مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن قیود پخش بار و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

فرید حمزه اقدم[1]، دانشجوی دکتری، نوید تقی‌زادگان کلانتری[2]، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران
f.hamzehaghdam@azaruniv.edu –

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران
taghizadegan@azaruniv.edu –

چکیده: در این مقاله، شیوه مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن قیود پخش بار با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده است. این مدیریت انرژی سهم دقیق تولید یا مصرف انرژی در واحدهای گوناگون موجود در ریزشبکه‌های چندگانه را مشخص می‌کند. روش پیشنهادی به صورت سلسله مراتبی انجام می‌یابد؛ به این طریق که در ابتدا هر ریزشبکه یک برنامه‌ریزی محلی برای مشترکین و منابع تولید انرژی خود انجام می‌دهد و توان مازاد یا تأمین نشده آن‌ها معین می‌شود. سپس، بهره‌بردار مستقل سیستم توزیع، با در نظر گرفتن قیود پخش بار، میزان تبادل انرژی را معین می‌نماید. ذخیره‌سازهای انرژی نیز به منظور حفظ تعادل میان تولید توان توسط منابع انرژی تجدیدپذیر و بار مصرفی در نظر گرفته شده‌اند. هم‌چنین، برنامه پاسخ‌گویی بار با هدف هموار کردن منحنی بار و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت روش پیشنهادی بر روی ریزشبکه‌های چندگانه، با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB شبیه‌سازی شده است.

واژه های کلیدی: مدیریت انرژی، قیود پخش بار، ریزشبکه‌های چندگانه، توربین بادی، پنل خورشیدی، ذخیره‌ساز انرژی، برنامه پاسخگویی بار

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۰۶/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۸/۲۸
نام نویسنده‌ی مسئول : نوید تقی زادگان کلانتری
نشانی نویسنده‌ی مسئول : – دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

۱- مقدمه

افزایش مصرف انرژی، نگرانی‌های زیست‌محیطی، مسائل مربوط به بهبود قابلیت اطمینان[۱] و پایداری انرژی برق، و هم‌چنین ورود منابع تولید پراکنده[۲]، انرژی‌های تجدیدپذیر[۳] و ذخیره‌سازهای انرژی[۴] به سیستم‌های قدرت، مسائل ایجاد شده در سیستم‌های قدرت نوین می‌باشد. ریزشبکه‌ها[۵]، نقشی اساسی و پررنگ در تبدیل سیستم‌های قدرت سنتی به سیستم‌های هوشمند، دارند. ریزشبکه مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی، بارها و مبدل‌های واسط است که قابلیت عمل‌کرد به دو صورت جزیره‌ای[۶] و متصل به شبکه[۷] را داراست. ریزشبکه ها عموماً به منظور حداکثر کردن سود خود به صورت متصل به شبکه و برای افزایش قابلیت اطمینان و عدم قطعی بار در شرایط بحرانی و اضطراری و هم‌چنین تعمیرات دوره‌ای، به صورت جزیره‌ای عمل می‌کنند [۱, ۲].

ورود ریزشبکه‌ها به سیستم‌های قدرت، چالش‌هایی مانند بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهینه آن‌ها، به همراه داشته است. این چالش‌ها را می‌توان ناشی از عدم قطعیت در توان تولیدی منابع تولید پراکنده، تغییرات قیمت برق در بازار انرژی، تغییرات تقاضای بار و ورود گسترده خودروهای برقی دانست. با ورود گسترده ریزشبکه‌ها، مدیریت انرژی[۸] و بهره‌برداری از سیستم‌هایی با چندین ریزشبکه، تحت عنوان ریزشبکه‌های چندگانه[۹] مطرح می‌شود. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در ارتباط با مسائل مربوط به ریزشبکه‌های چندگانه انجام یافته است. هدف اصلی در غالب این پژوهش‌ها، کاهش هزینه بهره‌برداری، حفظ حریم مشترکین و هم‌چنین بهبود قابلیت اطمینان، می باشد.

یک ریزشبکه ممکن است دارای منابع تولید انرژی قابل کنترل و یا منابع انرژی تجدیدپذیر که ماهیتی تصادفی دارند، باشد که وجود یک سیستم مدیریت انرژی را برای تأمین بارهای ریزشبکه و بهره‌برداری بهینه در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه، اجتناب ناپذیر می‌کند. این سیستم مدیریت انرژی، وظیفه برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید انرژی قابل کنترل و ذخیره‌سازهای انرژی را با هدف تأمین توان مورد نیاز مشترکین، بر عهده دارد. ساختار این سیستم مدیریت انرژی، با توجه به اهداف سیستم، می‌تواند به صورت متمرکز، غیر متمرکز و یا ترکیبی باشد. روش‌های گوناگونی مانند الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی مقاوم[۱۰]، بهینه‌سازی تصادفی[۱۱] و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط[۱۲]، در منابع مختلفی به منظور برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه چندگانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر آن، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار[۱۳] با هدف هموار کردن منحنی روزانه بار، به کار گرفته شده‌اند [۳].

