

برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه ریز شبکه‌های متصل به هم با استفاده از سیستم مدیریت انرژی توزیع شده

سید احسان احمدی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ نوید رضایی^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - ehsan.ahmadi@eng.uok.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - n.rezaei@uok.ac.ir

چکیده: این مقاله یک مدیریت انرژی توزیع شده انعطاف‌پذیر را برای هماهنگی بهره‌برداری ریز شبکه‌های متصل به هم پیشنهاد می‌دهد. هر کدام از ریز شبکه‌ها به‌عنوان یک واحد مستقل با اهداف محلی در نظر گرفته شده‌اند تا هزینه‌های بهره‌برداری و توان‌های مبادله شده خود را بهینه نمایند. در این مقاله فرض شده است که ریز شبکه‌های متصل به هم از طریق یک شین مشترک به هم متصل شده‌اند که می‌توانند از این طریق توان‌های الکتریکی را مبادله کنند. برای هماهنگ کردن برنامه‌ریزی بهره‌برداری این ریز شبکه‌ها، از یک الگوریتم دوسطحی استفاده شده است. سطح اول برای بهره‌برداری اقتصادی هر کدام از ریز شبکه‌ها و سطح دوم برای بهینه سازی توان‌های مبادله شده است. برنامه‌ریزی ریز شبکه‌ها با در نظر گرفتن روابط پخش بار و قیود ولتاژ در یک سیستم متصل از چند ریز شبکه در یک دوره ۲۴ ساعته شبیه سازی شده است. هم‌چنین یک نرخ جریمه برای کنترل توان‌های مبادله شده میان ریز شبکه‌ها تعیین شده است. نتایج شبیه سازی انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی، سبب افزایش کارایی و بهبود قابلیت اطمینان در هر کدام از ریز شبکه‌ها می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم مدیریت انرژی توزیع شده، ریز شبکه، منبع تولید پراکنده، توان مبادله شده.

Optimal Operational Planning of Networked Microgrids using Distributed Energy Management System

S. E. Ahmadi¹, MSc. student; N. Rezaei², Assistant professor

1- Electrical Engineering Department, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: ehsan.ahmadi@eng.uok.ac.ir

2- Electrical Engineering Department, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: n.rezaei@uok.ac.ir

Abstract: This paper proposes a flexible distributed energy management system for the coordinated operation of networked microgrids (MGs). Each MGs are considered as distinct entities with local objectives to optimize their own operation costs and power exchanges. The networked MGs are connected by a common bus, which can exchange electrical powers in this way. A two-level algorithm is used to coordinate the operational planning of these MGs. The first level is for the economic operation of each microgrids and the second level is to optimize the power exchanges. The planning of the MGs is simulated by taking into account the power flow equations and voltage constraints in a multi-MG system in a 24-hour period. A penalty price is also defined to control the power exchanges among MGs. The results of simulation indicate that using the proposed energy management system increases the performance and improves the reliability in each of the MGs.

Keywords: Distributed Energy Management System, Microgrid, Distributed Generator, Power Exchange.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸

نام نویسنده مسئول: نوید رضایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کردستان - سنندج - بلوار پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

امروزه تقاضا برای انرژی الکتریکی به‌طور مداوم در حال افزایش است. به‌منظور پاسخ‌گویی به تقاضای افزایش‌یافته، تعداد زیادی نیروگاه باید ساخته شوند. اما نیروگاه‌های سنتی دارای ضعف‌هایی از قبیل راندمان کم، تلفات بالای خطوط انتقال، زمان ساخت طولانی‌تر و قابلیت اطمینان کم‌تری هستند. از این‌رو محققان مفهوم جدیدی به نام ریزشبکه (MG) را ارائه دادند که متشکل از واحدهای تولید پراکنده (DGs) مانند توربین‌های گازی (GTs)، پنل‌های خورشیدی (PVs)، توربین‌های بادی (WTs)، ریزتوربین‌ها (MTs)، نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک و بارهای قابل کنترل به‌صورت مرتبط باهم برای تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان است [۱].

به‌منظور افزایش قابلیت‌های انعطاف‌پذیری و اطمینان، می‌توان از ریزشبکه‌های متصل به هم^۱ استفاده کرد. اتصال ریزشبکه‌ها به صورت متصل به هم کنترل پخش بار و جزیره‌سازی به‌مراتب بهتری را نسبت به ساختار تک ریزشبکه‌ای فراهم می‌کند [۲]. همچنین استفاده بهینه از منابع توزیع‌شده انرژی (DERs) در هر ریزشبکه و انتقال توان پشتیبانی به شبکه بالادست و یا دیگر ریزشبکه‌ها که توانایی تأمین تقاضای خود را ندارند، از ویژگی‌های بااهمیت شبکه‌های شامل چند ریزشبکه است؛ به عبارت دیگر، زمانی که ریزشبکه‌ها کمبود توان دارند، می‌توانند از گزینه‌های موجود برای جبران تقاضای مصرف‌کنندگان خود بهره‌مند شوند. برای دستیابی به این مهم، روش‌هایی از قبیل پیاده‌سازی سیستم مدیریت انرژی (EMS) قدرتمند و توزیع مناسب توان در شبکه‌های هوشمند مورد نیاز است [۳].

برای درک بهتر قابلیت‌های ریزشبکه‌ها از قبیل افزایش قابلیت‌های انعطاف‌پذیری و اطمینان، بهبود کیفیت توان و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، سیستم مدیریت انرژی ارائه شده است. این سیستم با در نظر گرفتن عمل کرد بهینه منابع موجود در ریزشبکه و شبکه توزیع بالادست، موجب مدیریت بهتر تقاضای مصرف‌کنندگان در شرایط مختلف می‌شود. ریزشبکه‌ها دارای یک ساختار کنترلی با مدیریت متمرکز^{۱۱} و یا توزیع‌شده^{۱۲} در سمت ولتاژ پایین هستند که توانایی بهره‌برداری در هر دو حالت متصل به شبکه^{۱۳} و جدا از شبکه^{۱۴} را دارا می‌باشند [۴].

علی‌رغم دو وضعیت بودن ریزشبکه‌ها، بیش‌تر تمرکز مسائل مربوط به بهره‌برداری ریزشبکه در وضعیت متصل به شبکه قرار دارد؛ زیرا بیش‌ترین زمان بهره‌برداری ریزشبکه‌ها، در این حالت انجام می‌شود و عمدتاً به کاربردن روش‌های بهینه و اقتصادی ضروری هستند. از طرف دیگر، به دلیل وجود عدم قطعیت‌های منابع توزیع‌شده انرژی (طبیعت گذرا و غیردائمی)، وجود تغییرات زیاد بار مصرفی و وقوع اختلال‌های با تأثیر زیاد و احتمال کم در ریزشبکه‌ها، امکان به وجود آمدن انحراف‌های زیادی در ولتاژ و فرکانس وجود دارد؛ از این‌رو تحلیل ریزشبکه‌ها در حالت جزیره‌ای نیز در کنار حالت بهره‌برداری نرمال و متصل به شبکه دارای اهمیت است [۵، ۶].

۱-۱- مروری بر کارهای پیشین

در کارهای پیشین، انواع مدل‌های مدیریت ریزشبکه‌ها بررسی شده‌اند که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند؛ اما به‌طور کلی روش توزیع‌شده نسبت به روش متمرکز دارای ویژگی‌های مطلوب‌تری بوده و ایراد اصلی روش متمرکز را می‌توان در انعطاف‌پذیری کم هنگام اضافه‌نمودن اجزای جدید به مدل و حجم بالای محاسبات دانست [۷].

مطالعه‌های بسیاری در زمینه‌ی به‌کارگیری سیستم مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها صورت گرفته است. رستگار و همکاران [۸]، با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی احتمالی، یک چهارچوب جدید را برای مدیریت انرژی خانه در قالب یک مرکز انرژی^{۱۵} مبتنی بر منابع تجدیدپذیر ارائه دادند. در چهارچوب پیشنهادی، مبدل‌های انرژی و ذخیره‌سازهای مختلف مانند خودروهای الکتریکی هیبریدی، یک واحد ذخیره گرمایی، پنل‌های خورشیدی و لوازم خانگی در این مرکز انرژی در نظر گرفته شده‌اند. هایز و همکاران [۹]، کاربرد داده‌های اندازه‌گیری شده پیشرفته را برای توسعه پیش‌بینی انرژی و خدمات برنامه‌ریزی بهره‌برداری در شبکه‌های توزیع متشکل از منابع عمده انرژی توزیع‌شده و استفاده آن در سیستم مدیریت انرژی شبکه توزیع پیشنهاد دادند.

عزیزی‌واحد و همکاران [۱۰]، یک رویکرد جدید مبتنی بر مدیریت انرژی چندهدفه را برای بهره‌برداری بهینه شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و سیستم ذخیره انرژی باتری معرفی کردند. برای حل مسئله مدیریت انرژی چندهدفه، یک الگوریتم تکاملی پیشرفته ترکیبی پیشنهاد شد. ژوو و همکاران [۱۱]، یک سیستم مدیریت انرژی دولایه مبتنی بر پیش‌بینی را برای ریزشبکه‌های متشکل از سیستم ذخیره‌سازی انرژی شامل باتری‌ها و ابرذخیره‌کننده‌ها ارائه دادند. هزینه‌های بلندمدت باتری‌ها و ابرذخیره‌کننده‌ها مدل‌سازی و به هزینه‌های کوتاه‌مدت مرتبط با بهره‌برداری زمان واقعی مبدل شد.

