ارائه طرح جامع مدیریتی بهره‌برداری از یک ریزشبکه چندگانه بر پایه ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی با رویکرد تئوری بازی

مهدی ابوالحسن بیگی[۱]، سودابه سلیمانی*[۲]، سید بابک مظفری[۳]، رضاشریفی

۱- گروه برق، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران، Mahdibeigi79@gmail.com

*۲- گروه برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Soodabeh_soleymani@yahoo.com

۳- گروه برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mozafari@srbiau.ac.ir

۴- گروه برق، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Sharifi.r@wtiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

چکیده: در این مقاله، طرح جامع مدیریتی بهره‌برداری از یک ریزشبکه چندگانه برپایه ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی با تشکیل ائتلاف بین ریزشبکه ها با هدف افزایش سود بهره‌برداری ریزشبکه‌ها ارائه خواهد شد. مدل پیشنهادی به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی چندسطحی با رویکرد تئوری بازی فرمول‌بندی می‌شود. در سطح محلی، مسئله بهینه‌سازی دوهدفی زیست محیطی، اقتصادی برای هر ریزشبکه که بر پایه تولیدات توزیع‌پذیر و منابع مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر هستند، ارائه شده است. از آنجایی‌که مسئله برنامه‌ریزی برای بارهای الکتریکی و گرمایی اعمال گردیده، لذا در طرح مورد نظر حامل‌های انرژی از قبیل انرژی برق و سوخت مورد نیاز نیروگاه‌ها در بهینه‌سازی لحاظ گردیده و باتوجه به نفوذ تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت در توان خروجی در ریزشبکه، در ساختار پیشنهادی دو ابزار کاربردی جهت استفاده بهینه از این تجهیزات و افزایش سود بهره‌بردار ریزشبکه پیشنهاد می‌گردد، که ابزار اول استفاده بهینه از منابع ذخیره‌ساز انرژی و ابزار دوم بارهای پاسخگو و برنامه مدیریت این بارها در جهت نیل به اهداف بهره‌بردار ریزشبکه خواهد بود. در این تحقیق از الگوریتم اجماع ذرات و همچنین مدل‌سازی مبتنی بر نظریه بازی به منظور بهینه‌سازی استفاده شده است، شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار گمز انجام و نتایج آن با پیاده‌سازی فضای همکاری و تشکیل ائتلاف میان ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع، هزینه‌های نهایی مجموعه را به میزان قابل توجهی کاهش داده است.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه چندگانه، منابع تولید پراکنده، تئوری بازی، انرژی های تجدید پذیر، بهینه سازی چند سطحی

۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها یکی از مفاهیم جدید پیشنهاد شده در سیستم‌های قدرت بوده، که تأثیر قابل توجهی در افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر داشته‌اند [۱]. نوع مالکیت و نوع برنامه‌ریزی در ریزشبکه‌ها بر تصمیم-گیری سنتی در سیستم‌های قدرت تأثیر داشته است. یکی از تصمیمات مهم در حضور ریزشبکه‌ها، مدیریت انرژی به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی است. مدیریت انرژی در حضور ریزشبکه‌های متعدد چالش‌هایی را برای تصمیم گیرندگان در این زمینه به وجود می-آورد. از یک طرف اپراتورهای محلی به دنبال اهداف هر یک از ریزشبکه‌ها بوده و از سوی دیگر اپراتور مرکزی به دنبال تحقق اهداف کلی سیستم است. ضمناً با توجه به مزایای هر یک از ریزشبکه‌ها و همچنین کل سیستم در مسئله، مدیریت انرژی ریزشبکه‌های چندگانه مسئله پیچیده‌ای بوده که باید راه حلی برای آن فراهم گردد. این موضوع هدف اصلی این تحقیق محسوب می‌شود.

مدیریت انرژی ریزشبکه‌های چندگانه موضوع اصلی مطالعات کاری متعدد در سال‌های اخیر است.

نویسندگان در [۲] یک متدولوژی دو سطحی تصادفی را برای عمل و راه‌اندازی یک طرح ریزشبکه‌های چندگانه پیشنهاد کرده‌اند. هدف از سطح اول به حداقل رساندن هزینه انرژی دریافتی از شبکه بالادستی است. در سطح دوم، شاخص‌های فنی برای امکان‌سنجی و کیفیت ترکیب‌های بهینه تعیین شده در سطح اول تعریف می‌شوند. در [۳] نظریه بازی برای برنامه‌ریزی عملیاتی شبکه توزیع با ریزشبکه‌های چندگانه استفاده می‌شود. در [۴]، استراتژی‌های بهینه‌سازی شده و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

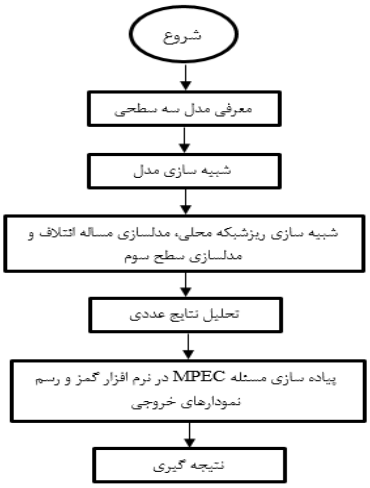
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