نویسندگان در مقالات [۳, ۴]، سیستم مدیریت انرژی متمرکز و غیر متمرکز ریزشبکه‌های چندگانه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مرجع [۵] نیز یک شیوه مدیریت انرژی هماهنگ دولایه، برای عمل‌کرد ریزشبکه‌های چندگانه به صورت جزیره‌ای و متصل به شبکه ریزشبکه‌ها، ارائه نموده است. یک شیوه مدیریت انرژی مقاوم برای ریزشبکه‌های دارای عدم قطعیت ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر، در منبع [۶] معرفی شده‌است. هووانگ و همکاران در مرجع [۷]، یک شیوه مدیریت انرژی توزیع شده بر اساس داده‌های مربوط به مبادله انرژی ریزشبکه‌های همسایه، ارائه کرده‌اند. هم‌چنین یک سیستم مدیریت انرژی بهینه و هماهنگ برای ریزشبکه‌های چندگانه در کنار معرفی شاخصی جدید برای مدل‌سازی عدم قطعیت، در مرجع [۸] معرفی شده است. نویسندگان در مرجع [۹] نیز به معرفی یک روش مدیریت انرژی بر اساس پخش بار پسرو-پیشرو[۱۴] احتمالاتی و شبیه سازی مونت کارلو[۱۵]، در ریزشبکه‌های چندگانه، پرداخته‌اند. روش ارائه شده در مرجع [۱۰]، یک روش مدیریت انرژی نوین برای ریزشبکه‌ها با هدف حفظ حریم مشترکین می‌باشد. در مقاله [۱۱]، یک مدل پاسخگویی بار بر اساس قیمت زمان واقعی[۱۶] ارائه گردیده و در کنار آن، نویسندگان در مراجع [۱۲, ۱۳] به بررسی اثرات برنامه‌های پاسخگویی بار بر روی شبکه‌های توزیع هوشمند با ورود خودروهای برقی پرداخته‌اند. در مرجع [۱۴] یک شیوه برنامه‌ریزی بهینه برای ذخیره‌سازهای انرژی در ریزشبکه‌های متصل به شبکه، پیشنهاد شده است. مرجع [۱۵] نیز به بررسی اثرات ذخیره‌سازهای انرژی بر روی ریزشبکه‌های جزیره‌ای، اختصاص یافته است. مرجع [۱۶] یک سیستم مدیریت انرژی نوین پویا، برای عمل‌کرد هماهنگ ریزشبکه‌های چندگانه، ارائه داده است. برنامه‌ریزی ریزشبکه‌های جزیره‌ای بر اساس سیستم‌های چند عاملی[۱۷] نیز در مرجع [۱۷]، مورد بررسی قرار گرفته است. نویسندگان در منبع [۱۸]، یک ساختار دولایه با ویژگی‌های سیستم‌های چند عاملی، برای مدیریت انرژی ریزشبکه‌های گوناگون ارائه نموده‌اند. ژیائو و همکاران در [۱۹]، یک مدیریت انرژی چند سطحی برای ریزشبکه‌های DC با هدف بهبود قابلیت اطمینان و کیفیت توان پیشنهاد داده‌اند. در مرجع [۲۰]، یک استراتژی کنترلی چندعاملی به منظور تبادل توان به صورت هماهنگ میان ذخیره‌سازهای انرژی در ریزشبکه‌های DC ارائه شده است.

روش‌های متمرکز، فاقد ویژگی مقیاس‌پذیری می‌باشند [۲۱] و در طرف مقابل، روش‌های غیرمتمرکز نیز به وجود سطح هماهنگی بالا میان منابع تولید انرژی، بارها و ذخیره‌سازهای انرژی، نیاز دارند که این امر نیز تنها با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری محلی امکان‌پذیر می‌باشد و بنابراین فاقد کارایی لازم هستند [۲۲]. به منظور برطرف نمودن مشکلات موجود در روش‌های متمرکز و غیرمتمرکز، شیوه‌های ترکیبی و سلسله مراتبی توسط محققین پیشنهاد شده‌اند. مدیریت انرژی ترکیبی چند عاملی در مراجع [۲۳, ۲۴] پیشنهاد شده‌اند و نویسندگان مرجع [۲۵]، یک روش مدیریت انرژی بهینه در ریزشبکه‌های چندگانه به همراه عمل‌کرد هماهنگ آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند. به علاوه در مرجع [۲۶]، یک شیوه بهینه‌سازی مدل‌محور برای تبادلات انرژی کوتاه‌مدت در ریزشبکه‌های چندگانه ارائه شده است. یک شیوه سلسله مراتبی با در نظر گرفتن میزان کمبود یا مازاد انرژی هر ریزشبکه، به همراه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

معرفی مفهوم توان قابل انطباق، برای مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه و با هدف کاهش هزینه‌های کلی بهره‌برداری در منبع [۲۷] پیشنهاد شده‌است.

شیوه مدیریت انرژی در این مقاله مشابه شیوه ارائه شده در مراجع [۲۶] و [۲۷] می‌باشد. در این شیوه مدیریت انرژی، یک بهره‌بردار مستقل سیستم[۱۸]، به عنوان بهره‌بردار سیستم ریزشبکه‌های چندگانه، و با در نظر گرفتن قیود امنیتی[۱۹] (پایداری ولتاژ و محدودیت توان عبوری از خطوط) و پخش بار و در نظر گرفتن تلفات سیستم، میزان تبادل توان میان ریزشبکه‌های مختلف را به صورت هماهنگ با یکدیگر تعیین می‌کند. در شیوه این مقاله، ابتدا هر ریزشبکه، یک مدیریت انرژی به صورت محلی انجام می‌دهد. در انجام این مدیریت انرژی محلی، از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار نیز به منظور هموار کردن سطح منحنی بار، استفاده می‌شود. با مشخص شدن میزان مازاد یا کمبود انرژی، بهره‌بردار مستقل سیستم، بر اساس ظرفیت خطوط و در نظر گرفتن قیود امنیتی فرمان تبادل انرژی میان ریزشبکه‌ها را صادر می‌کند. به عبارت دیگر یک مدیریت انرژی کلی، در مقابل مدیریت انرژی محلی هر یک از ریزشبکه‌ها، انجام می‌یابد. این مدیریت انرژی بر اساس قیمت تمام شده برای خرید از هر یک از ریزشبکه‌ها، قیمت انرژی منابع تولید پراکنده و یا سیستم‌های ذخیره ساز پراکنده مستقل که در هیچ کدام از ریزشبکه‌ها نیستند، انجام می‌یابد. با مشخص شدن میزان توان‌های تبادلی، یک واحد تنظیم‌کننده بازار[۲۰]، هر یک از ریزشبکه‌ها را ملزم به پیروی از مبادلات تعیین شده می‌نماید.

