که این حالت در قسمت (ب) شکل (2) نشان داده شده است. با این حال، بعد از وقوع بلایای طبیعی مانند طوفان، ممکن است علاوه بر بی­برق شدن شبکه‏ی بالادست، برخی از خطوط توزیع و DERهای موجود در شبکه‏ی توزیع فعال چند ناحیه‏ای آسیب ‏ببینند. در چنین شرایطی، نواحی موجود در شبکه می‏توانند با استفاده از DERهای باقی‏مانده 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 (3) بخشی از یک شبکه‏ی توزیع فعال چندناحیه‏ای را بعد از وقوع یک بلای طبیعی نشان می‏دهد. در این شبکه DER شماره 4 و خطوط توزیع 1-2 و 6-7 آسیب دیده و از سرویس خارج شده‏اند. در این حالت، DER شماره 7 که در ناحیه‏ی 2 قرار گرفته نمی‏تواند بارهای آن ناحیه را تأمین کند. در چنین شرایطی با تغییر آرایش شبکه می‏توان زمینه‏ی انجام معاملات رخ به رخ میان نواحی مجاور را فراهم نمود. به عنوان مثال، با ورود خط مانور 7-9، ناحیه‏ی 2 می‏تواند با فروش توان به ناحیه 3 بخشی از توان مورد نیاز مشترکین واقع در شین‏های 8 و 10 را تأمین نماید. با این حال، خط مانور 3-8 نیز می‏تواند مشترکین ناحیه 3 را به DER3 متصل کند.



شکل (3): استفاده از DERها برای بازیابی شبکه توزیع فعال چند ناحیه‏ای بعد از وقوع بلایای طبیعی

بنابراین، ناحیه‏ی 3 می‏تواند با خرید توان از نواحی 1 و 2 توان مورد نیاز مشترکین قرار گرفته در شین‏های 8 و 10 خود را تأمین کند. با این حال، آسیب وارد شده به DER4 و همچنین خروج خط توزیع 6-7 باعث شده که ناحیه‏ی 2 نتواند از هیچ‏کدام از DERهای خود جهت تأمین بارهای محلی خود استفاده کند. این ناحیه می‏تواند برای تأمین مشترکین شماره 5 و 6 از طریق خط مانور 2-4 از ناحیه 1 توان خریداری کند. در مبادلات رخ به رخ توان میان نواحی مختلف، علاوه بر ساختار شبکه باید قیود بهره‏برداری در نظر گرفته شوند. در ادامه، ابتدا مدل برنامه‏ریزی محلی هر ناحیه بیان شده، سپس روش دو مرحله‏ای پیشنهادی جهت بازیابی بهینه شبکه ارائه خواهد شد.

# مدل برنامه‏ریزی محلی

در این بخش، یک مدل محلی برای تعیین برنامه‏ریزی کوتاه مدت یک ناحیه با در نظر گرفتن انواع تراکنش‏های انرژی و انواع DERها ارائه شده است. از آنجایی که هر ناحیه به صورت یک سازمان یا نهاد مستقل برنامه‏ریزی می‏شود، جزئیات برنامه‏ریزی آن ناحیه از دید سایر نواحی پنهان است. بنابراین، یک ناحیه به مدل برنامه‏ریزی و داده‏های خصوصی سایر نواحی دسترسی ندارد و تنها به اطلاعات ناحیه خود دسترسی دارد. مدل برنامه‏ریزی ناحیه *m*ام با هدف بیشینه شدن سود این ناحیه در قالب یک مدل بهینه‏سازی محدب در (1) فرمول بندی شده که در آن جهت نمایش متغیّرها و پارامترهای خصوصی آن ناحیه از بالانویس استفاده شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

اندیس بازه‏ی زمانی و مجموعه‏ی کل بازه‏های زمانی موجود در افق برنامه‏ریزی است. سود ناحیه ام در بازه‏ی زمانی ام، مجموع سود آن ناحیه در کل افق برنامه‏ریزی و بردار متغیّرهای تصمیم‏گیری مربوط به ناحیه ام می‏باشند. لازم به ذکر است، در مدل پیشنهادی، برای تأکید بر خصوصی بودن متغیّرها و پارامترهای مرتبط با ناحیه ام، از بالانویس در نامگذاری پارامترها و متغیّرهای مربوط به آن ناحیه استفاده شده است. به عنوان مثال، و جزو داده‏های خصوصی این ناحیه هستند که تنها ناحیه به آن دسترسی دارد.