هماهنگ برای مدیریت انرژی چند ریزشبکه ارزیابی می‌شود. برای این کار یک شاخص احتمالات جدید برای تعیین موفقیت سناریوهای مدیریت انرژی برای به حداقل رساندن هزینه پیشنهاد شده است. یک روش بهینه‌سازی چند هدفه تعاونی برای مدیریت انرژی ریزشبکه در [۵] ارائه شده است. در این اثر شاخص عملکرد استقلال برای ریزشبکه‌ها پیشنهاد می‌شود تا تبادل انرژی با شبکه اصلی را مدیریت کنند. در [۶]، یک متدولوژی مدیریت انرژی اتفاقی برای تعیین مشارکت بهینه ریزشبکه‌های هوشمند در بازار برق ارائه شده که در این روش هزینه کل به حداقل می‌رسد و ظرفیت بهینه اجزای مختلف مشخص می‌گردد. یک متدولوژی یکپارچه مدیریت انرژی مبتنی بر زنجیره بلوکی در [۷] برای بهینه‌سازی جریان‌های انرژی با توجه به مکانیسم تجاری دوجانبه ارائه شده است. مدل جدید مدیریت انرژی مبتنی بر کنترل نظارت کامل و وظایف سیستم اکتساب داده‌ها در [۸] ارائه شده است. کنترل زمان واقعی در [۹] برای مدیریت انرژی کارآمد از یک ریزشبکه هیبریدی در مقیاس کوچک مبتنی بر باد، خورشیدی و باتری ارائه شده است. یک استراتژی بهینه مدیریت انرژی در [۱۰] برای یک ریزشبکه DC پیشنهاد شده است. این استراتژی بر اساس الگوریتم ازدحام سالپ است. یک الگوریتم مدیریت انرژی کارآمد با استفاده از بهینه‌سازی توسعه یافته پرتو مانتا فورج در [۱۱] ارائه شده است. نویسندگان در [۱۲] از منطق فازی برای مدیریت انرژی یک ریزشبکه استفاده کرده‌اند. روش پیشنهادی سود را بر اساس یک سیاست قیمت انرژی زمان استفاده به حداکثر می‌رسانید. در [۱۳] یک استراتژی مدیریت انرژی تصادفی در یک ریزشبکه با توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر مورد خطاب قرار گرفته است. روش پیشنهادی بر اساس بهینه‌سازی چند هدفه است و شامل کاهش هزینه و انتشار است. در [۱۴]، یک چارچوب یکپارچه برای ادغام یک برنامه جدید پاسخ تقاضای مبتنی بر تشویق و روش پیکربندی مجدد در مشکل مدیریت انرژی ریزشبکه در مقیاس زمانی روز ارائه شده است. در [۱۵]، یک متدولوژی زمانبندی ریزشبکه‌های چند زمانی بهینه دو مرحله‌ای ارائه شده است. مراحل شامل روز پیش‌رو و درون روز است. یک نظریه بازی تعاونی در [۱۶] برای برنامه‌ریزی عملیات روز پیش رو سیستم‌های ریزشبکه چندگانه پیشنهاد شده است. یک متدولوژی مدیریت انرژی در ریزشبکه DC با مکانیزم جبران ولتاژ کارآمد در [۱۷] پیشنهاد شده است. یک استراتژی مدیریت قابلیت اطمینان احتمالاتی برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبکه‌های متصل/ جزیره‌ای با انرژی تجدیدپذیر در [۱۸] ارائه شده است. در [۱۹]، یک مدیریت انرژی دو مرحله‌ای ریزشبکه ترکیبی AC/DC با توجه به محدودیت‌های امنیتی فرکانس ارائه شده است. یک مدیریت انرژی مبتنی بر جریان قدرت ریزشبکه‌های AC جزیره‌ای که از نظر سلسله مراتبی کنترل می‌شوند، در [۲۰] پیشنهاد شده است. در [۲۱] روش جدید مدیریت برای پیدا کردن بهره‌برداری بهینه از یک ریزشبکه متصل به شبکه ارائه شده است. این مسئله به عنوان یک رویکرد بهینه‌سازی مدلسازی شده و هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل است. یک روش برنامه‌ریزی چندسطحی تعاملی برای مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های خوشه‌ای با در نظر گرفتن خواسته‌های انعطاف‌پذیر در [۲۲] ارائه شده است.

در این مقاله یک سیستم جدید مدیریت انرژی سه سطحی مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای برنامه‌ریزی بهینه عملیات ریزشبکه‌های چندگانه ارائه شده و در مدل پیشنهادی، اپراتورهای محلی ریزشبکه‌ها به عنوان بازیگران اصلی بازی توانایی تصمیم‌گیری مستقل را خواهند داشت. در واقع هر اپراتور محلی می تواند نحوه کار منابع محلی در ریزشبکه مربوطه را تعیین کند. از سوی دیگر اپراتور مرکزی علاوه بر کنترل مبادلات انرژی بین ریزشبکه‌ها و شبکه بالادستی می تواند الزامات کلی سیستم را برآورده سازد. تعاملات بین اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی در روش مدیریت انرژی سه سطحی پیشنهادی مدل‌سازی شده است. به‌طور خلاصه نوآوری مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

- مدل‌سازی چند هدفه ائتلاف برای مدیریت انرژی ریزشبکه-های چندگانه
- مدل‌سازی MPEC از تعاملات بازیکنان موجود در مساله بازی

این تحقیق به صورت زیر سازماندهی شده است. مدل پیشنهادی در بخش ۲ ارائه و همچنین فرموله شده و در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی شرح داده شده و در نهایت نکات پایانی و نتیجه‌گیری در بخش ۴ ارائه می‌گردد. فلوچارت تحقیق بصورت شکل (۱) خواهد بود.



شکل (۱) : روند تحقیق و شبیه سازی مدل پیشنهادی

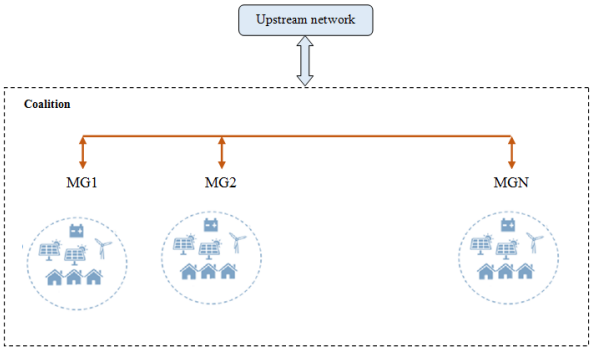
۲- معرفی مدل

۲-۱- ساختار مدل

مدل جدیدی برای برنامه‌ریزی بهینه عملیاتی یک ریزشبکه چندگانه در این مقاله ارائه شده است. به منظور معرفی و نشان دادن قابلیت این مدل از ساختار سیستم نشان داده شده در شکل (۲) استفاده شده است. بر اساس این شکل، هر ریزشبکه شامل واحد تولید معمولی (CGU)، واحد تولید بادی، واحد تولید همزمان گرما و برق (CHP)، سیستم ذخیره-سازی انرژی (ESS)، بویلر (B)، بارهای ثابت (UL) و بارهای پاسخگو (RL) است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

در مدل پیشنهادی در این مقاله، ریزشبکه‌ها به عنوان بازیگران مستقل، ائتلافی را تشکیل می‌دهند تا سود خود را در تبادل انرژی به حداکثر برسانند. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ائتلاف شامل N بازیکن است که علاوه بر ارائه خواسته‌های محلی خود، به دنبال بهینه‌سازی مبادلات انرژی با ریزشبکه‌های دیگر و همچنین شبکه بالادستی هستند. این ائتلاف که با هدف به حداکثر رساندن سود تجمعی ریزشبکه‌ها تشکیل می‌شود، توسط اپراتور مرکزی مدیریت می‌شود. باتوجه به استقلال ریزشبکه‌های محلی، اپراتور مرکزی میزان تبادل انرژی بین ریزشبکه‌ها و همچنین شبکه بالادستی را تعیین خواهد نمود. به منظور مدل‌سازی تأثیر رفتار اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی از روش بازی تعاونی استفاده شده است.