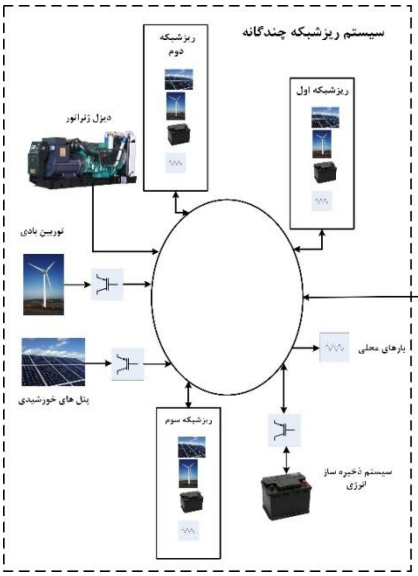
با بزرگ شدن سیستم، حل چنین مسائلی با روش‌های ریاضی بسیار دشوار و زمان‌بر خواهد شد. بنابراین از یک روش هوشمند برای حل این بخش از مدیریت انرژی استفاده می‌شود. به صورت کلی، دست‌آوردهای این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- در این روش مدیریت انرژی ریزشبکه‌های چندگانه، با در نظر گرفتن قیود امنیتی و پخش بار، میزان تبادل انرژی میان ریزشبکه‌های گوناگون، معین می‌شود.
- در این مقاله، در مدیریت انرژی، تابع هزینه برای سیستم ذخیره‌ساز انرژی با برطرف کردن ایرادات موجود در مقالات قبلی، مد نظر قرار می‌گیرد.
- برنامه پاسخ‌گویی بار با هدف هموار ساختن منحنی بار، در روش مدیریت انرژی گنجانده شده است.
- در مدیریت انرژی این مقاله، از یک روش ترکیبی که متشکل از روش‌های ریاضی و هوشمند می‌باشد، استفاده شده است که این روش می‌تواند منجر به سرعت بالاتر اجرای برنامه در شبکه‌های بزرگ بشود.
- روش پیشنهادی روی سیستم توزیع اکتیو و درحضور ریزشبکه‌ها، با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی ارائه گردیده است.

محتویات بخش‌های مختلف مقاله نیز به شرح زیر است: بخش دوم مقاله، به مدل‌سازی سیستم اختصاص دارد. بخش سوم به فرمول‌بندی مسئله در قالب یک مسئله بهینه‌سازی اختصاص یافته است. بخش بعدی به معرفی الگوریتم پرداخته است. در بخش‌های پایانی، شبیه‌سازی روش پیشنهادی و نتیجه‌گیری مقاله ارائه گردیده است.

۲- مدل‌سازی اجزای سیستم

در این مقاله، به منظور بررسی شیوه پیشنهادی، از یک سیستم با ریزشبکه چندگانه، در کنار منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، استفاده گردیده است. سیستم ریزشبکه چندگانه متشکل از ریزشبکه‌های مستقل، منابع تولید انرژی پراکنده قابل کنترل (از جمله دیزل‌ژنراتورها) وغیر قابل کنترل (منابع انرژی خورشیدی و بادی)، یک ذخیره‌ساز انرژی و تعدادی بار می‌باشد. هر ریزشبکه نیز شامل یک منبع تولید انرژی قابل کنترل، سیستم خورشیدی، توربین بادی، ذخیره‌ساز انرژی و تعدادی بار است. ساختار کلی این سیستم، در شکل (۱) نشان داده شده است. در ادامه به بررسی مدل‌های هر یک از اجزا می‌پردازیم.



شکل (۱): ساختار سیستم ریزشبکه چندگانه متشکل از ریزشبکه‌های مستقل، منابع تولید انرژی پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و تعدادی بار.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

۲-۱- منابع تولید پراکنده سنتی

منابع تولید پراکنده سنتی، از جمله دیزل‌ژنراتورها، از منابع تولید انرژی قابل کنترل می‌باشند. خروجی توان این منابع و محدودیت تولید آن‌ها از روابط زیر به دست می‌آید.

$$0 \le P_{gen}(t) \le U_{gen}(t).P_{gen}^{Max}, U_{gen}(t) \in \{0,1\} \quad (۱)$$

$$\left|P_{gen}(t) - P_{gen}(t-1)\right| \le r_{gen} \times P_{gen}^{Max} \quad (۲)$$

در این روابط، $P_{gen}(t)$ و P_{gen}^{Max} به ترتیب توان تولیدی توسط منبع در زمان t و حداکثر ظرفیت منبع می‌باشند. متغیر $U(t)$ نیز یک متغیر باینری می‌باشد.

در این مقاله، هزینه تولید توان توسط این منبع به وسیله یک مدل درجه دو ارائه گردیده است [۶].

$$C_t(P_{gen}) = \alpha P_{gen}^2(t) + \beta P_{gen}(t) + c \quad (۳)$$

در رابطه مذکور، ضرایب α، β و c، مقادیر ثابت هستند که برای هر ژنراتور منحصر به فردند. به علاوه، برای این منابع، می‌توان هزینه راه‌اندازی نیز در نظر گرفت که در قالب روابط (۴) و (۵) ارائه می‌گردد [۲۷].

$$C_{startup} = y(t) \times C^{SU} \quad (۴)$$

$$y(t) = \max\{(U_{gen}(t) - U_{gen}(t-1), 0)\} \quad (۵)$$

در روابط فوق، C^{SU} هزینه شروع به کار ژنراتور است و $y(t)$ نیز نشان‌دهنده تغییر وضعیت ژنراتور از حالت خاموش به حالت روشن است.