سود ناحیه ام در گام زمانی ام () در رابطه‏ی (2) به صورت اختلاف میان مجموع درآمد ناحیه ام منهای مجموع هزینه‏های آن تعریف شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

که و به ترتیب درآمد حاصل از فروش برق به مشترکین و نواحی دیگر، هزینه‏ی خرید توان از نواحی دیگر موجود در شبکه توزیع فعال چند ناحیه‏ای، هزینه‏ی تولید میکروتوربین‏های محلی موجود در ناحیه ام، هزینه‏ی حذف بار و هزینه تلفات توان در بازه‏ی زمانی ام هستند که در روابط (3) الی (8) تعریف شده‏اند.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |
| (4) |  |
| (5) |  |
| (6) |  |
| (7) |  |
| (8) |  |

طول هر بازه زمانی برنامه‏ریزی، قیمت فروش برق به مشترک ام در زمان ام، تقاضای توان مشترک ام، قیمت فروش برق به ناحیه‏ی ام، توان انتقال یافته از ناحیه‏ی ام به ناحیه‏ی ام، اندیس میکروتوربین، مجموعه‏ی میکروتوربین‏های موجود در ناحیه‏ی ام، ، و ضرایب تابع هزینه‏ میکروتوربین ام، میزان توان اکتیو تولید شده توسط میکروتوربین ام، قیمت خرید برق از ناحیه‏ی *a*ام توسط ناحیه *m*ام در گام زمانی ام، توان اکتیو انتقال یافته از ناحیه ام به ناحیه ام در گام زمانی ام، و به ترتیب اندیس و مجموعه‏ی تمام مشترکین توزیع واقع در ناحیه‏ی ام، باز حذف شده مشترک *L*ام در ناحیه *m*ام در گام زمانی ام، جریمه حذف بار مشترک ام در گام زمانی *t*ام، اندیس شاخه توزیع، مجموعه‏ی تمامی شاخه‏های واقع در ناحیه‏ی ام، مقاومت شاخه‏ی ام و مجذور دامنه‏ی جریان عبوری از شاخه‏ی ام در بازه‏ی زمانی ام می‏باشند.

محدوده‏ی تولید توان اکتیو و راکتیو میکروتوربین‏ها به ترتیب در روابط (9) و (10) بیان شده‏اند.

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |
| (10) |  |

که  و  به ترتیب حداکثر و حداقل ظرفیت تولید توان اکتیو، حداکثر توان راکتیو و  حداقل ضریب توان مجاز عملکردی میکروتوربین ام هستند. یک پارامتر باینری است که آسیب وارده به میکروتوربین ام در اثر بلایای طبیعی را بیان می‏کند. اگر میکروتوربین ام در اثر بلای طبیعی آسیب دیده باشد و در دسترس نباشد آنگاه، 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 (11) و (12) مدل شده‏اند.

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |
| (12) |  |

در این روابط، و مجموعه‏ی توربین‏های بادی و سیستم‏های فتوولتائیک موجود در ناحیه‏ی ام هستند. و دو پارامتر باینری هستند که به ترتیب آسیب وارده به توربین بادی ام و سیستم فتوولتائیک ام را نشان می‏دهند. و نشان دهنده‏ی حداکثر میزان تولید پیش‏بینی شده‏ی توربین بادی و سیستم فتوولتائیک در بازه‏ی زمانی ام و و نیز میزان تولید واقعی آن‏ها را در این بازه‏ی زمانی نشان می‏دهند.

# 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 (4) 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 (13) برای هر ساختار شبکه یک شاخص تناسب با نام محاسبه می‏شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |

که مجموع دامنه‏ی تبادلات رخ به رخ توان در بستر شبکه، شاخص تحقق قیود پخش بار شبکه و یک عدد نسبتاً بزرگ است. جزئیات مربوط به محاسبه‏ی و در سطوح دوم و سوم روش پیشنهادی تشریح خواهند شد. یک متغیّر نامنفی است و در حالتی که تمامی قیود پخش بار محقق شوند برابر صفر می‏شود.



شکل (4): فلوچارت روش پیشنهادی برای بازیابی شبکه‏ی توزیع فعال چند ناحیه‏ای.