شکل (۲): ساختار مدل مورد مطالعه

به منظور در نظر گرفتن رابطه متقابل بین اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی و همچنین استقلال تصمیم گیری هر بازیکن، یک مدل سه سطحی با توجه به شکل (۳) پیشنهاد شده است.

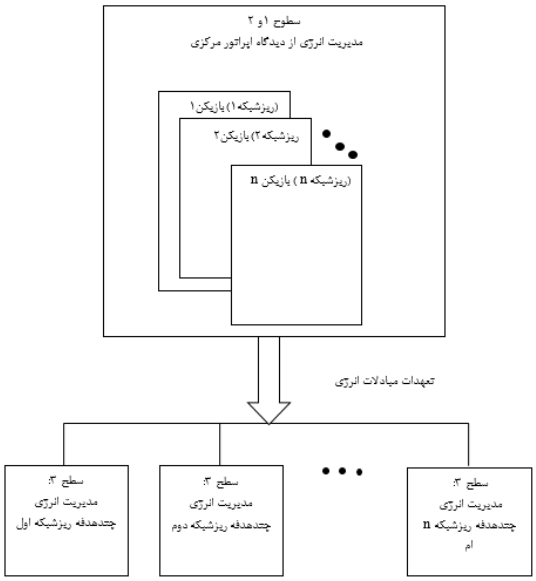
در این مقاله، از نظریه بازی برای مدل‌سازی مسئله از دیدگاه اپراتور مرکزی برای مدیریت انرژی ائتلاف، استفاده شده است. در ابتدا، یک مساله دو سطحی از این منظر برای تعیین تکلیف هر ریزشبکه حل می‌شود. در قالب این مسئله دو سطحی، مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه توسط اپراتور مرکزی انجام می‌شود. در این مسئله سطح دو، سطح بالایی از دید اپراتور مرکزی فرموله می‌شود و سطوح پایین‌تر از دید اپراتورهای محلی فرموله می‌شوند. به این ترتیب در این مسئله با تعدادی لایه‌های مختلف روبرو خواهیم شد.

تعهدات تعیین شده توسط مساله سطح دو شامل میزان تبادل بین ریزشبکه‌ها و شبکه بالادستی خواهد بود.

در سطح سوم بر اساس خروجی سطوح ۱ و ۲ نحوه کار ریزشبکه‌ها از دید عملگرهای محلی تعیین می‌شود. با توجه به شکل (۴)، برای هر یک از ریزشبکه‌ها با مشکلات جداگانه‌ای مواجه خواهیم شد.

۲-۲- شبیه سازی مدل

مدل سه سطحی پیشنهادی شامل یک مدل دو سطحی (تعاملات بین اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی) و یک مدل تک سطحی (برنامه‌ریزی عملیاتی ریزشبکه‌ها) است. سطح بالایی و پایینی مسئله دو سطحی به ترتیب از دید اپراتور مرکزی و اپراتور محلی است. این مسئله به عنوان یک برنامه ریاضی با محدودیت‌های تعادلی (MPEC) فرموله می‌شود، که در زیر بخش ۲-۲-۲ توضیح داده خواهد شد. مسئله سطح سوم یک مشکل تک سطحی است که با توجه به الزامات مبادلات بین ریزشبکه‌ها به برنامه‌ریزی عملیاتی ریزشبکه‌های محلی می‌پردازد. در ادامه ابتدا فرمولاسیون عملیات ریزشبکه‌های محلی ارائه می‌شود. پس از آن تدوین ائتلاف (سطح بالای مسئله) ارائه می‌شود. در نهایت روابط مربوط به سطح سوم مسئله توضیح داده خواهد شد.



شکل (۳): مدل سه سطحی پیشنهادی برای مدیریت انرژی ریزشبکه‌های چندگانه

۱-۲-۲- شبیه‌سازی ریزشبکه محلی

در مدل پیشنهادی هزینه عملیاتی و آلودگی آزاد شده در ریزشبکه‌ها در تابع هدف در نظر گرفته شده است. بنابراین مسئله بهینه‌سازی شامل یک تابع چند هدفه است. تابع چند هدفه هر ریزشبکه در ائتلاف به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$min \sum_{h=1}^{24} \left\{ \theta_1 \left(\overbrace{CUC_m \times CUG_{mh}}^{1} + \overbrace{CHPC_m \times CHPG_{mh}}^{2} + \overbrace{BC_m \times BG_{mh}}^{3} + \overbrace{SC_m^{ch} \times SP_{mh}^{ch} + SC_m^{dis} \times SP_{mh}^{dis}}^{4} + \overbrace{DC_m^{DR} \times DP_{mh}^{DR}}^{5} + \overbrace{\gamma_h \times \left(P_{mh}^{buy} - P_{mh}^{sell}\right)}^{6} \right) + \theta_2 \left(\overbrace{EM_{mh}^{c} + EM_{mh}^{CHP} + EM_{mh}^{B}}^{7} \right) \right\} \quad (1)$$

که در آن h و m به ترتیب شاخص زمان، روز و ریزشبکه هستند. ضریب های θ_1& θ_2 به ترتیب ضریب‌های وزن‌دهی مربوط به هزینه عملیاتی و آلودگی هستند.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

در رابطه (۱) شرایط ۱ تا ۶ به ترتیب نشان‌دهنده هزینه تولید روزانه واحد مرسوم، هزینه تولید روزانه CHP، هزینه تولید روزانه بویلر، هزینه عملیاتی روزانه سیستم ذخیره‌سازی انرژی، هزینه پاسخ تقاضای روزانه و هزینه تبادل انرژی روزانه می‌باشد. بخش ۷ آلودگی منتشر شده توسط تجهیزات داخل ریزشبکه را در طول روز مشخص می‌کند.