۲-۲- منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر

سیستم‌های خورشیدی و توربین‌های بادی در این مقاله به عنوان منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، در نظر گرفته شده‌اند. خروجی توان چنین واحدهایی به عنوان تابعی از شرایط زیست محیطی از جمله دما، میزان تابش خورشید و سرعت باد در نظر گرفته می‌شود. روش‌های زیادی برای پیش‌بینی خروجی این واحدها در مقالات مختلف مطرح گردیده است [۲۸, ۲۹] که از اهداف این مقاله خارج است.

۲-۳- سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری)

سیستم ذخیره‌ساز هر ریزشبکه، متشکل از باتری‌ها می‌باشد. روابط (۶) تا (۱۳) نشان‌دهنده معادلات مربوط به باتری است[۲۷].

$$0 \le P_{bat_ch}(t) \le U_{bat_ch}(t) \cdot P_{bat_cap} \cdot (1 - SOC(t-1)) \cdot \frac{1}{1 - P_{bat_ch}^{loss}} \cdot \frac{1}{\eta_{conv}} \quad (۶)$$

$$0 \le P_{bat_disch}(t) \le U_{bat_disch}(t) \cdot P_{bat_cap} \cdot SOC(t-1) \cdot (1 - P_{bat_disch}^{loss}) \cdot \eta_{conv} \quad (۷)$$

$$0 \le P_{bat_ch}(t) \le U_{bat_ch}(t) \cdot \frac{P_{conv_cap}}{\eta_{conv}} \quad (۸)$$

$$0 \le P_{bat_disch}(t) \le U_{bat_disch}(t) \cdot \frac{P_{conv_cap}}{\eta_{conv}} \quad (۹)$$

$$U_{bat_ch}(t) + U_{bat_disch}(t) \le 1, \quad U_{bat_ch}(t), U_{bat_disch}(t) \in \{0,1\} \quad (۱۰)$$

$$SOC(t) = SOC(t-1) - \frac{1}{P_{bat_cap}} \cdot \left(\frac{1}{1 - P_{bat_disch}^{loss}} \cdot \frac{1}{\eta_{conv}} \cdot P_{bat_disch}(t) - (1 - P_{bat_ch}^{loss}) \cdot \eta_{conv} \cdot P_{bat_ch}(t)\right) \quad (۱۱)$$

$$0 \le SOC(t) \le 1 \quad (۱۲)$$

$$SOC(t_0) = SOC_{initial} \quad (۱۳)$$

$$SOC(T) = SOC_{final} \quad (۱۴)$$

در معادلات فوق، $P_{bat_ch}(t)$ و $P_{bat_disch}(t)$، نشان‌دهنده نرخ شارژ و دشارژ باتری، P_{bat_cap} بیانگر حداکثر ظرفیت باتری، SOC نمایانگر میزان شارژ و وضعیت باتری، $P_{bat_disch}^{loss}$ و $P_{bat_ch}^{loss}$ نشان‌دهنده میزان تلفات در هنگام شارژ و دشارژ و در نهایت η_{conv} و P_{conv_cap} نمایانگر بازده و ظرفیت مبدل الکترونیک قدرت واسط باتری می‌باشند. روابط (۹)-(۶) قیود مربوط به نرخ شارژ و دشارژ باتری را بیان می‌کنند. به دلیل آن‌که باتری به طور همزمان نمی‌تواند شارژ و دشارژ بشود، قید (۱۱) تعریف گردیده است که در آن، $U_{bat_ch}(t)$ و $U_{bat_disch}(t)$ متغیرهای باینری هستند. مدل باتری در این مقاله، ایرادات مدل ارائه شده در مرجع [۲۷] برطرف و آن را کامل‌تر می‌کند. رابطه (۱۱) مدل دینامیکی انرژی را در هر زمان برای باتری نشان می‌دهد. روابط (۱۲)-(۱۴) نیز بیان‌گر قید ذخیره‌سازی انرژی در باتری، انرژی اولیه و نهایی در ابتدا و انتهای بازه زمانی مدیریت انرژی، می‌باشند.

هزینه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز باتری نیز توسط رابطه (۱۵) ارائه شده است. در این مدل، سه نوع هزینه برای آسیب‌هایی که باتری در هنگام بهره‌برداری به خود می‌بیند، در نظر گرفته شده است: ۱) هزینه شارژ سریع؛ ۲) هزینه تغییرات متوالی شارژ و دشارژ؛ ۳) هزینه خالی شدن شدید باتری [۳۰]. مدل ارائه شده برای هزینه، ایرادات مدل مرجع [۳۰]، در بخش تغییر وضعیت‌های متوالی شارژ و دشارژ را نیز برطرف می‌سازد.

$$C_{bat} = \alpha_{bat} \cdot \sum_t \left[P_{bat_ch}^2(t) + P_{bat_disch}^2(t)\right] + \beta_{bat} \cdot \sum_t \left[P_{bat_ch}(t) \cdot P_{bat_disch}(t+1) + P_{bat_disch}(t) \cdot P_{bat_ch}(t)\right] + \gamma_{bat} \cdot \sum_t \left[\min\left(SOC(t) - \delta_{bat}, 0\right)\right]^2 \quad (۱۵)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

در رابطه بالا، ضرایب α_{bat}، β_{bat} و γ_{bat} دارای مقادیر ثابتی هستند که به منظور مصالحه میان هزینه‌های گوناگون ذکر شده، هستند. ضریب δ_{bat} نیز نشان‌دهنده حداقل انرژی ذخیره شده در باتری، به منظور جلوگیری از دشارژ شدید باتری می‌باشد. برای مثال، اگر بر δ_{bat} برابر ۰/۱۵ باشد، به آن معنی است که رسیدن سطح انرژی در باتری به میزان کمتر از ۱۵ درصد ظرفیت باتری موجب صدمه دیدن باتری و ایجاد هزینه می‌گردد.