همانگونه که از (13) قابل برداشت است، افزایش و به ترتیب موجب افزایش و کاهش شاخص می‏شوند. بنابراین، برای تحقق حداکثری مبادلات رخ به رخ همراه با رعایت قیود پخش بار، می­بایست افزایش و به صورت همزمان کاهش یابد. بر این اساس، ساختاری که بیشترین را داشته باشد به عنوان پاسخ بهینه انتخاب می‏شود (شکل (4)). لازم به ذکر است، میزان اهمیت تحقق معادلات پخش بار را کنترل می‏کند. از آنجایی که برقراری قیود پخش بار جهت اجرای نتایج الزامی است، یک عدد نسبتاً بزرگ باید در نظر گرفته شود (در این مقاله برابر 10000 فرض شده است).

## 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 (3)، مبادلات رخ به رخ توان میان ناحیه‏ی 1 و 2 به وضعیت در مدار بودن خط 2-4 و تبادلات رخ به رخ میان نواحی 2 و 3 به وضعیت خط 7-9 وابسته است. بنابراین، در مرحله‏ اول روش پیشنهادی، همانند روش‏های فراابتکاری ارائه شده در [27] 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 متغیّرهای باینری مدلسازی شده‏ که بیانگر وضعیت در مدار بودن شاخه توزیع ام در بازه‏ی زمانی ام است. در این مقاله از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای تعیین ساختار شبکه استفاده شده است. بدین صورت که بردار به عنوان کروکوزوم و هر کدام از متغیّرهای باینری () به عنوان ژن‏های سازنده‏ی آن در نظر گرفته شده‏اند. در الگوریتم ژنتیک، ابتدا کروموزوم‏های به صورت تصادفی مقداردهی می‏شوند تا جمعیت اولیه آرایش‏های شبکه را ایجاد کنند. در ادامه، میزان شایستگی هر کروموزوم‏ بر اساس شاخص در رابطه (13) 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 (4) 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 ابن مرحله، میزان شایستگی آرایش پیشنهاد شده، با محاسبه‏ی شاخص تعیین می‏شود. الگوریتم ژنتیک با بررسی آرایش‏های مختلف شبکه، در نهایت ساختاری را انتخاب می‏کند که بزرگترین شاخص را ارائه دهد.

در شکل (5) تبادل رخ به رخ توان میان دو ناحیه‏ی A و B از طریق شاخه‏ی (خط واصل شین در ناحیه به شین در ناحیه‏ی ) نشان داده شده است.



شکل (5): مبادله توان رخ به رخ میان ناحیه‏ی A و B.

همانگونه که در این شکل نمایان است، و توان‏های اکتیو و راکتیو فروخته شده به ناحیه‏ی B در بازه‏ی زمانی ام هستند. درآمد ناحیه‏ی A از فروش توان به ناحیه‏ی B با رابطه‏ی (14) محاسبه می‏شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (14) |  |

که و به ترتیب قیمت فروش توان اکتیو و راکتیو در بازه‏ی زمانی ام هستند. به طور مشابه، هزینه‏ی خرید توان از دید ناحیه‏ی B به صورت رابطه‏ی (15) مدل می‏‏شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (15) |  |

که هزینه‏ی خرید توان از ناحیه‏ی A در بازه‏ی زمانی ام است که توسط ناحیه‏ی B پرداخت می‏شود. نواحی مستقل موجود در 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 متغیّر به صورت انحصاری درج شده است (مانند و ). با این حال، برنامه‏ریزی به دست آمده برای مبادلات رخ به رخ، یعنی پاسخ متغیّرهای و جزو اطلاعات مشترک نواحی و 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 متغیّرهای بالانویس انحصاری (مانند ) 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 متغیّر ، با رابطه‏ی (16) محاسبه می‏شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (16) |  |

## 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 [25]. 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 (17) و (18) بیان شده‏اند.

|  |  |
| --- | --- |
| (17) |  |
| (18) |  |

که اندیس شین و مجموعه‏ی تمام شین‏های میان ناحیه‏ای موجود در شبکه‏ی توزیع فعال، و توان‏های اکتیو و راکتیو تزریق شده به شین jام از سمت ناحیه‏ی متصل به آن در بازه‏ی زمانی tام، مجموعه‏ی تمام شاخه‏های پایین دست و مجموعه‏ی تمام شاخه‏های بالادست متصل به شین ام، راکتانس شاخه‏ی و و نیز به ترتیب توان‏های اکتیو و راکتیو تزریق شده به شاخه‏ی از سمت شین jام در بازه‏ی زمانی ام هستند.