قیدهای ریزشبکه به شرح زیر هستند:

قیدهای واحد تولید مرسوم توزیع شده: [۲۶-۲۳].

$$\underline{CUG_m} \le CUG_{mh} \le \overline{CUG_m} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۲)$$

$$CUG_{mh} - CUG_{mh-1} \le CURU_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۳)$$

$$CUG_{mh-1} - CUG_{mh} \le CURD_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۴)$$

$$EM^c_{mh} = CUG_{mh} \times ER^c_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۵)$$

$$F^c_{mh} = CUG_{mh} \times FR^c_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۶)$$

$$\underline{CHPG_m} \le CHPG_{mh} \le \overline{CHPG_m} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۷)$$

$$CHPG_{mh} - CHPG_{mh-1} \le CHPRU_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۸)$$

$$CHPG_{mh-1} - CHPG_{mh} \le CHPRD_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۹)$$

$$EM^{CHP}_{mh} = CHPG_{mh} \times ER^{CHP}_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۱۰)$$

$$F^{CHP}_{mh} = CHPG_{mh} \times FR^{CHP}_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۱۱)$$

$$H^{CHP}_{mh} = CHPG_{mh} \times HR^{CHP}_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۱۲)$$

$$0 \le BG_{mh} \le \overline{BG_m} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۱۳)$$

$$EM^B_{mh} = BG_{mh} \times ER^B_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۱۴)$$

$$F^B_{mh} = BG_{mh} \times FR^B_m \qquad \forall m, \forall h \qquad (۱۵)$$

$$E^s_{mh} = E^s_{mh-1} + \eta^{s,ch}_m \times SP^{ch}_{mh} - \frac{1}{\eta^{s,dis}_m} \times SP^{dis}_{mh} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۱۶)$$

$$E^s_{m24} = E^s_{m0} \qquad \forall m \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{h=1}^{24} \eta^{s,ch}_m \times SP^{ch}_{mh} = \sum_{h=1}^{24} \frac{1}{\eta^{s,dis}_m} \times SP^{dis}_{mh} \qquad \forall m \qquad (۱۸)$$

$$\underline{E^s_m} \le E^s_{mh} \le \overline{E^s_m} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۱۹)$$

$$0 \le SP^{ch}_{mh}, SP^{dis}_{mh} \le \overline{P^s_m} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۲۰)$$

$$0 \le DP^{DR}_{mh} \le \overline{DP^{DR}_m} \qquad \forall j, \forall t \qquad (۲۱)$$

$$CUG_{mh} + CHPG_{mh} + SP^{dis}_{mh} + P^w_{mh} + DP^{DR}_{mh} + P^{buy}_{mh} = SP^{ch}_{mh} + P^{fl}_{mh} + P^{vl}_{mh} + P^{sell}_{mh} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۲۲)$$

$$0 \le P^{buy}_{mh}, P^{sell}_{mh} \le \overline{P^{trade}_m} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۲۳)$$

$$H^{CHP}_{mh} + BG_{mh} = H^l_{mh} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۲۴)$$

$$EM^c_{mh} + EM^{CHP}_{mh} + EM^B_{mh} \le \overline{E_{mh}} \qquad \forall m, \forall h \qquad (۲۵)$$

$$\sum_{h=1}^{24} \left(F^c_{mh} + F^{CHP}_{mh} + F^B_{mh} \right) \le \overline{F^c_m} \qquad \forall m \qquad (۲۶)$$

قید (۲) قابلیت تولید واحد متعارف را محدود می‌کند. توانایی افزایش و کاهش تولید واحد معمولی توسط قیدهای (۳) و (۴) محدود شده است. انتشار گازهای گلخانه‌ای و سوخت مصرف شده توسط واحد مرسوم به ترتیب با استفاده از (۵) و (۶) تعیین می‌شود. قید (۷) قابلیت تولید CHP را محدود می‌کند. توانایی افزایش و کاهش تولید CHP به ترتیب با قیدهای (۸) و (۹) محدود شده است. انتشار آزاد شده و سوخت مصرفی و تولید گرما توسط CHP به ترتیب با استفاده از (۱۰)-(۱۲) تعیین می‌شود. قابلیت تولید گرما توسط بویلر با (۱۳) محدود شده است. برابری‌های (۱۴) و (۱۵) میزان انتشار و سوخت مصرفی دیگ را تعیین می‌کنند. وضعیت شارژ سیستم ذخیره انرژی توسط (۱۶) تعیین می‌شود.

تعادل انرژی در ابتدا و انتهای هر روز توسط (۱۷) برقرار می‌شود. همچنین تعادل انرژی در حالت‌های شارژ و دشارژ توسط (۱۸) حفظ می‌شود. نابرابری‌های (۱۹) و (۲۰) به ترتیب ظرفیت انرژی و توان سیستم ذخیره انرژی را محدود می‌کنند. معادله (۲۱) قابلیت پاسخگویی به تقاضا را در هر ریزشبکه تعیین می‌کند.

تعادل تولید و مصرف توان در هر ساعت در هر ریزشبکه با استفاده از (۲۲) حفظ می‌شود. قابلیت تبادل برای هر ریزشبکه توسط (۲۳) محدود شده است. برابری (۲۴) کل گرمای تولید شده در هر ریزشبکه را تعیین می‌کند. قید انتشار ساعتی و مصرف سوخت روزانه برای هر ریزشبکه به ترتیب با استفاده از (۲۵) و (۲۶) تعیین می‌شود.

۲-۲-۲- مدل‌سازی مساله سطح بالا (مساله ائتلاف)

تابع هدف سطح بالا هزینه عملیاتی تجمعی ائتلاف را به صورت رابطه (۲۷) به حداقل می‌رساند:

$$min\left(\left(\sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{24}\left(\overbrace{CUC_m \times CUG_{mh}}^{1} + \overbrace{CHPC_m \times CHPG_{mh}}^{2} + \overbrace{BC_m \times BG_{mh}}^{3} + \overbrace{SC^{ch}_m \times SP^{ch}_{mh} + SC^{dis}_m \times SP^{dis}_{mh}}^{4} + \overbrace{DC^{DR}_m \times DP^{DR}_{mh}}^{5} + \overbrace{\gamma_h \times \left(P^{buy}_{mh} - P^{sell}_{mh}\right)}^{6}\right)\right) + \overbrace{\gamma_h \times \left(P^{t,buy}_h - P^{t,sell}_h\right)}^{7}\right) \qquad (۲۷)$$

اصطلاحات ۱ تا ۶ در معادله (۱) معرفی شده‌اند. بخش هفتم نیز هزینه تبادل انرژی با شبکه بالادستی را محاسبه خواهد کرد. محدودیت‌های سطح بالایی بصورت روابط (۲۸) و (۲۹) (پیوست) می‌باشند.