۲-۴- مدل توان تأمین نشده و توان مازاد

به هنگام بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها، به دلیل تصادفی بودن ماهیت منابع انرژی تجدیدپذیر و یا پایین و بالا بودن قیمت انرژی در شبکه بالادستی از هزینه‌های بهره‌برداری منابع قابل کنترل محلی، مفهوم توان تأمین نشده ($P_{shortage}$) و توان مازاد ($P_{surplus}$) مطرح می‌گردد. بهره‌بردار هر ریزشبکه، می‌تواند بر اساس قیمت انرژی توان مازاد خود را به شبکه بالادستی بفروشد. در طرف مقابل نیز، در صورت وجود توان تأمین نشده و کمبود انرژی در داخل ریزشبکه و عدم توانایی منابع محلی در تأمین توان مشترکین، بهره‌بردار با توجه به قیمت برق، از شبکه بالادستی توان می‌خرد.

۲-۵- بارها

دو نوع بار در این مقاله در نظر گرفته شده است. نوع اول، بارهای با قابلیت جابه‌جایی زمانی و هم‌چنین بارهای قابل قطع هستند و نوع دوم بارهای ثابت می‌باشند. برای بارهای با قابلیت جابه‌جایی زمانی، نیاز هست تا مقدار مشخصی از انرژی مورد نیاز آن‌ها در طول بازه‌های زمانی مختلف تأمین گردد. در ارتباط با بارهای قابل قطع نیز با پرداخت یک جریمه می‌توان این نوع بارها را قطع نمود. بنابراین بارهای دسته اول، بارهایی با قابلیت مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هستند. در طرف مقابل، بارهای ثابت، بارهای حساس و غیرقابل قطع می‌باشند که می‌بایست توان درخواستی آن‌ها در همان زمان تأمین شود. روابط (۱۶) تا (۱۹) به ترتیب نشان‌دهنده حداقل و حداکثر و میزان انرژی بارهای قابل جابه‌جایی ، هزینه جابه‌جایی و هزینه قطع بار هستند.

$$P_{def}^{Min} \le P_{def}(t) \le P_{def}^{Max} \quad (۱۶)$$

$$E_{def}^{Min} \le \sum_{t=1}^{24} P_{def}(t) \le E_{def}^{Max} \quad (۱۷)$$

$$C_{def} = \psi \cdot \left[E_{def}^{Max} - \sum_{t=1}^{24} P_{def}(t) \right] \quad (۱۸)$$

$$C_{curt} = \zeta \cdot \left[\sum_{t=1}^{24} P_{curt}(t) \right] \quad (۱۹)$$

در روابط فوق، $P_{def}(t)$ مقدار بار قابل جابه‌جایی و P_{def}^{Min} و P_{def}^{Max} حداقل و حداکثر مقدار آن را نشان می‌دهند. E_{def}^{Min} و E_{def}^{Max} محدودیت های انرژی بار با قابلیت جابه‌جایی را تعیین می‌کنند. C_{def} هزینه جابه‌جایی بار و ψ یک مقدار ثابت است. $P_{curt}(t)$، C_{curt} و ζ نیز به ترتیب نشان‌دهنده مقدار بار قطع شده، هزینه قطعی بار و یک مقدار ثابت به عنوان جریمه قطعی بار می‌باشند.

۲-۶- مدل‌سازی شبکه

شبکه مربوط به سیستم توزیع را می‌توان به صورت یک شبکه شعاعی مدل‌سازی کرد. باس ۱، باس مرجع می‌باشد که به شبکه بالادستی وصل است و دارای میزان مبادله توان متغیر و ولتاژ ۱ در واحد مبنا[۲۱] می‌باشد.

هر خط میان باس‌های i و j دارای مقاومت R_{ij} و راکتانس X_{ij} می‌باشد. ولتاژ باس i با V_i و جریان عبوری از خط مذکور با I_{ij} نشان داده می‌شوند. توان خالص خروجی از هر باس در روابط زیر صادق است:

$$S_i(t) = S_i^{battery}(t) + S_i^{load}(t) - S_i^{gen}(t) \quad (۲۰)$$

$$S_i(t) = P_i(t) + jQ_i(t) \quad (۲۱)$$

در رابطه بالا، S_i، $S_i^{battery}$، S_i^{load} و S_i^{gen} به ترتیب نماینده توان مختلط خالص تزریقی، توان باتری، توان بار و توان ژنراتور در باس iام هستند. $P_i(t)$ و $Q_i(t)$ نیز توان حقیقی و توان راکتیو در باس i هستند.