یو و همکاران [۱۲]، یک الگوریتم بهینه‌سازی را برای برنامه‌ریزی مصرف چندین خانه هوشمند همراه با منابع توزیع‌شده انرژی پیشنهاد دادند. در رویکرد پیشنهادی، مسئله بهینه‌سازی متمرکز برای مدیریت انرژی خانه به یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی تقسیم شد که سطح اول و دوم به ترتیب مربوط به سیستم مدیریت انرژی محلی و سراسری خانه هستند. رضائی و همکاران [۱۳]، یک سیستم مدیریت انرژی مقاوم را برای ریزشبکه‌های جزیره‌ای پیشنهاد دادند که به‌طور هم‌زمان مدل استاتیکی سیستم فرکانسی نیز در نظر گرفته شده است. در این سیستم به‌منظور بررسی یک ساختار مدیریت رزرو سلسله‌مراتبی مقاوم برای انرژی و فرکانس، مسئله به یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح مبدل شد.

یین و همکاران [۱۴]، یک مدیریت انرژی غیرمتمرکز زمان واقعی را برای سیستم ترکیبی انرژی ارائه دادند که این سیستم نسبت به تغییر ناگهانی در ساختار شبکه از قبیل خرابی دستگاه‌های خاص سازگار است. مسئله مدیریت انرژی نیز به‌صورت یک مدل رقابتی غیرتعاقبی تعریف شد. در مطالعات فوق، فقط ارتباط مراکز انرژی و

به صورت یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی شد که در آن ریزشبه‌ها بر اساس اولویت‌های از پیش تعیین شده با هم در ارتباط هستند. جادو و همکاران [۲۲]، یک روش جدید را برای به اشتراک گذاری منصفانه و پایدار انرژی در میان ریزشبه‌های متصل به هم با کم‌ترین اطلاعات دریافتی از شبکه بالادستی پیشنهاد دادند. نوآوری‌های این روش پیشنهادی در به کارگیری آن در سطح فروشندگان و معرفی یک مکانیزم جدید قیمت‌گذاری است.

در تمام کارهای انجام شده برای بهره‌برداری عادی ریزشبه‌های متصل به هم، فقط از مدیریت متمرکز استفاده شده است و هدف آن‌ها تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان به اقتصادی‌ترین شکل ممکن بوده است. به منظور پوشش خلأ موجود و ارتقاء سیستم مدیریت انرژی در کارهای پیشین، به ویژه مرجع [۲۰]، این مقاله برای مدیریت بهینه تولید و توان مبادله شده میان ریزشبه‌های متصل به هم در حالت بهره‌برداری عادی، یک مدیریت توزیع شده انعطاف‌پذیر را پیشنهاد داده است. در ادامه به نوآوری‌های این مقاله اشاره شده است.

۱-۲- نوآوری‌های مقاله

این مقاله، یک ساختار انعطاف‌پذیر را برای بهره‌برداری بهینه ریزشبه‌های متصل به هم ارائه می‌دهد؛ ساختاری که چندین ریزشبه از طریق یک شین مشترک به صورت فیزیکی به هم متصل شده‌اند. به منظور تبادل اطلاعات و کنترل هماهنگ، ریزشبه‌ها از طریق یک شبکه ارتباطی (مخابراتی) و یک سیستم مدیریت انرژی توزیع شده با هم در ارتباط هستند. بهره‌برداری هر ریزشبه به صورت مستقل خواهد بود. منابع تولید پراکنده غیر قابل برنامه‌ریزی مانند توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی نیز مطابق مرجع [۲۰] به صورت مشخصه‌های پیش‌بینی شده در بازه ۲۴ ساعت لحاظ شده‌اند. تمرکز این مقاله بر ارائه مدل مدیریتی توزیع شده بهینه برای ریزشبه‌ها با لحاظ کردن قیود مربوط به کنترل ولتاژ است.

نوآوری‌های این مقاله به صورت موردی به شرح زیر هستند:

- این مقاله یک الگوریتم مدیریت دوسطحی توزیع شده انعطاف‌پذیر را برای هماهنگی بهره‌برداری ریزشبه‌ها پیشنهاد داده است که سطح اول برای بهره‌برداری اقتصادی هر کدام از ریزشبه‌ها و سطح دوم برای بهینه‌سازی توان‌های مبادله شده میان ریزشبه‌ها تعیین شده‌اند.
- محدودیت‌های پخش بار و کنترل ولتاژ نیز به مدل‌سازی اضافه شده‌اند؛ این در حالی است که در مطالعه‌های پیشین مربوط به برنامه‌ریزی ریزشبه‌های متصل به هم، این محدودیت‌ها اعمال نشده‌اند و از اثرات امنیتی آن‌ها چشم‌پوشی شده است.
- برای کنترل توان مبادله شده میان ریزشبه‌ها، یک نرخ جریمه پیشنهاد شده است. این نرخ باتوجه به هزینه‌های متوسط بهره‌برداری منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی در ریزشبه‌های متصل به هم محاسبه شده است.

خانه‌های هوشمند با هم و در ارتباط با شبکه توزیع و یا یک ریزشبه لحاظ شده‌اند و مبادلات توان بین ریزشبه‌های مختلف و شبکه توزیع در حالت عمل‌کرد عادی بررسی نشده‌اند.

یک سیستم توزیع هوشمند ممکن است از چند ریزشبه تشکیل شده باشد. می‌توان نشان داد که اتصال چندگانه‌ی ریزشبه‌ها به هم و یا با یک سیستم توزیع، می‌تواند کنترل و کارایی قدرتمندتر و قابلیت اطمینان بالاتری را در سیستم‌های توزیع هوشمند آینده ایجاد کند. بهره‌برداران شبکه توزیع و ریزشبه‌ها، می‌توانند از هزینه‌های بهره‌برداری پایین‌تر و مشتریان نیز می‌توانند از منبع توان قابل اعتمادتر و ارزان‌تری بهره‌مند شوند؛ بنابراین لازم است که اتصال چندگانه ریزشبه‌ها نیز در نظر گرفته شود [۷، ۱۵].

جوادی و همکاران [۱۶]، یک ساختار ترکیبی از عمل‌کرد بهره‌برداران بازار و شبکه توزیع را در شبکه‌ای شامل چندین ریزشبه ارائه دادند. کنترل‌کننده مورد استفاده، یک کنترل‌کننده دوسطحی سلسله‌مراتبی بوده و توانایی‌هایی این سیستم در کنترل بهینه ریزشبه‌های شامل منابع انرژی توزیع شده مورد مطالعه قرار گرفته است. فرهودی و همکاران [۱۷]، تجدید آرایش بهینه مجموعه‌ای از ریزشبه‌های متصل به هم را جهت تأمین بهینه توان شبکه برای یک دوره یک‌روزه پیشنهاد دادند. برای تمامی ریزشبه‌های متصل به شبکه اصلی و نیز جزیره‌ای شده از پخش بار بهینه برای تعیین خروجی منابع تولید پراکنده و توان‌های عبوری از خطوط ارتباطی بین ناحیه‌های ریزشبه‌ها استفاده شده و در آن‌ها قیود فنی و زیست محیطی در هر ساعت در نظر گرفته شده است.

مارواستی و همکاران [۱۸]، یک الگوریتم بهینه‌سازی سلسله‌مراتبی را برای هماهنگ کردن بهره‌برداری شبکه توزیع و چندین ریزشبه، پیشنهاد کردند. این مقاله فقط حالت متصل به شبکه را در نظر گرفت؛ به علاوه، عدم قابلیت اطمینان برای منابع تولید پراکنده و م صرف بارها، در نظر گرفته نشده‌اند. عارفی‌فر و همکاران [۱۹]، یک شاخص احتمالی را برای کنترل ولتاژها و جریان‌ها در خطوط و شین‌های سیستم توزیع چندریزشبه‌ای ارائه دادند. این شاخص برای تقسیم‌بندی بهینه سیستم توزیع به یک سیستم چندریزشبه‌ای با قابلیت اطمینان و کنترل‌پذیری بهینه تعریف شد.

وانگ و همکاران [۲۰]، یک ساختار خودترمیم را برای رخداد خطا در ریزشبه‌های متصل به هم پیشنهاد دادند و خروجی منابع تولید پراکنده در آن را با حالت بهره‌برداری نرمال مقایسه کردند. برای حالت خودترمیم از مدیریت انرژی غیرمتمرکز و برای بهینه‌سازی منابع تولید پراکنده در ریزشبه‌ها از مدیریت متمرکز استفاده شد. توان مبادله شده در ریزشبه‌ها و ضریب جریمه این توان در حالت عمل‌کرد نرمال لحاظ نشده‌اند. قیود پخش بار و ولتاژ شین‌ها نیز در این مقاله بررسی نشده‌اند. رفیعی و همکاران [۲۱]، یک روش را برای پخش توان ذخیره‌سازهای انرژی و به اشتراک‌گذاری منابع انرژی تجدیدپذیر در یک شبکه شامل ریزشبه‌های متصل به هم پیشنهاد دادند. هم‌چنین مسئله

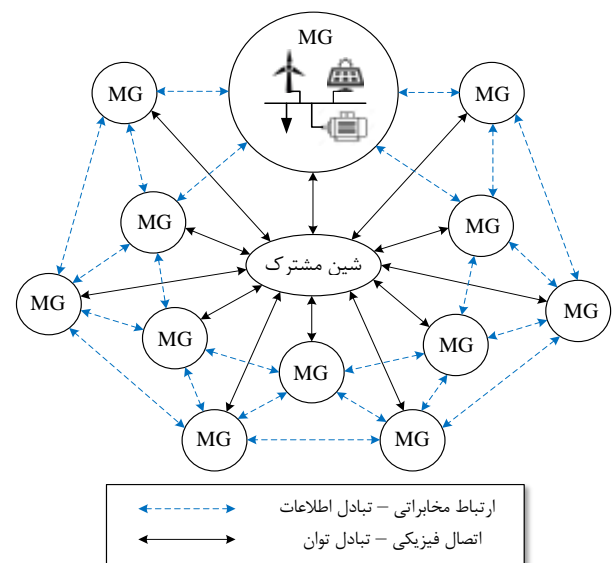
۳-۱- ساختار مقاله

در این مقاله، در بخش ۲ مفهوم پیشنهادی برای ریزشبه‌های متصل‌به‌هم و سیستم مدیریت توزیع شده ارائه می‌گردد. سپس در بخش ۳ ریزشبه‌های متصل‌به‌هم مدل سازی و فرمول‌بندی می‌شوند. در بخش ۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت، در بخش ۵ نتیجه‌گیری کلی انجام می‌شود.