رابطه‏ی پخش بار میان مجذور دامنه‏ی ولتاژ دو شین و که به ترتیب در ابتدا و انتهای شاخه‏ی قرار گرفته‏اند و جریان و توان عبوری از آن شاخه در روابط (19) و (20) بیان شده است [25].

|  |  |
| --- | --- |
| (19) |  |
| (20) |  |

که و به ترتیب مجذور دامنه‏ی ولتاژ شین‏های j و k، نشان دهنده‏ی نُرم-دو بردار و مجموعه‏ی تمام شاخه‏های میان ناحیه‏ای موجود در شبکه‏ی توزیع فعال هستند. یک پارامتر نسبتاً بزرگ است که برابر 100 در نظر گرفته شده است. یک متغیّر باینری است که وضعیت در مدار بودن خط در بازه‏ی زمانی ام را کنترل می‏کند. بر اساس رابطه‏ی (19)، معادله‏ی پخش بار میان ولتاژ شین‏های ابتدا و انتهای شاخه‏ی در بازه‏ی زمانی ام (یعنی و ) و جریان و توان عبوری از این شاخه تنها زمانی که این شاخه در مدار است () در نظر گرفته می‏شود.

محدودیت‏های مرتبط با جریان مجاز شاخه‏ها و محدوده‏ی دامنه‏ی ولتاژ شین‏ها به ترتیب در روابط (21) و (22) بیان شده‏اند.

|  |  |
| --- | --- |
| (21) |  |
| (22) |  |

که مجذور جریان نامی شاخه‏ی و و 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 (23) مدلسازی شده است [28].

|  |  |
| --- | --- |
| (23) |  |

که اندیس حلقه، مجموعه‏ی تمام حلقه‏های بالقوه موجود در شبکه توزیع فعال، مجموعه‏ی شاخه‏های تشکیل دهنده‏ی حلقه ام و تعداد شاخه‏های موجود در حلقه‏ی 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 برابر باشد. در روش پیشنهادی، تبادلات توان اکتیو و راکتیو به ترتیب در روابط (24) و (25) بیان شده‏اند.

|  |  |
| --- | --- |
| (24) |  |
| (25) |  |

در این روابط، و به ترتیب توان اکتیو و راکتیو عبوری از شاخه‏ی در بازه‏ی زمانی ام هستند که و به ترتیب نشان دهنده‏ی نواحی‏ای از شبکه توزیع فعال چند ناحیه‏ای هستند که شین‏های و در آن‏ها واقع شده‏اند. به عنوان مثال، در شکل (6) و به ترتیب بیانگر نواحی و هستند.



شکل (6): مدلسازی مبادلات رخ به رخ میان دو ناحیه‏ی A و B در پخش بار شبکه در مرحله‏ دوم

، ، و متغیّرهای کمکی نامنفی هستند که برای تحقق معادلات پخش بار در مرحله‏ دوم در نظر گرفته شده‏اند. و برای افزایش و و نیز برای کاهش مقادیر توان اکتیو و راکتیو مبادله شده در نظر گرفته شده‏اند. در حالت ایده‏آل این 4 متغیّر کمکی برابر صفر هستند که نشان دهنده‏ی 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 ناحیه‏ای با فرض تحقق مبادلات رخ به رخ توان در قالب یک مسئله‏ی بهینه‏سازی مدلسازی شده است. در این راستا، یک شاخص جدید با نام در رابطه (26) تعریف شده که میزان تحقق مبادلات رخ به رخ را بیان می‏کند.

|  |  |
| --- | --- |
| (26) |  |

در این رابطه، به صورت مجموع چهار متغیّر کمکی ، ، و در تمامی بازه‏های برنامه‏ریزی تعریف شده است. اگر این متغیّرهای کمکی در تمامی گام‏های زمانی برابر صفر ‏شوند، تمامی قیود پخش بار محقق شده و نیز برابر صفر خواهد شد. بنابراین، در مرحله‏ دوم روش پیشنهادی، پخش بار شبکه در قالب یک مدل بهینه‏سازی با هدف کاهش بر اساس رابطه (27) انجام می‏شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (27) | با توجه به قیود: (17) الی (26) |

که بردار متغیّرهای پخش بار شامل ولتاژ شین‏ها، جریان، توان اکتیو و راکتیو عبوری از شاخه‏های شبکه در کلیه‏ی بازه‏های برنامه‏ریزی است.