معادلات پخش توان در یک شبکه شعاعی در قالب روابط زیر بیان می‌شوند [۳۱]:

$$P_j^{net}(t) = P_{ij}(t) - R_{ij} \cdot I_{ij}^2 - \sum P_{jq}(t) \quad (۲۲)$$

$$Q_j^{net}(t) = Q_{ij}(t) - X_{ij} \cdot I_{ij}^2 - \sum Q_{jq}(t) \quad (۲۳)$$

$$V_j^2(t) = V_i^2(t) - 2(R_{ij} \cdot P_{ij}(t) + X_{ij} \cdot Q_{ij}(t)) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) \cdot I_{ij}^2(t) \quad (۲۴)$$

$$I_{ij}^2(t) = \frac{S_{ij}^2(t)}{V_i^2(t)} \quad (۲۵)$$

$$V_{min} \le V_i(t) \le V_{Max} \quad (۲۶)$$

$$I_{min} \le I_{ij}(t) \le I_{Max} \quad (۲۷)$$

در بخش بعدی به بررسی روش حل مسئله مدیریت انرژی پرداخته‌خواهدشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

۳- مدیریت انرژی

در این قسمت به معرفی شیوه مدیریت انرژی در سیستم ریزشبکه‌های چندگانه می‌پردازیم. در روش مدیریت انرژی مورد مطالعه، توان مازاد و توان تأمین نشده، در ساعات مختلف در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا بهره‌بردار هر ریزشبکه یک مدیریت انرژی محلی انجام می‌دهد تا خروجی هر واحد و بارهای شرکت‌کننده در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار معین شود. بهره‌بردار مستقل سیستم توزیع نیز یا جمع‌آوری این اطلاعات یک مسئله مدیریت انرژی کلی انجام می‌دهد. سپس میزان توان تأمین شده یا خریداری شده هر واحد مشخص می‌شود تا دوباره بر اساس اطلاعات دریافتی، برنامه‌های خود را تغییر دهند. یک واحد تنظیم بازار به عنوان ناظر نیز وظیفه ملزم کردن بخش‌های گوناگون به برنامه اعلام شده توسط بهره‌بردار مستقل سیستم، را بر عهده دارد.

۳-۱- مدیریت انرژی محلی هر ریزشبکه

بهره‌بردار هر ریزشبکه با حل مسئله مدیریت انرژی تلاش می‌کند تا میزان هزینه‌های بهره‌برداری خود را حداقل نماید. رابطه زیر بیان‌گر تابع هدف بهره‌برداری بهینه ریزشبکه است که شامل هزینه ژنراتورها، باتری، هزینه ناشی از خرید توان از شبکه بالادستی، سود ناشی از فروش توان به شبکه بالادستی و هزینه‌های مربوط به برنامه‌های پاسخ-گویی بار می‌باشد.

$$\begin{aligned}\min & \sum_t \sum_i \left[C_t(P^i_{gen}) + C^i_{startup,t} \right] + C_{bat} \\ & + \sum_t \left[pr_t^{buy,DN} \cdot P_t^{shortage} - pr_t^{sell,DN} \cdot P_t^{surplus} \right] \\ & + \sum_i C_{def,i} + \sum_i C_{curt,i}\end{aligned} \quad (۲۸)$$

محدود به روابط (۱)، (۲)، (۵)-(۱۷)

در رابطه (۲۸) $pr_t^{buy,DN}$ و $pr_t^{sell,DN}$ قیمت‌های خرید و فروش برق از شبکه توزیع هستند.

۳-۲- مدیریت انرژی شبکه توزیع

بعد از مشخص شدن میزان خروجی واحدهای ریزشبکه‌ها، شبکه توزیع شروع به انجام فرآیند مدیریت انرژی خود می‌کند. تابع هدف در این مرحله مطابق رابطه (۲۹) است که در هدف آن به حداقل رساندن هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری شبکه توزیع در حضور ریزشبکه‌ها و منابع تولید پراکنده می‌باشد.

$$\begin{aligned}\min & \sum_t \sum_i \left[C_t(P^i_{gen_DN}) + C^i_{startup_DN,t} \right] \\ & + \sum_t \left[pr_t^{buy,utility} \cdot P_t^{buy_DN} - pr_t^{sell,utility} \cdot P_t^{sell_DN} \right] \\ & + \sum_t \left[pr_t^{buy,DN} \cdot P_{t,i}^{surpluss_MG} \right] \\ & + \sum_i C_{def_DN,i} + \sum_i C_{shed_DN,i}\end{aligned} \quad (۲۹)$$

محدود به روابط (۱)، (۲)، (۵)-(۱۷)، (۱۹)-(۲۷)

در رابطه فوق، $pr_t^{buy,utility}$ و $pr_t^{utility,DN}$ قیمت‌های خرید و فروش برق از شبکه توزیع هستند. $P_{t,i}^{surpluss_MG}$ میزان خرید شبکه توزیع از توان مازاد ریزشبکه iام است. هر ریزشبکه با مشخص شدن وضعیت خود شروع به برنامه‌ریزی دوباره واحدهای خود می‌کند.

با بزرگ شدن شبکه، حل مسئله مدیریت انرژی در سطح شبکه توزیع، با روش‌های ریاضی سخت‌تر می‌شود. بنابراین از یک روش هوشمند برای حل این مسئله استفاده می‌گردد.

۴- روش حل پیشنهادی

در این بخش فرایند حل مسئله مدیریت انرژی در سیستم ریزشبکه‌های چندگانه مورد بحث قرار خواهد گرفت. روش پیشنهادی ترکیبی از یک روش هوشمند به نام بهینه سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی[۲۲] (BBO) و یک روش ریاضی می‌باشد.

۴-۱- روش بهینه سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)

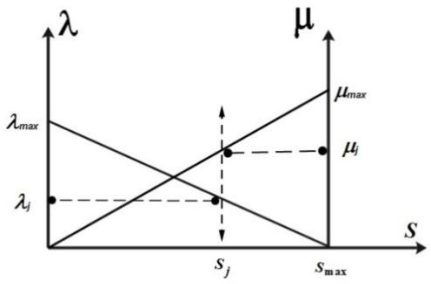
الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی یک الگوریتم بهینه سازی هوشمند است که برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ معرفی شده است [۳۲] و از چگونگی مهاجرت گونه های جانداران در زیستگاه های متعدد الهام گرفته است. این الگوریتم بر مبنای یک مدل ریاضی بر اساس ارائه مدلی احتمالی برای چگونگی مهاجرت گونه‌ها در زیستگاه، می‌باشد.