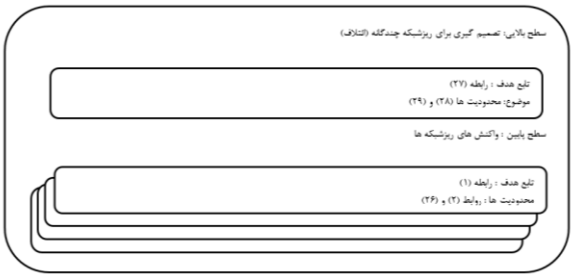
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$\sum_{j=1}^{N}\left(CUG_{mh}+CHPG_{mh}+SP_{mh}^{dis}+P_{mh}^{w}+DP_{mh}^{DR}+P_{mh}^{buy}\right)+P_{h}^{t,buy}=\sum_{j=1}^{N}\left(SP_{mh}^{ch}+P_{mh}^{fl}+P_{mh}^{vl}+P_{mh}^{sell}\right)+P_{h}^{t,sell}\qquad \forall h \tag{۲۸}$$

$$0\le P_{h}^{t,buy},P_{h}^{t,sell}\le \overline{P^{t,trade}}\qquad \forall h \tag{۲۹}$$

تعادل توان ساعتی برای ائتلاف توسط (۲۸) برقرار می‌شود. قابلیت تبادل توان ائتلاف با بالادست توسط (۲۹) محدود شده است.

مدل دو سطحی برای تعیین اثرات متقابل اپراتور مرکزی و اپراتورهای محلی بر اساس ساختار نشان داده شده در شکل (۴) فرموله می‌شود. در سطح بالا اهداف کلی ائتلاف دنبال می‌شود. اما در سطح پایین‌تر مسئله که از چند لایه تشکیل شده است، اهداف اپراتورهای محلی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین یک برنامه ریاضی با محدودیت‌های تعادلی (MPEC) توسعه می‌یابد. در این مقاله از روش تبدیل دوگان اصلی برای حل مسئله MPEC استفاده شده است. برای این منظور شرایط مکمل با یک معادله مضاعف قوی جایگزین می‌شود [۲۷].



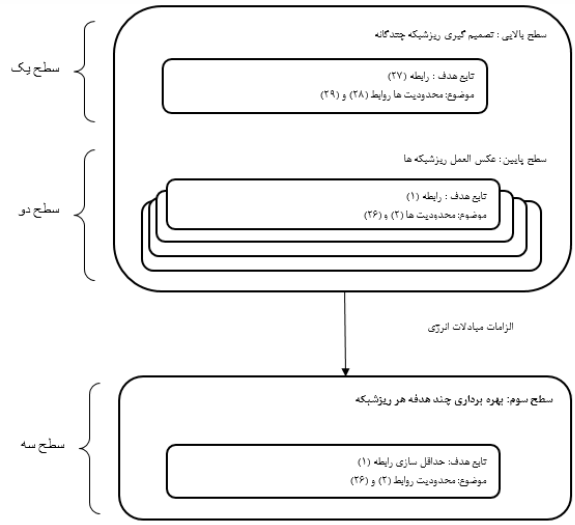
شکل ۴: چارچوب مساله دو سطحی برای مدل‌سازی ائتلاف

۳-۲-۲- شبیه‌سازی سطح سوم

به منظور توضیح بهتر مدل پیشنهادی در این مقاله، ساختار سه سطحی کلی این مدل در شکل (۵) نشان داده شده است. سطوح یک و دو یک مشکل MPEC را تشکیل می‌دهندکه الزامات تبادل انرژی بین ریزشبکه ها و شبکه بالادستی را تعیین می‌کند. بر اساس خروجی مدل دو سطحی در سطح سوم مسئله برنامه‌ریزی عملیاتی با توجه به تعداد ریزشبکه‌های ائتلاف حل می‌شود. فرمولاسیون مسئله سطح سوم مشابه مسئله سطح پایین‌تر است که در زیر بخش ۲-۲-۱ توضیح داده شده است.

۳- نتایج عددی

به منظور نشان دادن قابلیت‌های فنی مدل پیشنهادی در این مقاله، یک سیستم ریزشبکه چندگانه شامل سه ریزشبکه با قابلیت تبادل توان با شبکه بالادستی مشابه سیستم نشان داده شده در شکل (۲) در نظر گرفته شده است. هر ریزشبکه شامل یک واحد تولید مرسوم، یک واحد تولید بادی، یک CHP، یک سیستم ذخیره انرژی، یک بار ثابت و یک



شکل ۵: ساختار کلی سه سطحی مدل پیشنهادی

بار پاسخگو است. خواص واحدهای مرسوم در جدول (۱) ارائه شده است. در جدول (۲)، ویژگی های CHPs در ریزشبکه‌های مختلف دیده می‌شود. مشخصات بویلرها در جدول (۳) نشان داده شده و در جدول (۴)، خواص سیستم‌های ذخیره انرژی را می‌توان یافت.

کل بارهای الکتریکی در هر ریزشبکه در شکل (۶) نمایش داده می‌شوند. بارهای الکتریکی شامل بارهای انعطاف‌پذیر (پاسخگو) و بارهای ثابت (بی‌پاسخ) است. در شکل (۷)، بارهای انعطاف‌پذیر نشان داده می‌شوند. مصرف گرمایی ساعتی در ریزشبکه‌های مختلف در شکل (۸) دیده می‌شود. تولید واحد بادی در هر ریزشبکه در شکل (۹) نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی تولید واحد بادی از تابع احتمال توزیع وایبول استفاده شده است [۲۸].

حداکثر قابلیت تبادل با بالادست و همچنین تبادل بین ریزشبکه‌ها ۲ مگاوات در نظر گرفته شده است. حداکثر تولید آلودگی در هر ساعت در هر ریزشبکه ۱۰۰۰ پوند فرض می‌شود. ضریب وزن‌دهی هزینه و آلودگی به ترتیب ۰/۸ و ۰/۲ انتخاب شده است.

جدول (۱): ویژگی‌های واحدهای تولید مرسوم

Microgrid	1	2	3
MC_i^c ($/Kw)	0.11	0.12	0.1
$\underline{P_i^c}$ (kW)	0	0	0
$\overline{P_i^c}$ (kW)	8500	7500	7000
RU_i^c (kW/h)	3000	3000	3000
RD_i^c (kW/h)	3000	3000	3000
ER_i (lb/kwh)	0.011	0.012	0.014
FR(m^3/kWh)	0.21	0.22	0.21

با پیاده‌سازی مسئله MPEC در نرم‌افزار گمز، خروجی مدل دو سطحی میزان تبادل بین ریزشبکه‌های مختلف را تعیین خواهد کرد. نتایج نشان

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

می‌دهد که ریزشبکه‌های اول و سوم انرژی تحویل می‌دهند و ریزشبکه دوم انرژی دریافت می‌کند.