# شبیه‏سازی و نتایج

روش دو مرحله‏ای پیشنهادی بر روی شبکه‏ توزیع فعال 5 ناحیه‏ای اصلاح شده‏ی 33 شینه‏ی IEEE در محیط MATLAB R2023b شبیه‏سازی شده است. مدل برنامه‏ریزی محلی هر کدام از نواحی با استفاده از جعبه‏ابزار YALMIP [29] مطابق مدل (1) فرمول‏بندی شده و برای حل آن از حل کننده‏ی CPLEX 12.9 [30] استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک نیز با استفاده از تابع ga برای تعیین آرایش بهینه شبکه استفاده شده است. در این بخش، برنامه‏ریزی بازیابی این شبکه توزیع فعال چند ناحیه‏ای بعد از بروز یک بلای طبیعی شدید در دو حالت با و بدون وجود مبادلات رخ به رخ میان نواحی مختلف انجام شده است.

## شبکه مورد مطالعه

شبکه‏ی توزیع اصلاح شده‏ 33 شینه‏‏ی IEEE به عنوان مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است. اطلاعات این شبکه از [28] استخراج شده است. در این شبکه، 5 ناحیه‏ی مستقل با نام‏های الی وجود دارد که در شکل (7) با رنگ‏های مجزا نشان داده شده‏اند.



شکل (7): شبکه‏ی توزیع فعال 5 ناحیه‏ای مورد مطالعه [28].

در این شبکه 9 خط مانور قرار دارد که اطلاعات آن‏ها در

جدول (2) ذکر شده و با خطوط خط چین مشکی رنگ در شکل (7) نشان داده شده‏اند. در این مقاله فرض شده که در اثر یک بلای طبیعی شاخه‏های توزیع 1-2، 6-7، 10-11، 15-16، 20-21، 3-23 و 28-29، خطوط مانور میان ناحیه‏ای 2-19 (Tie3)، 26-6 (Tie4)، 22-18 (Tie7) و 26-4 (Tie9)، میکروتوربین‏های شماره‏ی 1، 4، 7 و 9، WTهای 1، 2 و 4 و همچنین PVهای شماره‏ی 2 و 4 از مدار خارج شده‏اند که در شکل (7) با نماد ضربدر قرمز رنگ مشخص شده‏اند.

جدول (2): اطلاعات خطوط مانور

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| خط مانور | ناحیه | | شین | | وضعیت آسیب |
| ابتدا | انتها | ابتدا | انتها |
| 1 | 2 | 1 | 4 | 5 | سالم |
| 2 | 3 | 2 | 12 | 13 | سالم |
| 3 | 4 | 1 | 2 | 19 | آسیب دیده |
| 4 | 5 | 2 | 6 | 26 | آسیب دیده |
| 5 | 5 | 1 | 25 | 29 | سالم |
| 6 | 2 | 4 | 20 | 8 | سالم |
| 7 | 3 | 4 | 22 | 18 | آسیب دیده |
| 8 | 2 | 4 | 22 | 10 | سالم |
| 9 | 5 | 1 | 4 | 26 | آسیب دیده |

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

## 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 (8) نشان داده شده است.



شکل (8): دیاگرام شبکه توزیع فعال چند ناحیه‏ای در حالت اول

همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، در اثر خروج خط 4-23 و همزمان با آن از مدار خارج شدن میکروتوربین شماره یک (MT1) و توربین بادی شماره یک (WT1) امکان تغذیه بارهای موجود در شین‏های 23 الی 25 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 (9) نشان داده شده است.



شکل (9): میزان کل بار و تقاضای تأمین شده بارهای موجود در شبکه در حالت اول

بر اساس این شکل، تقاضای بار در شین‏های شماره‏ی 2 الی 4 به طور کامل توسط MT2 و PV1 تأمین شده است. با این حال، به دلیل از مدار خارج شدن خطوط 2-19 و 2-1 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 (3) آمده است.

جدول (3): هزینه‏های نواحی در حالت اول (بدون مبادلات رخ به رخ)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Area** |  |  |  |  |  |  |
| 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 |

بر اساس داده‏های ذکر شده در این جدول، به دلیل وقوع این بلای طبیعی، سود تمامی نواحی به جز ناحیه‏ی شماره‏ی 5 (A5) منفی شده است. زیرا DERهای موجود در A5 نسبت به نواحی دیگر دچار آسیب کمتری شده‏اند.