در این مدل، بخش‌های مناسب برای اسکان گونه‌های جغرافیایی، دارای شاخص صلاحیت[۲۳] (HSI) بالا می‌باشند. متغیرهای شاخص مناسب بودن[۲۴] (SIV) بر میزان کیفیت محل سکونت اثرگذار است. بنابراین بردار SIV میزان HSI هر منطقه جغرافیایی را نشان می‌دهد.

دو نرخ برای توصیف هر منطقه جغرافیایی تعریف می‌شود. این نرخ‌ها ، نرخ احتمال خروج (μ) و نرخ احتمال ورود (λ) به یک منطقه جغرافیایی می‌باشند. رابطه میان این نرخ‌ها و جمعیت یک ناحیه خاص (s) در شکل (۲) نشان داده شده است. واضح است که با افزایش جمعیت، میزان نرخ مهاجرت به آن ناحیه کم می‌شود و HSI بالا، منجر به افزایش جمعیت می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]



شکل (۲): رابطه بین احتمال خروج (μ) و احتمال ورود (λ) با جمعیت (s).

۴-۲- فرایند بهینه‌سازی

همان‌طورکه اشاره شد، HSI هر ناحیه وابسته به متغیرها یا SIV می‌باشد. بردار SIV متغیرهای تصمیم و HSI همان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی است. در مسئله مدیریت انرژی، میزان توان خروجی ژنراتورها، ذخیره‌سازها، بارهای قابل برنامه‌ریزی و هم‌چنین توان خریداری (فروخته) شده از (به) ریزشبکه‌ها یا شبکه فوق توزیع بردار SIV را تشکیل می‌دهند. فرآیند بهینه‌سازی به شکل زیر است.

مرحله ۱ : برنامه‌ریزی محلی ریزشبکه‌ها را انجام بده و خروجی‌ها را در اختیار بهره‌بردار شبکه توزیع قرار بده.

مرحله ۲ : مکان‌های جغرافیایی را به صورت تصادفی ایجاد کن و HSI مربوط به آن‌ها را محاسبه کن و کیفیت آن‌ها را ارزیابی کرده و آن‌ها را با یک‌دیگر ترکیب کن.

مرحله ۳ : مراحل ۴ تا ۱۲ را تا زمان اتمام تعداد تکرارهای مورد نظر تکرار کن.

مرحله ۴ : احتمال هر مکان جغرافیایی و نرخ خروج و ورود را بر اساس HSI آن حساب کن.

مرحله ۵ : مراحل ۶ تا ۱۰ را برای هر مکان جغرافیایی کاندید انجام بده.

مرحله ۶ : برای هر متغیر تصمیم φ در مکان جغرافیایی ω مانند $x_{\omega\varphi}$، مراحل ۷ تا ۱۰ را انجام بده.

مرحله ۷ : بر اساس احتمال ورود λ_i، $x_{\omega\varphi}$ را طبق مراحل ۸ تا ۱۰ تغییر بده.

مرحله ۸ : مبدأ مهاجرت را با توجه به احتمال خروج μ_i، به صورت تصادفی انتخاب کن.

مرحله ۹ : متغیر تصمیم را با استفاده از رابطه زیر تغییر بده.

$$x_{\omega\varphi}^{new} = x_{\omega\varphi} + \alpha_{\varphi} \cdot (x_{\beta\varphi} - x_{\omega\varphi}) \qquad (۲۹)$$

مرحله ۱۰ : برای در نظر گرفتن تنوع در فرآیند بهینه‌سازی، با به کار گیری یک تابع احتمالی معین مانند توزیع نرمال، تغییر در $x_{\omega\varphi}$ را به صورت زیر انجام بده.

$$x_{\omega\varphi}^{new} \sim N(x_{\omega\varphi}, \sigma^2) \qquad (۳۰)$$

در رابطه بالا، میانگین توزیع نمایی برابر متغیر تصمیم قبلی $x_{\omega\varphi}$، و انحراف معیار نیز وابسته به اختلاف میان حداقل و حداکثر مجاز متغیر تصمیم، بر اساس رابطه زیر است.

$$\sigma \propto (x_{\omega\varphi}^{Max} - x_{\omega\varphi}^{\min}) \qquad (۳۱)$$

مرحله ۱۱ : مکان‌های جغرافیایی را ارزیابی کن و بر اساس HSIشان، آن‌ها را ترکیب کن.

مرحله ۱۲ : بر اساس نرخ نگه‌داری، جمعیت جدید و جمعیت قبلی را ادغام کن تا جمعیت جدید حاصل شود.