۲- مفهوم ریزشبه‌های متصل‌به‌هم و مدیریت توزیع شده

شکل ۱ مفهوم ریزشبه‌های مستقل متصل‌به‌هم را نشان می‌دهد. شبکه شامل ارتباط مخابراتی بین تمام واحدها و اتصال فیزیکی از طریق یک شین مشترک برای تبادل توان محلی است. فرض بر این است که شبکه مخابراتی کاملاً متصل‌به‌هم است و حالت جزیره‌ای در آن وجود ندارد. ریزشبه‌های متصل‌به‌هم می‌توانند باتوجه به ظرفیت محلی خود، هم‌دیگر را پشتیبانی کنند. این پشتیبانی با انتقال توان محلی از یک یا چند ریزشبه به شین مشترک و تقسیم‌بندی توان باتوجه به تقاضای دیگر ریزشبه‌ها است؛ این عمل سبب افزایش قابلیت اطمینان کل شبکه می‌شود [۲۳]. جزئیات کامل‌تر در بخش ۴ مورد بحث قرار می‌گیرند.

از آنجایی که هیچ کنترل‌کننده مرکزی در ریزشبه‌ها وجود ندارد و هر ریزشبه تنها با همسایه‌های خود در ارتباط است، چالش اصلی این خواهد بود که میزان توان پشتیبانی درخواست‌شده برای هر ریزشبه در عمل کرد نرمال، اطلاع‌رسانی و پخش بار مربوطه انجام شود؛ به این ترتیب، یک پیوند ارتباطی و کنترل توزیع‌شده برای ریزشبه‌ها پیشنهاد می‌شود. چهارچوب این ارتباط را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. شبکه‌ای ارتباطی لایه‌ی بالایی و لایه‌ی پایینی. در شبکه‌ی ارتباطی لایه‌ی پایینی، برای هر ریزشبه یک سیستم مدیریت انرژی محلی به منظور برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده نصب شده است.



شکل ۱: مفهوم ریزشبه‌های متصل‌به‌هم [۲۰]

دو نوع تولید پراکنده وجود دارد: ۱- تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی مانند ریزتوربین‌ها. ۲- تولید پراکنده غیر قابل برنامه‌ریزی و مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی. شبکه‌ی ارتباطی لایه‌ی بالایی برای تبادل اطلاعات سیستم مدیریت انرژی طراحی شده است. یک کنترل‌کننده‌ی مرکزی در این لایه‌ی شبکه وجود دارد. هر سیستم در این لایه فقط با سیستم لایه‌ی پایینی همسایه خود ارتباط برقرار می‌کند. در حالت عمل‌کرد عادی، هر ریزشبه به صورت خودکار عمل می‌کند؛ یعنی هر ریزشبه به طور مستقل توان را به مشتریان خود تحویل می‌دهد، به طوری که تا حد امکان با ریزشبه‌های دیگر مبادله‌ی توان نداشته باشد. در این جا منظور از مستقل بودن این است که در هر ریزشبه توازن میان تولید منابع و مصرف بارها برقرار باشد؛ بنابراین در حالتی که ریزشبه‌ها باهم تبادل توان ندارند، لایه‌ی بالایی شبکه بدون استفاده خواهد ماند.

باتوجه به ساختار مدیریت توزیع شده، در ساعاتی که ریزشبه‌ها مایل به مبادله (خرید و فروش توان) با دیگر ریزشبه‌ها هستند و در حالتی که ریزشبه‌ها با کمبود تولید و یا ازدیاد مصرف مواجه هستند، لایه‌ی بالایی فعال شده و از طریق تبادل اطلاعات با دیگر ریزشبه‌ها، توان پشتیبانی محلی (توان خروجی از شین مشترک) را دریافت می‌کنند. دو مرحله در تبادل اطلاعات در حالت عمل‌کرد عادی ریزشبه‌ها وجود دارد: مرحله‌ی اول به روزرسانی اطلاعات عرضه و تقاضا (DSIU) و مرحله‌ی دوم تصمیم‌گیری در حالت عمل‌کرد عادی (DMNO) [۱۶]. در به روزرسانی اطلاعات عرضه و تقاضا، سیستم مدیریت انرژی در لایه‌ی پایینی، اطلاعات به دست آمده از منابع تولید پراکنده و مصرف بارها را دریافت و خروجی آن‌ها را به روزرسانی می‌کند [۲۳].

در مقایسه با روش‌های موجود، مزایای روش پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد [۷، ۱۹]:

- اگر مالکان یا بهره‌برداران ریزشبه‌ها متفاوت باشد و یا مشکلی در یک واحد به وجود آید، مدل متمرکز کارایی خود را از دست خواهد داد و ممکن است بهره‌برداری در دیگر ریزشبه‌ها اقتصادی نباشد.
- بار محاسباتی مدل توزیع شده نسبت به مدل متمرکز کم‌تر است؛ زیرا ریزشبه‌ها تنها با همسایه‌های خود در ارتباط هستند.
- از حریم خصوصی محافظت می‌شود؛ زیرا اطلاعات جمع‌آوری شده از تولید و بارها، تنها در لایه‌ی بالایی قابل مشاهده است.
- به نفع تمام ریزشبه‌ها است؛ زیرا مبادله‌ی توان محلی برای هر ریزشبه، باتوجه به ظرفیت تولیدی آن‌ها انجام می‌شود.
- قابل اعتماد و انعطاف پذیر است؛ چون که کنترل‌کننده‌ی مرکزی تنها در لایه‌ی بالایی وجود دارد.

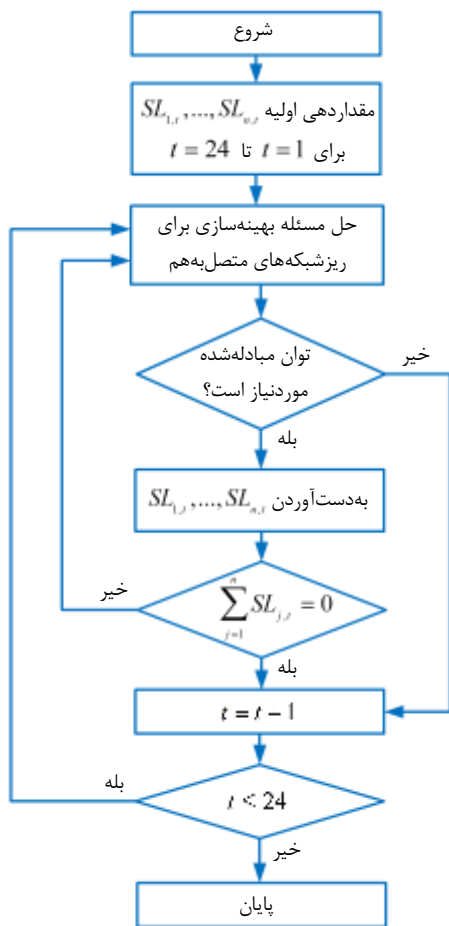
۲-۱- الگوریتم پیشنهادی برای سیستم مدیریت انرژی

می‌توان نشان داد که مسئله‌های بهینه‌سازی بزرگ را می‌توان به چندین مسئله‌ی بهینه‌سازی محلی مطابق با سیستم‌های مختلف

در هر ساعت برابر صفر شوند. در صورت برقراری این تعادل، الگوریتم به مرحله ششم می‌رود و در غیر این صورت، به مرحله دوم باز می‌گردد. انتظار می‌رود که پس از چند تکرار این شرط برقرار شود و ریز شبکه‌ها به یک مصالحه برسند.

مرحله ۶: حل مسئله در ساعت بعدی؛ با رسیدن مسئله بهینه‌سازی به جواب قابل قبول و به‌دست آوردن خروجی‌های منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی در یک ساعت، الگوریتم مجدداً (از مرحله دوم) برای ساعت‌های بعدی نیز تکرار می‌شود.

مرحله ۷: این مرحله برای اطمینان از بررسی کردن مسئله در طول بازه ۲۴ ساعت است؛ تا زمانی که مسئله بهینه‌سازی برای تمام ساعات انجام نشده باشد، این الگوریتم از مرحله دوم تکرار خواهد شد. جزئیات بیش‌تر در مورد مسئله بهینه‌سازی و نحوه تعیین نرخ مبادله توان میان ریز شبکه‌ها، در بخش (۳) توضیح داده خواهد شد.



شکل ۲: روندنمای روش پیشنهادی برای مدیریت توزیع شده ریز شبکه‌های متصل به هم

۳- مدل‌سازی و فرمول‌بندی مدیریت انرژی ریز شبکه‌ها

در این بخش، یک مدل از شبکه الکتریکی که به‌طور گسترده‌ای در مدل‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته، معرفی شده است. این مدل‌سازی، فرمول‌بندی بهینه‌سازی را برای هر یک از سیستم‌ها فراهم می‌کند.