## حالت دوم: با مبادلات رخ به رخ

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



شکل (10): دیاگرام شبکه توزیع فعال چند ناحیه‏ای در حالت دوم

در این حالت، خطوط مانور شماره 1، 2، 5، 6 و 8 که با خطوط خط چین مشکی رنگ در شکل (10) ترسیم شده‏ند، وارد مدار می‏شوند. به دنبال ورود این خطوط، امکان انجام مبادلات رخ به رخ میان نواحی 5 گانه ایجاد شده و همزمان با آن تمامی قیود بهره‏برداری مانند حفظ ساختار شعاعی شبکه توزیع فعال محقق شده‏اند.

میزان بار تأمین شده در این حالت در شکل (11) نشان داده شده است. جزئیات هزینه‏ها و درآمدهای نواحی مختلف در این حالت، در جدول (4) آمده است.



شکل (11): میزان کل تقاضا بار و میزان تقاضای تأمین شده بارهای موجود در شبکه در حالت دوم

جدول (4): هزینه‏ها و درآمدهای نواحی مختلف شبکه‏ی توزیع فعال مورد مطالعه در حالت دوم (بر حسب دلار)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Area** |  |  |  |  |  |  |
| 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 5ام این جدول، هزینه‏ی حذف بار نواحی مختلف بیان شده است. مقایسه این جدول با نتایج جدول (3) نشان می‏دهد که با انجام مبادلات رخ به رخ، میزان حذف بار در تمامی نواحی کاهش یافته است. به گونه‏ای که، مجموع هزینه حذف بار بیش از 9/947 دلار کاهش یافته است.

جدول (5): 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 05/311 دلار رسیده که نسبت به حالت اول افزایش بیش از 1169 دلاری را نشان می‏دهد. این افزایش سود به دلیل انجام مبادلات رخ به رخ میان نواحی مستقل بر اساس روش دو مرحله‏ای پیشنهادی است. با انجام مبادلات انرژی، علاوه بر کاهش هزینه‏ی حذف بار، درآمد ناشی از فروش توان به مشترکین محلی نسبت به حالت اول افزایش چشمگیری یافته و از 42/875 دلار به 8/1777 دلار رسیده است. همچنین، به دلیل افزایش تولید میکروتوربین‏های محلی در حالت دوم، هزینه تولید آن‏ها در حالت دوم در مقایسه با حالت اول افزایش یافته و به 1/1112 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 (5) و جدول (6) آمده است. میزان سود نواحی مختلف در دو حالت اول و دوم در جدول (7) با هم مقایسه شده است. بر اساس داده‏های این جدول، سود تمامی نواحی در حالت دوم از حالت اول بیشتر شده است که کارایی روش بازیابی پیشنهادی را نشان می‏دهد.

به منظور نشان دادن سازگاری روش دو مرحله‏ای پیشنهادی با سایر الگوریتم‏های فراابتکاری، برنامه‏ریزی بازیابی شبکه‏ی توزیع اصلاح شده‏ 33 شینه‏‏ی IEEE با الگوریتم PSO نیز انجام شده است. از آنجایی که در این شبکه تنها 9 عدد خط ارتباطی وجود دارد، تعداد کل متغیّرهای تصمیم‏گیری برابر 9 عدد هستند که همگی آن‏ها از نوع باینری (دو دویی) می‏باشند.

جدول (6): 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 (7): 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 26 همگرا شده است. ساختار به دست آمده از این الگوریتم در شکل (12) نشان داده شده که دقیقاً مشابه نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک در شکل (10) است. همچنین، سود هر کدام از نواحی در نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و PSO در جدول (8) با هم مقایسه شده است.



شکل (12): آرایش بهینه‏ی به دست آمده از الگوریتم PSO

بر اساس 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 متغیّرهای تصمیم‏گیری مرحله اول در نظر گرفته شده‏اند. بنابراین، از دید الگوریتم فراابتکاری، متغیّرهای 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 (8): 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 |

## مقایسه با حالت متمرکز

در این بخش، جهت صحت سنجی 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 [26] 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 [28] شبیه‏سازی شده و با استفاده از حل کننده‏ی MOSEK [31] حل شده است. ساختار به دست آمده از روش متمرکز، در شکل (13) ترسیم شده و جزئیات هزینه‏های بهره‏برداری مرتبط با آن در جدول (9) داده شده است.