جدول (۲): ویژگی‌های CHPs

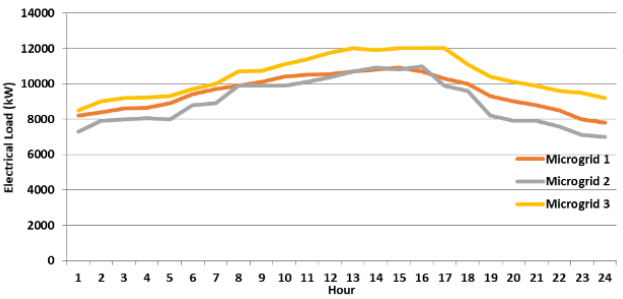
Microgrid	1	2	3
MC_i^{CHP} ($/kW)	0.12	0.11	0.13
(Kw) $\underline{P_i^{CHP}}$	0	0	0
(Kw) $\overline{P_i^{CHP}}$	4000	4000	5000
RU_i^{CHP} (kW/h)	2000	2000	2000
(kW/h) RD_i^{CHP}	2000	2000	2000
HR_i^{CHP}	1.8	1.95	1.9
(lb/kwh) ER_i^{CHP}	0.013	0.013	0.013
FR (m^3/kWh)	0.25	0.26	0.25

جدول (۳): ویژگی‌های بویلرها

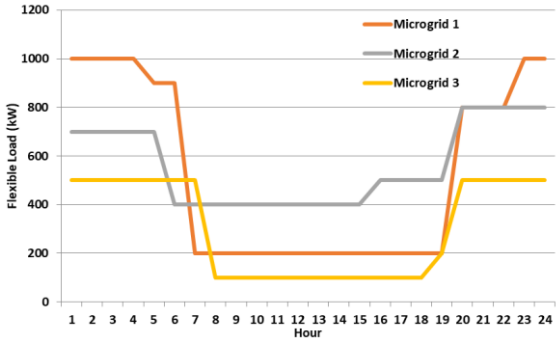
Microgrid	1	2	3
MC_i^B ($/kW)	0.037	0.041	0.042
$\overline{H_i^B}$ (kW)	2500	2000	1500
(lb/kwh) ER_i^B	0.01	0.011	0.012
FR (m^3/kWh)	0.18	0.17	0.18

جدول (۴): ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

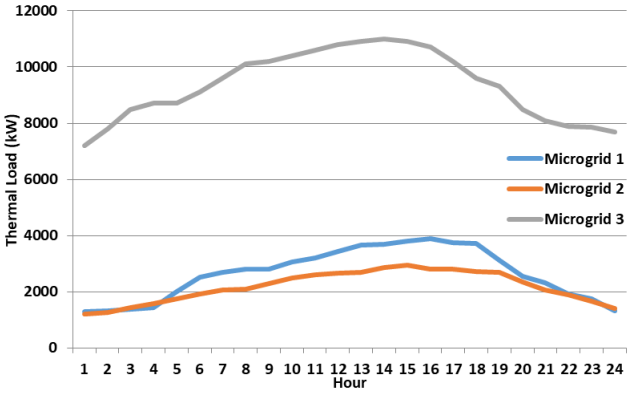
Microgrid	1	2	3
$\overline{P_i^s}$ (kW)	100	150	150
$\overline{E_i^s}$ (kWh)	500	500	600
$\underline{E_i^s}$ (kWh)	0	0	0
$\eta_i^{s,dis}$	0.95	0.95	0.95
$\eta_i^{s,ch}$	0.95	0.95	0.95
MC_i^{dis} ($/kW)	0.01	0.01	0.01
MC_i^{ch} ($/kW)	0.01	0.01	0.01



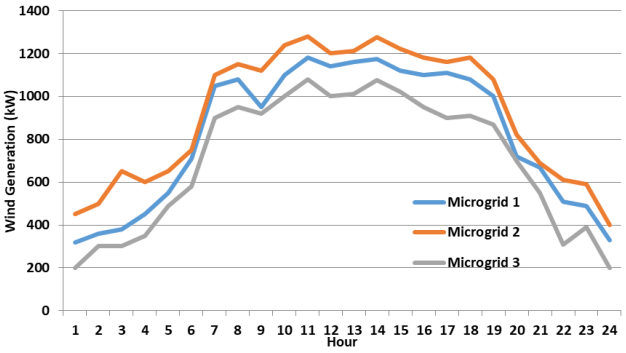
شکل ۶: مجموع بارهای الکتریکی در هر ریزشبکه



شکل ۷: بارهای انعطاف‌پذیر در هر ریزشبکه



شکل ۸: بارهای حرارتی در هر ریزشبکه



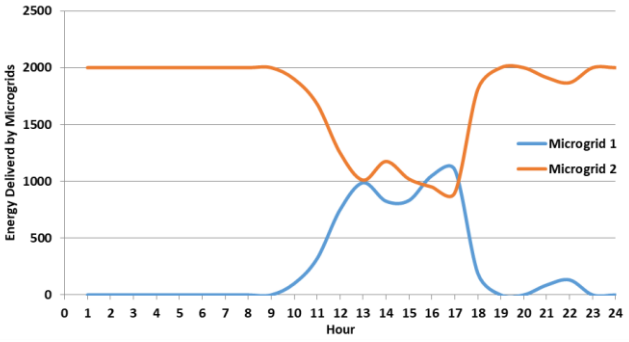
شکل ۹: تولید نیروگاه بادی در هر ریزشبکه

در شکل (۱۰)، انرژی تحویل داده شده توسط ریزشبکه‌ها نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد ریزشبکه‌های اول و سوم انرژی را تحویل می‌دهند. در ساعات ۱ تا ۹ ریزشبکه اول هیچ مبادله‌ای ندارد. در ساعت ۱۰ تا ۱۸:۰۰، ۲۱:۰۰ و ۲۲:۰۰، این ریزشبکه انرژی را به ریزشبکه دوم تحویل می‌دهد. این رقم نشان می‌دهد که انرژی تحویل داده شده توسط ریزشبکه سوم در تمام ساعات روز است.