مستقل تقسیم کرد. فرمول کلی واحد l - l در یک مسئله چندگانه می‌تواند به‌صورت رابطه (۱) تعریف شود:

$$\begin{aligned} \min_{X_l, Y_l} \quad & \mathbf{M}_l^T \mathbf{X}_l + \mathbf{N}_l^T \mathbf{Y}_l \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A}_l \mathbf{X}_l + \mathbf{B}_l \mathbf{Y}_l \leq \mathbf{K}_l \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن \mathbf{X}_l و \mathbf{Y}_l بردار متغیرهای تصمیم‌گیری واحد l - l ، \mathbf{M}_l و \mathbf{N}_l بردار ضرایب تابع هدف واحد l - l و \mathbf{A}_l ، \mathbf{B}_l و \mathbf{K}_l بردار ضرایب مربوط به قیود هستند [۲۴، ۲۵].

در این مقاله، الگوریتمی براساس الگوریتم معرفی شده در [۲۴] و مفهوم محدودسازی پیشرفته (PH)^{۱۸} [۲۶] پیشنهاد شده است. الگوریتم محدودسازی پیشرفته یک روش تجزیه و تحلیل مبتنی بر سناریو برای حل برنامه‌های آمیخته با اعداد صحیح است. از این الگوریتم بیش‌تر برای مسائل بهینه‌سازی تصادفی^{۱۹} استفاده شده است؛ اما دلایل زیادی برای استفاده از این نوع الگوریتم در مسائل بهینه‌سازی قطعی^{۲۰} نیز وجود دارد. یکی از این دلایل، استفاده در مسائل با حجم زیاد محاسبه و رسیدن به یک جواب قابل قبول است. دلیل دیگر این است که در این نوع الگوریتم، بدون تغییر در ساختار آن، می‌توان به راحتی وزن‌های مربوط در تابع هدف را تغییر داد. دلیل سوم این است که در این الگوریتم، محاسبه‌های موازی می‌توانند برای حل چندین مسئله‌ی مجزا در یک زمان انجام شوند و سرعت محاسبه را افزایش دهند [۲۷].

شکل ۲ الگوریتم مدیریت توزیع شده پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. مراحل کامل این الگوریتم به شرح زیر است:

مرحله ۱: مقداردهی اولیه متغیرهای $SL_{1,t}, \dots, SL_{n,t}$ برای زمان‌های $t = 1$ تا $t = 24$ که $SL_{j,t}$ توان مبادله شده محلی در ریز شبکه‌ی j - z در زمان t - t بهره‌برداری است.

مرحله ۲: حل مسئله بهینه‌سازی برای ریز شبکه‌های متصل به هم. در این مرحله تابع هدف، بهینه‌کردن خروجی منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی و حداقل کردن توان‌های مبادله شده محلی در هر ریز شبکه است.

مرحله ۳: بررسی نیاز به توان پشتیبانی از سایر ریز شبکه‌ها. با توجه به مدیریت توزیع شده پیشنهادی، طبیعتاً در تکرار اول تمام ریز شبکه‌ها مایل به انتقال توان (فروش توان) به دیگر ریز شبکه‌ها هستند، اما چون در تابع هدف یکی از شروط کمینه‌کردن توان مبادله شده است و هم‌چنین یک نرخ هم برای مبادله توان تعیین شده است، انتظار می‌رود که در اکثر ساعات توان محلی مبادله نشود. اگر ریز شبکه‌ها تمایل به مبادله توان داشته باشند، الگوریتم به مرحله چهارم و در غیر این صورت، به مرحله ششم می‌رود.

مرحله ۴: محاسبه کردن توان مبادله شده محلی با توجه به محدودیت‌های بهینه‌سازی؛ در این مرحله هر کدام از ریز شبکه‌ها یک مقدار توان را برای مبادله پیشنهاد می‌دهند.

مرحله ۵: بررسی تعادل میان توان‌های مبادله شده در شین مشترک؛ به‌صورتی که باید قانون KCL برقرار باشد و مجموع این توان‌ها

$$P_{i+1} = P_i + P_{i+1}^G - P_{i+1}^D \quad \forall t \quad (5)$$

$$Q_{i+1} = Q_i + Q_{i+1}^G - Q_{i+1}^D \quad \forall t \quad (6)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad \forall t \quad (7)$$

در حالت ساده، تابع هزینه هر منبع تولید پراکنده قابل برنامه ریزی مانند ریزتوربین، می تواند به صورت یک تابع درجه دوم بیان شود و معمولاً در این حالت، پاسخ مسئله را می توان از روش های ریاضی تحلیلی به دست آورد. این تابع به صورت رابطه (۸) مشخص شده است که کاربرد گسترده ای در بهره برداری سیستم های قدرت دارد.

$$F_i(P_{i,t}^G) = a_i (P_{i,t}^G)^2 + b_i (P_{i,t}^G) + c_i \quad (8)$$

که در آن، F_i تابع هزینه بهره برداری ریزتوربین i - ام، $P_{i,t}^G$ توان تولیدی ریزتوربین i - ام در زمان t - ام و a_i ، b_i و c_i ضرایب تابع هزینه بهره برداری ریزتوربین i - ام هستند [۳۱]. در این مقاله، هدف اصلی برای عمل کرد نرمال ریزشبهه های مورد مطالعه، به حداقل رساندن هزینه های بهره برداری و توان مبادله شده ی محلی است. تابع هدف اصلی برای ریز شبکه ی n - ام در ریزشبهه های متصل به هم، می تواند به صورت رابطه (۹) تعریف شود.

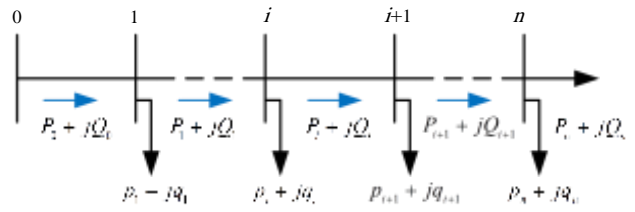
$$\min \sum_t \left(\sum_i F_i(P_{i,t}^G) + \sigma_e (SL_{n,t}^p + SL_{n,t}^q) \right) \quad (9)$$

که در آن، $SL_{n,t}^p$ و $SL_{n,t}^q$ به ترتیب توان های اکتیو و راکتیو مبادله شده ی محلی در ریزشبهه ی n - ام در زمان t - ام هستند. σ_e نرخ مبادله توان میان ریزشبهه ها است؛ هیچ استاندارد مشخصی برای تعیین نرخ مبادله توان در شبکه های توزیع هوشمند و ریزشبهه ها تاکنون ارائه نشده است [۳۲]. در این مقاله نرخ مبادله توان با توجه به میانگین قیمت گذاری گره ی ۳۱ تولید کل منابع پراکنده قابل برنامه ریزی در ریز شبکه های متصل به هم محاسبه شده است. به این صورت که نرخ مبادله توان برابر ۱۰۰٪ تا ۳۰۰٪ این میانگین قرار گرفت. نتایج نشان داد که رابطه خطی میان افزایش نرخ مبادله و توان مبادله ای وجود ندارد. هرچند که در بازه کوچک ۱۲۰٪ تا ۱۶۰٪ میانگین قیمت گذاری ها، تغییرات توان مبادله شده تقریباً رفتار خطی دارد؛ یعنی با افزایش نرخ مبادله توان، ریزشبهه ها تمایل کمتری به مبادله توان از خود نشان می دهند. در نتیجه انتظار می رود که در بازه پیشنهادی عمل کرد ریزشبهه ها بهتر باشد.

لذا در این مقاله مقدار σ_e به صورت اختیاری برابر ۱۴۰٪ میانگین قیمت گذاری ها، یعنی ۵۳\$/MVAR، تعیین شده است. این نرخ تاکنون در ریزشبهه های متصل به هم تعیین و بررسی نشده است. در مرجع [۲۰] نیز برای حالت بهره برداری نرمال، این مقدار برابر صفر در نظر گرفته شده و نحوه محاسبه آن توضیح داده نشده است.

محدودیت های مسئله بهینه سازی با مدیریت توزیع شده در روابط (۱۰) تا (۲۳) تعریف شده اند.

شکل ۳ یک مدل شبکه الکتریکی شعاعی n شینه را نشان می دهد.



شکل ۳: دیاگرام شبکه الکتریکی شعاعی [۲۸]

روابط (۲) تا (۴) معادله های پخش بار سیستم توزیع هستند که برای توصیف توان عبوری و ولتاژ در هر گره i استفاده می شوند [۲۸].

$$P_{i+1} = P_i - r_i (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 + P_{i+1}^G - P_{i+1}^D \quad (2)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 + Q_{i+1}^G - Q_{i+1}^D \quad (3)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 \quad (4)$$

که در آن ها:

- P_i توان اکتیو عبوری میان شین i - ام و شین $i+1$ - ام
- Q_i توان راکتیو عبوری میان شین i - ام و شین $i+1$ - ام
- P_i^G توان تولیدی اکتیو در شین i - ام
- Q_i^G توان تولیدی راکتیو در شین i - ام
- P_i^D تقاضای اکتیو در شین i - ام
- Q_i^D تقاضای راکتیو در شین i - ام
- V_i ولتاژ شین i - ام
- r_i مقاومت خط میان شین i - ام و شین $i+1$ - ام
- x_i راکتانس خط میان شین i - ام و شین $i+1$ - ام

در این مدل سازی فرض شده است که P_i^G توسط منابع تولید پراکنده قابل برنامه ریزی و تجدیدپذیر انرژی و Q_i^G نیز توسط منابع تولید پراکنده قابل برنامه ریزی تولید می شود. ضریب قدرت واحدهای تجدیدپذیر در مقدار ثابت "یک" تنظیم شده است [۲۹].