شکل (13): آرایش بهینه‏ی به دست آمده از روش متمرکز مرجع [28]

جدول (9): هزینه‏ها و درآمدهای شبکه‏ی توزیع فعال مورد مطالعه با روش متمرکز مرجع [28]

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Area** |  |  |  |  |  |  |
| 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 ناحیه‏ای برابر صفر شده است.

مقایسه شکل (13) با شکل (10) و جدول (9) با جدول (4) نشان می‏دهد که ساختار شبکه‏ی بازیابی شده و همچنین هزینه‏ها و درآمدهای آن در هر دو روش پیشنهادی و متمرکز [28] 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.

# 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 58/892- دلار به 05/311 دلار برساند. این نتایج گواه آن است که روش دو مرحله‏ای پیشنهادی همزمان با حفظ حریم خصوصی نواحی با زمینه سازی 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 1/1292 دلار به 16/344 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 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] Gholami A., Shekari T., Amirioun M. H. *et al.*, "Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience", *IEEE Access,* 6(pp. 32035-32053 (2018).

[2] Amirioun M. H., Dadashzadeh A., mottaghizadeh M. *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] Karimi M., Najafi Ravadanegh S., and Haghifam M., "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] Mehri Arsoon M. and Moghaddas-Tafreshi S. M., "Peer-to-peer energy bartering for the resilience response enhancement of networked microgrids", *Applied Energy,* 261(pp. 114413 (2020).

[5] Gilasi Y., Hosseini S. H., and Ranjbar H., "Resiliency-oriented optimal siting and sizing of distributed energy resources in distribution systems", *Electric Power Systems Research,* 208(pp. 107875 (2022).

[6] Venkateswaran V B., Saini D. K., and Sharma M., "Techno-economic hardening strategies to enhance distribution system resilience against earthquake", *Reliability Engineering & System Safety,* 213(pp. 107682 (2021).

[7] Haghshenas M., Hooshmand R.-A., and Gholipour M., "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] Amirioun M. H., Aminifar F., and Lesani H., "Resilience-Oriented Proactive Management of Microgrids Against Windstorms", *IEEE Transactions on Power Systems,* 33(4), pp. 4275-4284 (2018).

[9] Haggi H., Sun W., Fenton J. M. *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] Wu H., Xie Y., Xu Y. *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] Li Z., Tang W., Lian X. *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] Ghasemi S., Khodabakhshian A., and Hooshmand R., "Active Distribution Networks Restoration after Extreme Events", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering,* 8(2), pp. 152-163 (2020).

[13] alizadeh m., jafari m., and shahabi m., "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] Ghasemi S. and Moshtagh J., "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] Nosratpoor H. and Zanganeh A., "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] Behnampour S., Haghifam M. R., Akhavein A. *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] Khederzadeh M., "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] Sanaei S., Haghifam M.-r., and Safdarian A., "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] Jalilian A., Taheri B., and Safdarian A., "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] Soleimani M. and Mohammadnezhad Shourkaei H., "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] Igder M. A. and Liang X., "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] Li Z., Xu Y., Wang P. *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] Vita V., Fotis G., Pavlatos C. *et al.*, "A New Restoration Strategy in Microgrids after a Blackout with Priority in Critical Loads", *Sustainability,* 15(3), pp. 1974 (2023).

[24] Hosseini M. M., Rodriguez-Garcia L., and Parvania M., "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] Bastami H., Shakarami M. R., and Doostizadeh M., "A decentralized cooperative framework for multi-area active distribution network in presence of inter-area soft open points", *Applied Energy,* 300(pp. 117416 (2021).

[26] Bastami H., Shakarami M. R., and Doostizadeh M., "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] Hemmatpour M. H. and Rezaeian koochi M. h., "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] Bastami H., Shakarami M. R., and Doostizadeh M., "Optimal scheduling of a reconfigurable active distribution network with multiple autonomous microgrids", *Electric Power Systems Research,* 201(pp. 107499 (2021).

[29] Lofberg J., "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] Nickel S., Steinhardt C., Schlenker H. *et al.*, "IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.9," in *Angewandte Optimierung mit IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*: Springer, 2020, pp. 9-23.

[31] Mosek A., "The MOSEK optimization software", *Online at* [*http://www.mosek.com*](http://www.mosek.com)*,* 54(2-1), pp. 5 (2010).

زير‌نويس‌ها

1. ِDistributed Energy Resource [↑](#endnote-ref-1)