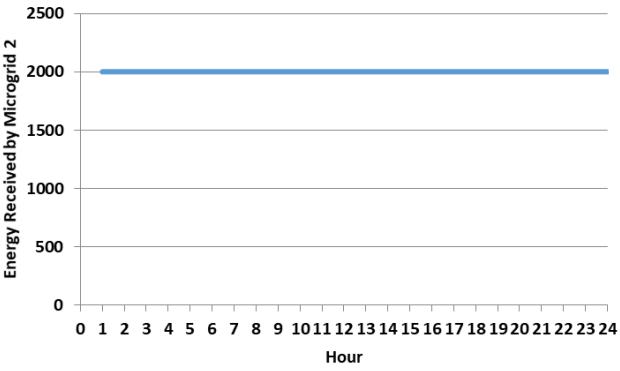
انرژی دریافت شده در ساعات مختلف روز و شب توسط ریزشبکه دوم در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، این ریزشبکه در تمام ساعات روز و شب از ریزشبکه‌های دیگر انرژی دریافت می‌کند. شکل (۱۲) خروجی واحدهای مرسوم را در ریزشبکه‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ریزشبکه اول بزرگترین سهم را در تولید انرژی الکتریکی توسط واحدهای سنتی دارد، و ریزشبکه دوم کمترین نقش را دارد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

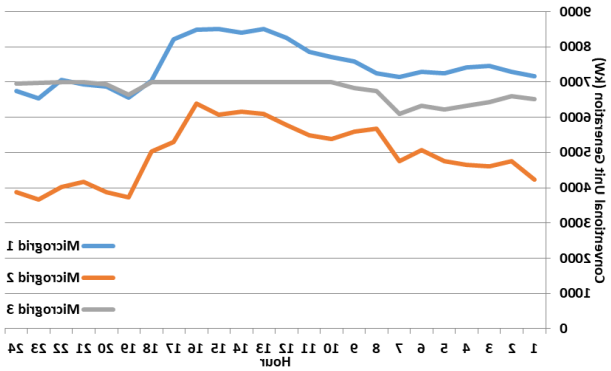
خروجی‌های الکتریکی CHPs در هر ریزشبکه در شکل (۱۳) ارائه شده است. از نظر انرژی الکتریکی تولید شده توسط CHPs، ریزشبکه ۳ مهم‌ترین است. وضعیت شارژ ESS در ریزشبکه اول را می‌توان در شکل (۱۴) دید. در این شکل، وضعیت ۱ نشان‌دهنده وضعیت شارژ و ۱- نشان‌دهنده وضعیت تخلیه ESS است. وضعیت شارژ ذخیره‌سازی در ریزشبکه سوم در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این ریزشبکه علاوه بر CHP، دیگ بخار نیز گرما تولید می‌کند. تولید حرارتی بویلر در ریزشبکه سوم در شکل (۱۶) ارائه شده است.



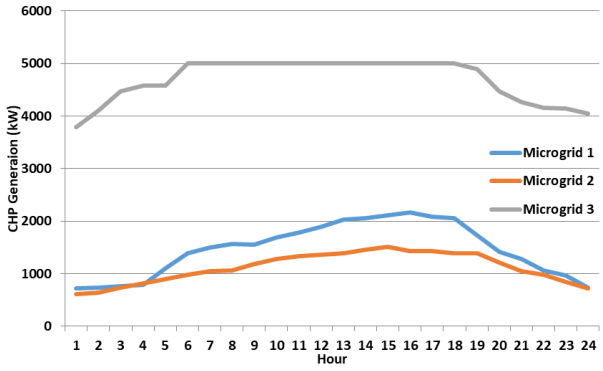
شکل ۱۰: توان خروجی ریزشبکه ها



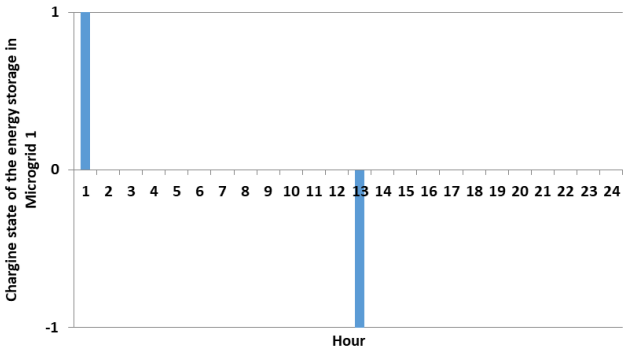
شکل ۱۱: توان ورودی ریزشبکه ۲



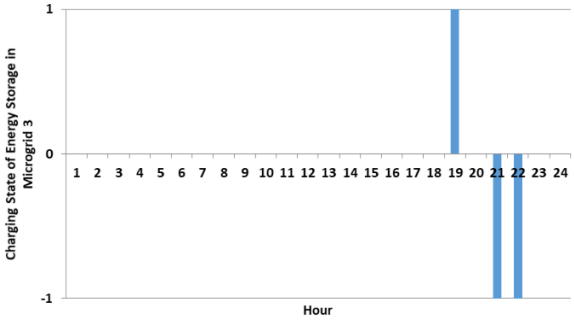
شکل ۱۲: واحدهای تولید مرسوم در هر ریزشبکه



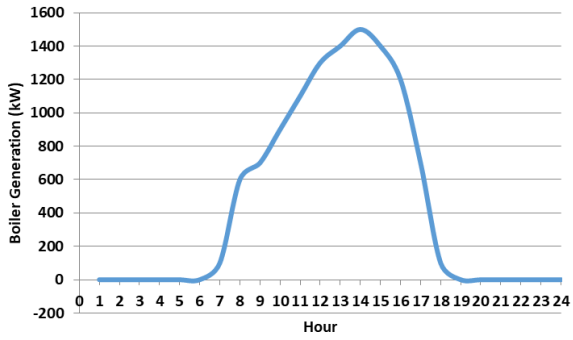
شکل ۱۳: واحدهای تولید CHP در ریزشبکه ها



شکل ۱۴: وضعیت شارژ ESS در ریزشبکه ۱



شکل ۱۵: وضعیت شارژ ESS در ریزشبکه ۳



شکل ۱۶: تولید انرژی حرارتی توسط دیگ بخار در ریزشبکه ۳

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی عملیاتی بهینه یک ریزشبکه چندگانه به صورت ائتلافی پیشنهاد شده است. نظریه بازی برای مدل‌سازی استقلال تصمیم‌گیری برای اپراتور مرکزی و اپراتورهای محلی استفاده می‌شود. در این مدل امکان تعامل دو طرفه بین تصمیمات اپراتورهای محلی و اپراتور مرکزی وجود دارد. به این ترتیب، همزمان دغدغه‌های تک تک ریزشبکه‌ها مانند تأمین نیازهای الکتریکی و حرارتی و همچنین حداکثر کردن سودآوری برآورده می‌شود. از سوی دیگر اهداف کلی ائتلاف نیز فراهم خواهد شد. در مدل پیشنهادی از انعطاف-پذیری سیستم با استفاده از حضور بارهای پاسخگو و همچنین سیستم-های ذخیره انرژی استفاده می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان تصمیم مناسب برای تبادل انرژی بین ریزشبکه ها را با در نظرگرفتن اهداف تمام بازیکنان بازی ائتلاف درنظرگرفت و به این ترتیب اهداف ائتلاف را دنبال کرد.