جمله های درجه دوم در معادله های پخش بار شبکه توزیع معرفی شده در روابط (۲) تا (۴)، نشان دهنده تلفات خطوط هستند. این جمله های درجه دوم نسبت به مقادیر توان عبوری از خطوط P_i و Q_i بسیار کوچک تر هستند. بنابراین با حذف جمله های درجه دوم، می توان مجموعه معادله های پخش بار را ساده کرد. معادله های پخش بار ساده شده در سیستم های توزیع و ریزشبهه ها مورد استفاده قرار گرفته اند [۳۰]. با توجه به مدل سازی معادله ها در یک بازه ی ۲۴ ساعته، شاخص زمان (t) نیز به پارامترها و متغیرهای شبکه اضافه می شود. معادله های پخش بار ساده شده در روابط (۵) تا (۷) نشان داده شده اند. جزئیات بیش تر مربوط به معادله های پخش بار و نحوه ساده سازی را می توان در [۲۸] یافت.

$$P_{i,t}^G - P_{i,t-1}^G \leq (2 - \omega_{i,t} - \omega_{i,t-1}) P_i^{G,\min} + (1 + \omega_{i,t-1} - \omega_{i,t}) \psi_i^p \quad \forall t \quad (18)$$

$$P_{i,t-1}^G - P_{i,t}^G \leq (2 - \omega_{i,t} - \omega_{i,t-1}) P_i^{G,\min} + (1 - \omega_{i,t-1} + \omega_{i,t}) \psi_i^p \quad \forall t \quad (19)$$

$$Q_{i,t}^G - Q_{i,t-1}^G \leq (2 - \omega_{i,t} - \omega_{i,t-1}) Q_i^{G,\min} + (1 + \omega_{i,t-1} - \omega_{i,t}) \psi_i^q \quad \forall t \quad (20)$$

$$Q_{i,t-1}^G - Q_{i,t}^G \leq (2 - \omega_{i,t} - \omega_{i,t-1}) Q_i^{G,\min} + (1 - \omega_{i,t-1} + \omega_{i,t}) \psi_i^q \quad \forall t \quad (21)$$

که در آن ها ψ_i^p و ψ_i^q به ترتیب نرخ تغییرات اکتیو و راکتیو خروجی ریزتوربین‌ها را مشخص می‌کند. جزئیات بیش‌تر در بخش بعدی آورده شده‌است.

در محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) مجموع توان تولید ریزتوربین‌ها، توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی و توان مبادله شده محلی باید از مجموع مصرف بارها در هر ریز شبکه، بیش‌تر باشد. در این صورت، هر ریز شبکه می‌تواند در تأمین توان دیگر ریز شبکه‌ها نقش داشته‌باشد.

$$\sum_i P_{i,t}^G + \sum_i P_{i,t}^R + SL_{n,t}^p \geq \sum_i P_{i,t}^D \quad \forall t \quad (22)$$

$$\sum_i Q_{i,t}^G + SL_{n,t}^q \geq \sum_i Q_{i,t}^D \quad \forall t \quad (23)$$

برای مدل‌سازی خروجی توربین‌های بادی، می‌توان از مدل رابطه (۲۴) استفاده کرد [۳۳].

$$P_{WT} = 0.5 \rho \pi R^2 C_p y^3 \quad (24)$$

که در آن ρ چگالی هوا، R شعاع روتور توربین، C_p ضریب توان خروجی و y سرعت باد است.

برای مدل‌سازی پیش‌بینی توان اکتیو در یافتی از سلول‌های خورشیدی هم، رابطه (۲۵) می‌تواند استفاده شود [۳۴].

$$F_{t+1}^{PV} = \alpha Y_t^{PV} + (1 - \alpha) F_t^{PV} \quad (25)$$

که در آن F_{t+1}^{PV} مقدار پیش‌بینی شده توان برای ساعت بعد، F_t^{PV} مقدار پیش‌بینی شده توان برای ساعت حاضر، Y_t^{PV} مقدار واقعی توان برای ساعت حاضر و α ضریبی مابین ۰ تا ۱ است.

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، روش پیشنهادی، روی یک سیستم با شش ریز شبکه مشابه مرجع [۲۰] مورد بررسی قرار گرفته‌است. اطلاعات منابع تولید پراکنده و بارها به‌طور خلاصه در جدول‌های ۱ تا ۴ آمده‌اند. سایر اطلاعات مربوط به بارها و منابع تولیدی و داده‌های ریز شبکه‌ها از مرجع [۲۰] اخذ شده‌اند. موقعیت و اندازه‌ی پارامترهای مربوط به ریزتوربین‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ نشان

$$P_{i+1,t} = P_{i,t} + P_{i+1,t}^G + P_{i+1,t}^R - P_{i+1,t}^D \quad \forall t \quad (10)$$

$$Q_{i+1,t} = Q_{i,t} + Q_{i+1,t}^G - Q_{i+1,t}^D \quad \forall t \quad (11)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad \forall t \quad (12)$$

محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۲)، معادله‌های پخش بار ساده شده هستند که در قسمت قبلی مورد بحث قرار گرفتند؛ که در آن $P_{i,t}^R$ توان اکتیو تولیدی توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی در شین i - ام در زمان t - ام است. لازم به ذکر است که منابع تولید پراکنده غیر قابل برنامه‌ریزی مانند توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی، فقط توان اکتیو را به شبکه تزریق می‌کنند؛ به همین دلیل در محدودیت (۱۱) برای این منابع تولید، توان راکتیو لحاظ نشده‌است.

محدودیت مربوط به ولتاژ شین‌ها در رابطه (۱۳) مشخص شده‌است. این محدودیت به‌طور عمده در مسائل مرتبط با ولتاژ لحاظ می‌شود.

$$1 - \varepsilon \leq V_i \leq 1 + \varepsilon \quad \forall t \quad (13)$$

که در آن، ε حد ولتاژ مجاز شین‌ها و برابر ۰/۰۵ بر واحد تعیین شده‌است و این تضمین را می‌دهد که ولتاژ هر گره در محدوده‌ی مشخص شده باشد.

محدودیت‌های (۱۴) و (۱۵) مربوط به توان‌های اکتیو و راکتیو مبادله شده میان ریز شبکه‌های متصل به هم هستند.

$$-SL_{n,t}^{p,\max} \leq SL_{n,t}^p \leq SL_{n,t}^{p,\max} \quad \forall t \quad (14)$$

$$-SL_{n,t}^{q,\max} \leq SL_{n,t}^q \leq SL_{n,t}^{q,\max} \quad \forall t \quad (15)$$

که در آن‌ها $SL_{n,t}^{p,\max}$ و $SL_{n,t}^{q,\max}$ به ترتیب ظرفیت‌های اکتیو و راکتیو توان مبادله شده‌ی محلی میان ریز شبکه‌ها هستند؛ این ظرفیت‌ها به ترتیب برابر ۴ MVAR و ۵ MW تعیین شده‌اند.

محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) مقادیر ظرفیت مجاز خروجی ریزتوربین‌ها را نشان می‌دهد. در این محدودیت‌ها اکثراً مشارکت واحدها نیز لحاظ می‌شوند.

$$P_i^{G,\min} \omega_{i,t} \leq P_{i,t}^G \leq P_i^{G,\max} \omega_{i,t} \quad \forall t \quad (16)$$

$$Q_i^{G,\min} \omega_{i,t} \leq Q_{i,t}^G \leq Q_i^{G,\max} \omega_{i,t} \quad \forall t \quad (17)$$

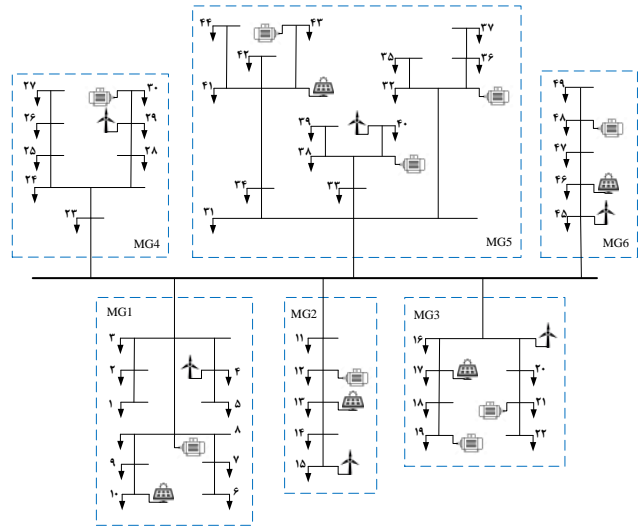
که در آن‌ها $P_i^{G,\min}$ و $Q_i^{G,\min}$ به ترتیب حداقل خروجی اکتیو و راکتیو ریزتوربین‌ها هستند که در این مدل‌سازی برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند، $P_i^{G,\max}$ و $Q_i^{G,\max}$ به ترتیب حداکثر خروجی اکتیو و راکتیو ریزتوربین‌ها و $\omega_{i,t}$ وضعیت روشن و یا خاموش بودن ریزتوربین‌ها^{۲۲} را نشان می‌دهند؛ $\omega = 1$ نشان‌دهنده روشن بودن واحد تولیدی و $\omega = 0$ نشان‌دهنده خاموش بودن آن است. جزئیات بیش‌تر در بخش بعدی آورده شده‌است.

محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۱) نشان‌دهنده‌ی مقدار مجاز تغییرات توان خروجی ریزتوربین‌ها در فاصله‌ی زمانی t - ام و $t-1$ - ام هستند.

داده شده‌اند. در این شبیه‌سازی، فرض بر این است که هر شین در هر ریزش‌بکه، مقدار برابری را از بار به‌اشتراک می‌گذارد. مقادیر بارها در جدول (۳) و ضرایب مشخصه آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳: اطلاعات بارها [۲۰]

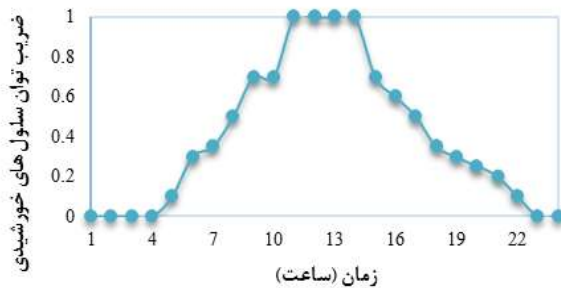
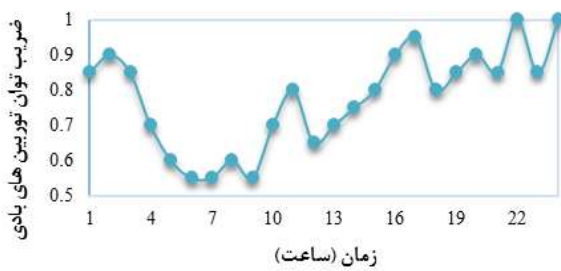
MG #	مجموع بارهای اکتیو (MW)	مجموع بارهای راکتیو (MVAR)
MG1	۱۰	۳
MG2	۵	۱/۵
MG3	۷	۲/۱
MG4	۸	۲/۴
MG5	۱۲/۶	۲/۸
MG6	۵	۱/۵



شکل ۴: سیستم با شش ریزش‌بکه متصل به هم [۲۰]



شکل ۵: ضرایب بارها [۲۰]



شکل ۶: ضرایب توان توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی [۲۰]

جدول ۱: اندازه پارامترهای مربوط به ریزتوربین‌ها [۲۰]

# شین	P^{max} (MW)	Q^{max} (MW)	ψ^p (MW/h)	ψ^q (MVAR/h)
۸	۸	۶	۲/۵	۲/۰
۱۲	۴	۲	۱/۵	۱/۰
۱۹	۲	۲	۰/۵	۰/۵
۲۱	۴	۲	۱/۵	۰/۵
۳۰	۸	۳	۲/۰	۱/۰
۳۲	۴	۳	۱/۵	۱/۰
۳۸	۶	۴	۲/۵	۱/۵
۴۳	۴	۳	۱/۵	۱/۰
۴۸	۸	۳	۲/۰	۱/۰

جدول ۲: ضرایب هزینه ریزتوربین‌ها [۲۰]

# شین	a (\$/MW ²)	b (\$/MW)	c (\$)
۸	۰/۰۶۹۶	۲۶/۲۴۴	۳۱/۶۷
۱۲	۰/۰۲۸۸	۳۷/۶۹۷	۱۷/۹۵
۱۹	۰/۰۴۶۸	۴۰/۱۲۲	۲۲/۰۲
۲۱	۰/۰۲۸۸	۳۷/۶۹۷	۲۱/۹۵
۳۰	۰/۰۴۶۸	۴۰/۱۲۲	۲۲/۰۲
۳۲	۰/۰۲۸۸	۳۰/۶۹۷	۲۱/۹۵
۳۸	۰/۰۶۸۱	۱۲/۴۴۱	۳۲/۰۱
۴۳	۰/۰۲۶۸	۳۰/۱۲۲	۲۲/۰۲
۴۸	۰/۰۲۸۸	۳۷/۶۹۷	۲۱/۹۵

اندازه‌ی خروجی منابع تولید پراکنده تجدید پذیر به‌صورت مشخصه‌های پیش‌بینی‌شده، در جدول ۴ و ضرایب مربوط به آن در شکل ۶ مشخص شده‌ست. خطای ناشی از عدم قطعیت این واحدها

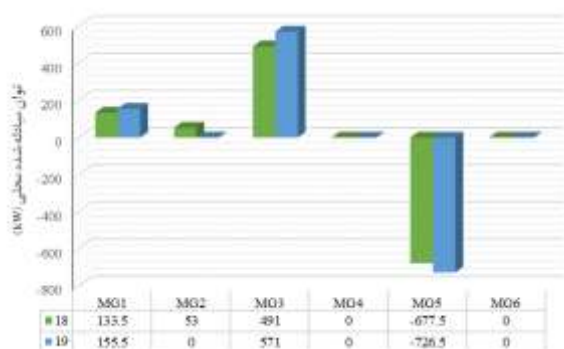
همان‌طور که در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد، در ساعت اوج بار، تمام ریزتوربین‌های موجود در شبکه، تقریباً در بیشینه توان تولیدی خود هستند. چون که در ریز شبکه‌های ۱، ۲، ۴ و ۶ تنها یک ریزتوربین وجود دارد، توان تولیدی ریزتوربین‌های موجود در این ریز شبکه‌ها، به‌طور تقریبی مشخصه بار را دنبال می‌کنند؛ توان تولیدی قطعی توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی در ایجاد این مشخصه نقش تاثیرگذاری داشته‌اند.

در ریز شبکه‌ی ۳ با ریزتوربین‌های موجود در شین‌های ۱۹ و ۲۱، ریزتوربین موجود در شین ۲۱، به‌دلیل ارزان‌تر بودن هزینه تولید (متوسط هزینه تولیدی) نسبت به دیگر ریزتوربین‌های موجود در این ریز شبکه، ترجیح داده شده است و در ساعات بار میانه و اوج بار، توان تولیدی آن تقریباً در بیشینه‌ی مقدار خود تنظیم شده است.

در ریز شبکه ۵ با ریزتوربین‌های موجود در شین‌های ۳۲، ۳۸ و ۴۳، ریزتوربین موجود در شین ۳۸، با توجه به ارزان‌تر بودن هزینه تولید نسبت به دیگر ریزتوربین‌های موجود در این ریز شبکه، مقدار توان تولیدی آن در تمام ساعات در مقدار بیشینه (تقریباً ۶MW) است؛ ریزتوربین‌های ۳۲ و ۴۳ نیز در برخی ساعات، یکی بر دیگری ترجیح داده شده است.

توان‌های راکتیو تولیدی نشان‌داده‌شده در شکل ۸ نیز رفتاری مشابه توان‌های اکتیو تولیدی نشان‌داده شده در شکل ۷ دارند؛ با این تفاوت که نرخ تغییرات توان راکتیو در ریزتوربین‌های موجود در ریز شبکه ۵، شدیدتر است.

شکل ۹ مبادلات توان اکتیو محلی را میان ریز شبکه‌ها متصل به هم نشان می‌دهد. مقادیر محاسبه‌شده از توان‌های اکتیو مبادله شده، با توجه به نرخ مبادله توان $53\$/MW$ به دست آمده‌اند. لازم به اشاره است که در ریز شبکه‌های متصل به هم توان‌های راکتیو مبادله نشده‌اند.



شکل ۹: توان مبادله شده محلی میان ریز شبکه‌ها (بر حسب kW)

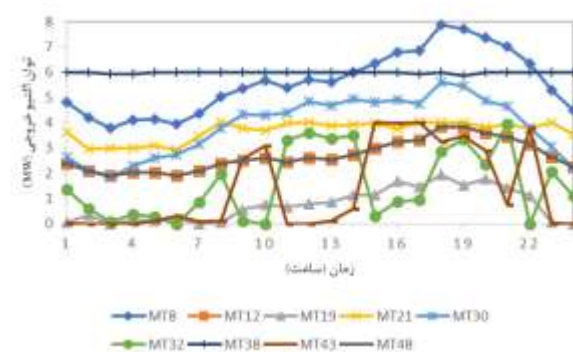
همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در ساعات ۱۸ و ۱۹، میان ریز شبکه‌ها توان محلی مبادله می‌شود؛ در این ساعات مصرف بارها در مقدار بیشینه و توان تولیدی سلول‌های خورشیدی در مقدار کمینه هستند. مقدار مثبت نشان می‌دهد که ریز شبکه مایل به خرید برق از سایر ریز شبکه‌ها است، در حالی که مقدار منفی نشان‌دهنده

جدول ۴: اندازه‌ی سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی [۲۰]

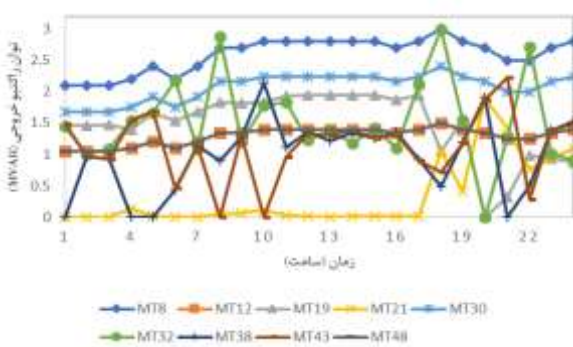
MG #	# شین	نوع	P^{max} (MW)
MG1	۴	WT	۲
	۱۰	PV	۱/۵
MG2	۱۳	PV	۱
	۱۵	WT	۱
MG3	۱۶	WT	۱
	۱۷	PV	۰/۵
MG4	۲۹	WT	۳
MG5	۴۰	WT	۲
	۴۱	PV	۱
MG6	۴۵	WT	۱
	۴۶	PV	۱

شبه‌سازی بر روی یک کامپیوتر با مشخصات Core™ i7 2.2GHz با حافظه‌ی 8GB و نرم‌افزار گمز (GAMS) انجام شد؛ برای محاسبه‌ی مسئله، از برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح و حل‌کننده‌ی DICOPT استفاده شد.