مراجع

[1] Karthik, N., et al., "*A review of optimal operation of microgrids*", International Journal of Electrical and computer engineering, 2019. 14(1): 1-8.

[2] Haddadian, H. and Noroozian, R., "*Multi-microgrids approach for design and operation of future distribution networks based on novel technical indices*", Applied Energy, 2017. 185: 650-663.

[3] Du, Y., et al., "*A cooperative game approach for coordinating multi-microgrid operation within distribution systems*", Applied Energy, 2018. 222: 383-395.

[4] Arefifar, S. A., Ordonez, M., and Abdel-Rady I. Mohamed, Y., "*Energy Management in Multi-Microgrid Systems-Development and Assessment*", IEEE Transactions on Power Systems, 2017. 32 (2): 910-922.

[5] Karimi, H., and Jadid, S., "*Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs*": A stochastic multi-objective framework, Energy, 2020.

[6] Hasankhani, A., and Hakimi, S. M., "*Stochastic energy management of smart microgrid*" with intermittent renewable energy resources in electricity market, Energy, 2021. 219.

[7] Leeuwen, G., et. al., "*An integrated blockchain-based energy management platform*" with bilateral trading for microgrid communities, Applied Energy, 2020. 263.

[8] Kermani, M., et. al., "*Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications*", Renewable Energy, 2021. 171. 1115-1127.

[9] Kumar, P. S., et. al., "*Energy Management System for Small Scale Hybrid Wind Solar Battery Based Microgrid*", IEEE Access, 2020. 8. 8336-8345.

[10] Ferahtia, S., et. al., "*Optimal control and implementation of energy management strategy for a DC microgrid*", Energy, 2022. 238.

[11] Dong, Y., et. al., "*Multi-objective economic environmental energy management microgrid using hybrid energy storage implementing and developed Manta Ray Foraging Optimization Algorithm*", Electric Power System Research, 2022. 211.

[12] Leonori, S., et. al., "*Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms*", Applied Soft Computing, 2020. 86.

[13] Hajiamoosha, P., et. al., "*Stochastic energy management in a renewable energy-based microgrid considering demand response program*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021. 129.

[14] Harsh, P., and Das, D., "*Energy management in microgrid using incentive-based demand response and reconfigured network considering uncertainties in renewable energy sources*", Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021. 46.

[15] Hou, J., Yu, W., Xu, Z., Ge, Q., Li, Z., Meng, Y., "*Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty*", Electric Power Systems Research, 2022. 216.

[16] Movahednia, M., Karimi, H., Jadid, S., "*A cooperative game approach for energy management of interconnected microgrids*", Electric Power Systems Research, 2022. 213.

[17] ShafiulAlam, M., et. al., "*Energy management in DC microgrid with an efficient voltage compensation mechanism*", Electric Power Systems Research, 2023. 214.

[18] Rahimi, M., et. al., "*Probabilistic reliability management of energy storage systems in connected/islanding microgrids with renewable energy*", Electric Power Systems Research, 2023. 214.

[19] Li, Z., et. al., "*A novel two-stage energy management of hybrid AC/DC microgrid considering frequency security constraints*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. 146.

[20] Chopra, C., et. al., "*Power-flow-based energy management of hierarchically controlled islanded AC microgrids*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022. 141.

[21] Dashtaki, A., et. al., "*Optimal management algorithm of microgrid connected to the distribution network considering renewable energy system uncertainties*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. 145.

[22] Saki, R., et. al., "I*nteractive Multi-level planning for energy management in clustered microgrids considering flexible demands*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022. 138.

[23] Chen, S. X., Gooi, H. B., and Wang, M. Q., "*Sizing of Energy Storage for Microgrids*", IEEE Transactions on Smart grid, 2012. 3(1): 142-151.

[24] Azami, R., Haghifam, M. R., and Aflaki, K., "*Stochastic Energy and Spinning Reserve Market with Considering Smart Transmission Switching Action*", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015. 6(2): 491 - 498.

[25] Yang, P., and Nehorai, A., "*Joint Optimization of Hybrid Energy Storage and Generation Capacity With Renewable Energy*", IEEE Transactions on Smart Grid, , 2014. 5(4): 1566 - 1574.

[26] [Conejo, A.J., Baringo Morales, L., Jalal, K., Siddiqui, A.S., "*Investment in Electricity Generation and Transmission: Decision Making under Uncertainty*", Springer International Publishing, 2016.

[27] Hawkes, A. D., and Leach, M. A., "*Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid*", Applied Energy, 2009, 86 (7): 1253-1265.

[28] Hajipour, E., Bozorg, M., and Fotuhi-Firuzabad, M., "*Stochastic Capacity Expansion Planning of Remote Microgrids With Wind Farms and Energy Storage*", 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Presenting a comprehensive management plan for the operation of a multiple microgrid based on economic and environmental considerations with a game theory approach

Mahdi Abolhassan beygi[1], Soodabeh Soleymani[2*], Seyed Babak Mozafari[3], Reza Sharifi[4]

1-Department of Electrical Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran
2-Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3-Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4-Department of Electrical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract: In this article, a comprehensive management plan for the operation of a multiple microgrid will be presented based on economic and environmental considerations with the formation of a coalition between microgrids with the aim of increasing the profit of microgrid operation. The proposed model is formulated as a multilevel optimization problem with a game theory approach. At the local level, the environmental and economic dual-objective optimization problem is presented for each microgrid based on distributed production and renewable energy resources. Since the problem of planning for electrical and thermal loads is applied, therefore, energy carriers such as electrical energy and fuel required by power plants are included in the optimization plan, and due to the penetration of scattered productions based on renewable energies, there is uncertainty in power. output in the microgrid, in the proposed structure, two practical tools are proposed for the optimal use of this equipment and increasing the profit of the microgrid operator, the first tool is the optimal use of energy storage resources and the second tool is responsive loads and the management plan of these loads in order to achieve The objectives of the microgrid operator will be. In this research, particle consensus algorithm as well as game theory-based modeling are used for optimization, simulation is done using Games software, and its results are implemented by implementing a collaboration space and forming a coalition between microgrids and distribution network. It has significantly reduced the final costs of the collection.

Keywords: response Multiple microgrids, distributed generation sources, game theory, renewable energies, multilevel optimization

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.7.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]