برنامه‌ریزی مطلوب برای هر ریز شبکه، به‌صورت یک دوره ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در حالت عمل کرد عادی، هر ریز شبکه به‌صورت مستقل کار می‌کند تا هزینه‌های بهره‌برداری خود را به حداقل برساند. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب زمان‌بندی تولید مطلوب توان‌های اکتیو و راکتیو ریزتوربین‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۷: توان اکتیو مطلوب تولیدی ریزتوربین‌ها



شکل ۸: توان راکتیو مطلوب تولیدی ریزتوربین‌ها

قرارداد و بهره‌برداران آن‌ها متفاوت است؛ به‌همین دلیل، در این حالت که از سیستم مدیریت انرژی توزیع‌شده و ریزشبه‌های مستقل استفاده شد، مجموع هزینه‌های بهره‌برداری برای کل ریزشبه‌ها، برابر $\$21092/04$ به‌دست آمد.

جدول ۵: هزینه‌های نهایی برای هر ریزشبه در ۲۴ ساعت

MG #	هزینه تولید برق (\$)	هزینه خرید و فروش برق (\$)	مجموع هزینه‌ها
MG1	۴۳۳۷/۹۲۶	۱۷/۳۴	۴۳۵۵/۲۶۶
MG2	۲۸۷۳/۲۸۳	۰۳/۱۸	۲۸۷۶/۴۶۲
MG3	۵۱۰۵/۶۲۷	۶۳/۷۲	۵۱۶۹/۳۴۷
MG4	۴۲۷۱/۵۴۸	۰	۴۲۷۱/۵۴۸
MG5	۱۵۳۲/۶۱۰	-۸۴/۲۴	۱۴۴۸/۳۷۰
MG6	۲۹۷۱/۰۴۸	۰	۲۹۷۱/۰۴۸

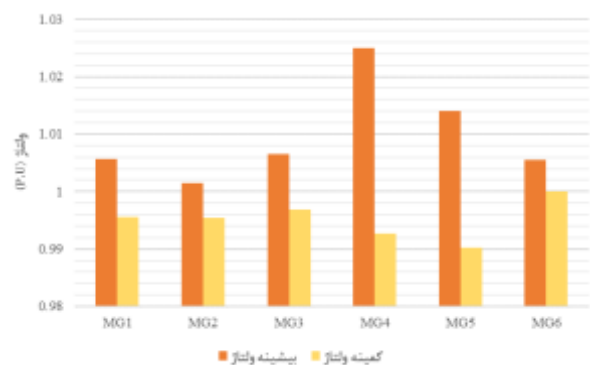
در این مقاله هزینه‌های تولید منابع پراکنده در ریزشبه‌های متصل به هم در ساعات ۱۸ و ۱۹ برابر $\$2802/6$ محاسبه شد. در طرح ارائه‌شده مرجع [۲۰] که از ذخیره‌سازهای انرژی و مدیریت متمرکز برای بهره‌برداری عادی ریزشبه‌ها استفاده کرده‌است، هزینه‌های بهره‌برداری همین منابع برابر $\$2695/4$ اشاره شده‌است. چون هدف اصلی مرجع [۲۰] مقایسه هزینه‌های تولید منابع پراکنده در ساعات ۱۸ و ۱۹ برای حالت‌های بهره‌برداری عادی و خودترمیم بوده‌است، فقط به هزینه‌های بهره‌برداری این ساعات اشاره شده است. با توجه به امکان مقایسه طرح پیشنهادی این مقاله با طرح ارائه شده در مرجع [۲۰] در ساعات ۱۸ و ۱۹، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- هزینه‌های بهره‌برداری در ساعات ۱۸ و ۱۹ در طرح پیشنهادی نسبت به طرح ارائه شده در مرجع [۲۰] بیش‌تر است؛ چراکه در مرجع [۲۰] در این ساعات ذخیره‌سازهای انرژی توان لازم را به شبکه تزریق می‌کنند و هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش می‌دهند. این درحالی است که در طرح پیشنهادی این مقاله از ذخیره‌سازهای انرژی برای ساده کردن مسئله بهینه‌سازی و مشاهده تأثیر مدیریت توزیع‌شده در خروجی منابع پراکنده قابل برنامه‌ریزی، صرف‌نظر شده‌است.
- در طرح پیشنهادی، نرخ مبادله توان تعیین شده‌است؛ این درحالی است که در طرح ارائه‌شده در مرجع [۲۰] مبادله توان‌های محلی در حالت بهره‌برداری عادی وجود ندارد و ریزشبه‌ها کاملاً مستقل هستند. به‌همین دلیل انتظار می‌رفت که در این ساعات هزینه‌های بهره‌برداری طرح پیشنهادی نسبت به طرح ارائه‌شده در مرجع [۲۰] بیش‌تر باشد.
- کارایی طرح پیشنهادی این مقاله نسبت به طرح ارائه شده در مرجع [۲۰] بهتر است؛ زیرا در عمل بهره‌برداران شبکه مستقل بوده و استفاده از سیستم مدیریت توزیع‌شده اجتناب‌ناپذیر است. همچنین با توجه به انتخاب مدیریت توزیع‌شده، قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری بیش‌تر خواهد بود.

فروش برق به این ریزشبه‌ها است. در ساعت ۱۸، ریزشبه ۵ توان محلی را به شین مشترک ارسال می‌کند و ریزشبه‌های ۱، ۲ و ۳ این مقدار توان را از شین مشترک دریافت می‌کنند.

به‌عنوان مثال، در ریزشبه ۱ در ساعت ۱۸، مجموع خروجی منابع تولید تجدیدپذیر (توربین بادی شین ۴ و سلول خورشیدی شین ۱۰) برابر $2/07$ مگاوات، خروجی منبع قابل برنامه‌ریزی (ریزتوربین شین ۸) برابر $7/797$ مگاوات و مجموع بارهای مصرفی برابر ۱۰ مگاوات هستند. بنابراین مطابق رابطه (۲۲) توان دریافتی ریزشبه ۱ از شین مشترک برابر با $0/133$ مگاوات یا ۱۳۳ کیلووات خواهد بود. برای ریزشبه‌های دیگر نیز به‌همین صورت می‌توان مبادله توان محلی را بررسی کرد. در ساعت ۱۹ نیز مشابه ساعت قبل، ریزشبه ۵ توان را به شین مشترک ارسال می‌کند، ولی با این تفاوت که ریزشبه ۲ در این ساعت، توان را از شین مشترک دریافت نمی‌کند.

شکل ۱۰ بیشینه و کمینه مقادیر ولتاژ شین‌ها را در ریزشبه‌های متصل به هم نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ولتاژ در ریزشبه‌ها

مقدار مجاز نوسان ولتاژ در مقدار امن $\pm 5\%$ ، یعنی مابین $0/95$ تا $1/05$ بروا حد است [۳۵]. نتایج نشان‌دهنده در شکل ۱۰، مقادیر ولتاژ را در یک سطح خیلی خوب نشان می‌دهد. در ریزشبه ۴، به‌دلیل حضور تنها یک ریزتوربین در شین ۳۰ و یک توربین بادی در شین ۲۹ و با توجه به بیشینه مصرف بار در ساعت ۱۸، ولتاژ در شین ۳۰ به مقدار $1/025$ رسیده‌است.

هزینه‌های نهایی برای هر ریزشبه در بازه‌ی ۲۴ ساعته، در جدول ۵ نشان داده شده‌است. این هزینه‌ها شامل تولید، خرید و فروش برق است. با توجه به قیمت‌های تولیدی متفاوت برای ریزتوربین‌ها در هر ریزشبه، نمی‌توان قیمت پایه و ثابتی را برای فروش برق به مصرف‌کنندگان در نظر گرفت؛ قیمت‌های فروش برق به مصرف‌کنندگان در هر ریزشبه، باید متناسب با قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی باشد. به‌دست آوردن این قیمت‌های فروش، خارج از فرصت این مقاله است.

مقادیر مثبت و منفی موجود در ستون سوم از جدول ۵، به‌ترتیب بیان‌گر هزینه‌ی خرید و فروش برق از سایر ریزشبه‌ها است. باید به این نکته توجه کرد که در عمل، هر ریزشبه در ناحیه‌ای از شبکه

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک سیستم مدیریت انرژی توزیع شده برای ریز شبکه‌های متصل به هم پیشنهاد شد. این ریز شبکه‌ها از طریق یک شین مشترک و به صورت فیزیکی به هم متصل شده‌اند و توان الکتریکی محلی را میان خود مبادله می‌کنند. به منظور هماهنگی بهره‌برداری میان این ریز شبکه‌ها، یک شبکه الگوریتم ارتباطی دوسطحی ارائه شد؛ سطح اول برای بهره‌برداری اقتصادی ریز شبکه‌های مستقل و سطح دوم برای بهینه‌کردن توان مبادله شده محلی در نظر گرفته شد. یک نرخ مبادله توان محلی برای ریز شبکه‌های متصل به هم تعیین شد. این نرخ برابر ۱۴۰٪ میانگین قیمت‌گذاری گرهی تولید کل منابع پراکنده قابل برنامه‌ریزی در ریز شبکه‌ها محاسبه شده است. منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی نیز به عنوان مشخصه‌های پیش‌بینی شده در ریز شبکه‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

در این مقاله، حالت متصل به شبکه بررسی شد که در آن ریز شبکه‌های متصل به هم در ساعات ۱۸ و ۱۹ توان محلی را از طریق شین مشترک با هم مبادله کردند. هم‌چنین در مسئله بهینه‌سازی از معادله‌های پخش بار ساده شده شبکه توزیع همراه با قیود ولتاژ شین‌ها استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی در یک دوره برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته، کارایی طرح پیشنهادی با مدیریت توزیع شده را نشان می‌دهد. ولتاژ شین‌ها در محدوده مجاز تعیین شده ($\pm 5\%$) قرار داشته و منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی نیز در بهینه‌ترین حالت بهره‌برداری خود هستند.

در این مقاله به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر مدیریت توزیع شده بر خروجی منابع تولید پراکنده و مبادله توان میان ریز شبکه‌ها، از کنترل بار صرف نظر شده است. چراکه ریز شبکه‌ها در حالت عمل کرد عادی قادر به تأمین تقاضای بار خود هستند. باین وجود، مدل پیشنهادی قابلیت توسعه و هم‌خوانی با شاخص حذف بار را نیز دارد.

هرچند که مسئله بهینه‌سازی برای بهره‌برداری ریز شبکه‌های متصل به هم در حالت مدیریت توزیع شده چالش برانگیزتر از حالت مدیریت متمرکز است، اما چالش موجود باعث عمل کرد بهتر ریز شبکه‌ها و انتخاب گزینه‌های متنوع‌تر برای بهره‌برداری می‌شود. با توجه به ساختار شبکه‌ای انتخابی، امکان گسترش ریز شبکه‌های متصل به هم از طریق ارتباط دادن ریز شبکه‌ها با شبکه توزیع و یا اتصال ریز شبکه‌های بیش‌تر با یکدیگر به صورت مش از طریق خطوط فیزیکی مجزا وجود دارد؛ مسائل پایداری هوشمند در تأمین توان پشتیبان در حالت‌های اضطراری و جزیره‌ای در ریز شبکه‌های متصل به هم نیز می‌تواند در مطالعه‌های آینده نقش داشته باشد.

مراجع

- [1] B. J. Brearly and R. R. Prabu, "A review on issues and approaches for microgrid protection," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 988-997, January 2017.
- [2] Z. Li, M. Shahidehpour, F. Aminifar, A. Alabdulwahab and Y. Al-Turki, "Networked microgrids for enhancing the power system resilience," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1289-1310, July 2017.
- [3] Y. Han, K. Zhang, H. Li, E. A. A. Coelho and J. M. Guerrero, "MAS-based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: A comprehensive overview," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 8, pp. 6488-6508, August 2018.
- [4] نرگس پرهیزی، موسی مرزبند، سید مازیار میرحسینی مقدم، فاطمه آذری نژادیان و بهنام محمدی ایواتلو، «پایه‌سازی عملی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریز شبکه متصل به شبکه سراسری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چند بعدی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۲۵-۴۰، ۱۳۹۵.
- [5] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, J. Kim and M. Begovic, "Robust optimization based optimal DG placement in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2173-2182, September 2014.
- [6] محمدرضا جلیلود، کنترل ولتاژ و فرکانس ریز شبکه‌های جزیره‌ای متشکل از سیستم‌های تولید تجدیدپذیر غیردائمی، کارشناسی ارشد ناپوسته، دانشگاه تهران، تهران، صفحه ۱، ۱۳۹۵.
- [7] F. Khavari, A. Badri, A. Zangeneh, and M. Shafiekhani, "A comparison of centralized and decentralized energy-management models of multi-microgrid systems," *2017 Smart Grid Conference (SGC)*, pp. 1-6, December 2017.
- [8] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, H. Zareipour and M. Moeini-Aghtaie, "A probabilistic energy management scheme for renewable-based residential energy hubs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2217-2227, September 2017.
- [9] B. P. Hayes and M. Prodanovic, "State forecasting and operational planning for distribution network energy management systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 1002-1011, March 2016.
- [10] A. Azizivahed, E. Naderi, H. Narimani, M. Fathi and M. R. Narimani, "A new bi-objective approach to energy management in distribution networks with energy storage systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 56-64, January 2018.
- [11] C. Ju, P. Wang, L. Goel and Y. Xu, "A two-layer energy management system for microgrids with hybrid energy storage considering degradation costs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6047-6057, November 2018.
- [12] I. Joo and D. Choi, "Distributed optimization framework for energy management of multiple smart homes with distributed energy resources," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 15551-15560, 2018.
- [13] N. Rezaei, A. Ahmadi, A. H. Khazali and J. M. Guerrero, "Energy and frequency hierarchical management system using information gap decision theory for islanded microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7921-7932, October 2018.
- [14] H. Yin, C. Zhao and C. Ma, "Decentralized real-time energy management for a reconfigurable multiple-source energy system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 9, pp. 4128-4137, September 2018.
- [15] IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems, *IEEE Standard 1547.4*, pp. 1-54, July 2011.
- [16] معصومه جوادی، موسی مرزبند و سید مازیار میرحسینی مقدم، «مدیریت بهینه انرژی در سیستم‌های چند ریز شبکه‌ای در بازار خرد-فروشی انرژی بر پایه الگوریتم سلسه‌مراتبی تعاملی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۳، صفحه ۱۰۷-۱۲۰، ۱۳۹۵.
- [17] توحید فرهودی و سجاد نجفی روادانق، «برنامه‌ریزی و تجدید آرایش بهینه در شبکه‌ای با ریز شبکه‌های چندگانه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۴، صفحه ۱۵۸۷-۱۵۹۸، ۱۳۹۶.

- [27] G. Perboli, L. Gobbato and F. Maggioni, "A progressive hedging method for the multi-path travelling salesman problem with stochastic travel times," *IMA Journal of Management Mathematics*, vol. 28, no. 1, pp. 65-86, January 2017.
- [28] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [29] A. O'Connell and A. Keane, "Volt-var curves for photovoltaic inverters in distribution systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 3, pp. 730-739, February 2017.
- [30] M. R. Sarker, M. A. Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Optimal coordination and scheduling of demand response via monetary incentives," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1341-1352, May 2015.
- [۳۱] مهدی نوشیار، «توزیع اقتصادی دینامیکی توان در سیستم قدرت با الگوریتم توسعه یافته جستجوی هارمونی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۲۶۵-۱۲۷۶، ۱۳۹۶.
- [32] S. Parhizi, A. Khodaei and M. Shahidehpour, "Market-based versus price-based microgrid optimal scheduling," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 615-623, March 2018.
- [33] S. Shokrzadeh, M. Jafari Jozani and E. Bibeau, "Wind Turbine Power Curve Modeling Using Advanced Parametric and Nonparametric Methods," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 1262-1269, October 2014.
- [34] V. Prema and K. UmaRao, "Development of statistical time series models for solar power prediction," *Renewable Energy*, vol. 83, no. 2, pp. 100-109, November 2015.
- [35] Electric Power Systems and Equipment Voltage Ratings (60 Hz), *ANSI Standard C84.1*, 1995.
- [18] A. K. Marvasti, F. Yong, S. DorMohammadi and M. Rais-Rohani, "Optimal operation of active distribution grids: A system of systems framework," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1228-1237, May 2014.
- [19] S. A. Arefifar, M. Ordonez and Y. A. I. Mohamed, "Voltage and current controllability in multi-microgrid smart distribution systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 817-826, March 2018.
- [20] Z. Wang, B. Chen, J. Wang and C. Chen, "Networked microgrids for self-healing power systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 310-319, January 2016.
- [21] M. R. Sandgani and S. Sirouspour, "Priority-based microgrid energy management in a network environment," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 980-990, April 2016.
- [22] A. M. Jadhav, N. R. Patne and J. M. Guerrero, "A novel approach to neighborhood fair energy trading in a distribution network of multiple microgrid clusters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1520-1531, February 2019.
- [23] C. Chen, J. Wang and S. Kishore, "A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response," *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2219-2228, September 2014.
- [24] S. DorMohammadi and M. Rais-Rohani, "Exponential penalty function formulation for multilevel optimization using the analytical target cascading framework," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 47, no. 4, pp. 599-612, April 2013.
- [25] A. Kargarian and Y. Fu, "System of systems-based security-constrained unit commitment incorporating active distribution grids," *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2489-2498, September 2014.
- [26] C. Ordoudis, P. Pinson, M. Zugno and J. M. Morales, "Stochastic unit commitment via Progressive Hedging extensive analysis of solution methods," *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015.

زیر نویس ها

- ¹² Distributed
- ¹³ Grid-Connected Mode
- ¹⁴ Islanded Mode
- ¹⁵ Energy Hub
- ¹⁶ Demand and Supply Information Update
- ¹⁷ Decision Making in Normal Operation
- ¹⁸ Progressive Hedging
- ¹⁹ Stochastic
- ²⁰ Deterministic
- ²¹ Locational Marginal Price
- ²² Unit Commitment
- ²³ General Algebraic Modeling System
- ¹ Microgrid
- ² Distributed Generators
- ³ Gas Turbines
- ⁴ Photovoltaic Panels
- ⁵ Wind Turbines
- ⁶ Microturbines
- ⁷ Small Hydroelectric Power Plants
- ⁸ Networked Microgrids
- ⁹ Distributed Energy Resources
- ¹⁰ Energy Management System
- ¹¹ Centralized