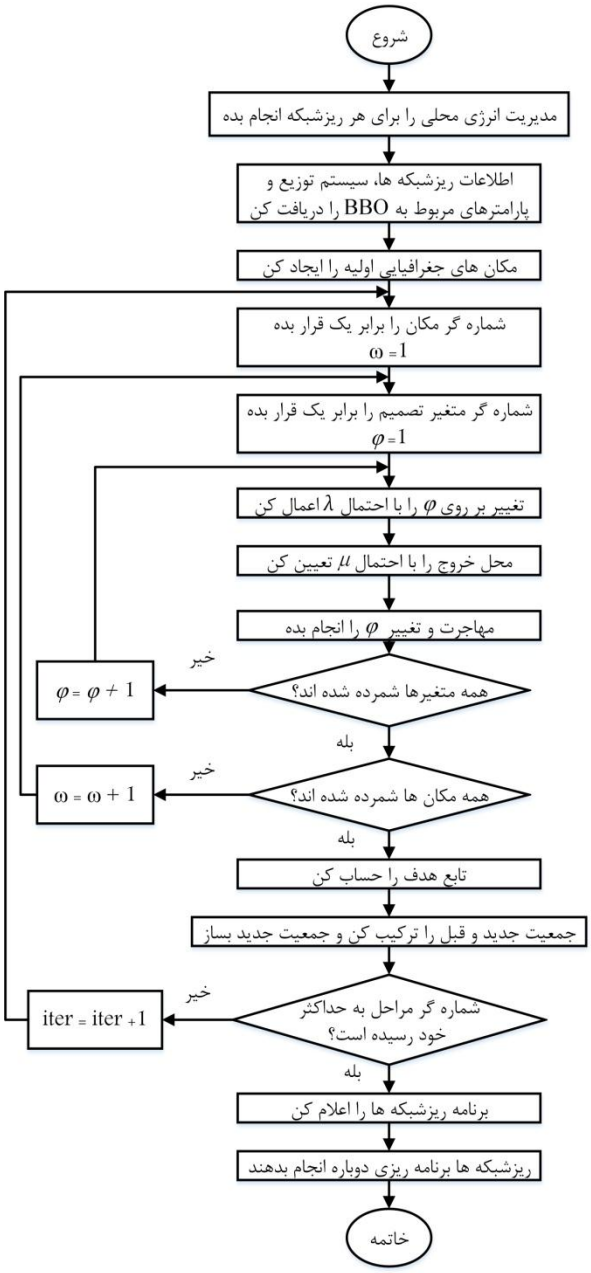
مرحله ۱۳ : نتایج را به ریزشبکه‌ها اعلام کن تا برنامه‌ریزی مجدد انجام دهند.

شکل (۳) این فرآیند را به صورت فلوچارت نمایش می‌دهد.

همان‌طورکه قبلا نیز اشاره شد، یک روش ترکیبی، به منظور مدیریت انرژی در سیستم ریزشبکه‌های چندگانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدیریت انرژی محلی ریزشبکه‌ها با استفاده از نرم‌افزار GAMS انجام می‌شود. در سطح سیستم توزیع، مدیریت انرژی با استفاده از خروجی نرم‌افزار GAMS و روش هوشمند BBO و به شکل مدل یک برنامه ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح انجام می‌یابد. در قسمت بعد به اجرای روش پیشنهادی در روی یک سیستم پیشنهادی پرداخته می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

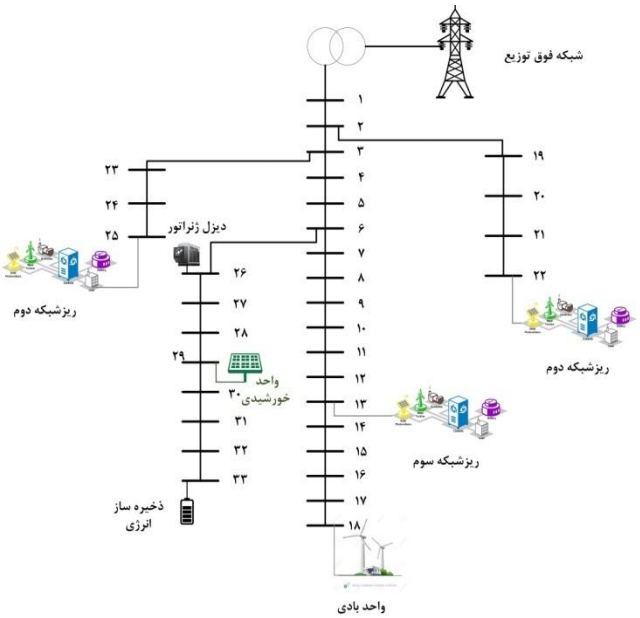


شکل (۳): فلوچارت روش مدیریت انرژی سیستم ریزشبکه چندگانه با استفاده از الگوریتم BBO

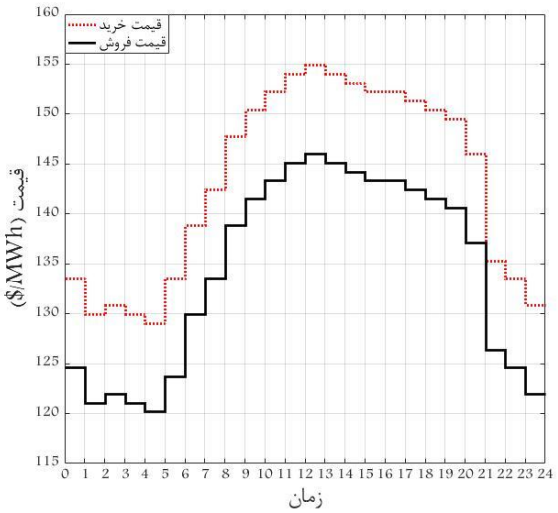
۵- شبیه‌سازی و مطالعات عددی

در این بخش شبیه‌سازی‌ها به منظور بررسی روش پیشنهادی ارائه خواهد شد. تحلیل‌گر BARONS در نرم‌افزار گمز به منظور مدیریت انرژی محلی ریزشبکه‌ها استفاده شده است. به علاوه الگوریتم BBO توسط نرم‌افزار MATLAB برای مدیریت انرژی شبکه توزیع پیاده شده است.

سیستم مورد مطالعه، شبکه توزیع استاندارد IEEE ۳۳ باسه می‌باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است. این شبکه شامل سه ریزشبکه مجزا، واحد خورشیدی، واحد بادی، ذخیره‌ساز انرژی و دیزل ژنراتور است. به علاوه، ریزشبکه‌های ۱ و ۲ شامل واحدهای مذکور می‌باشند؛ اما ریزشبکه سوم فاقد دیزل ژنراتور است. به علاوه، پارامترهای مربوط به واحدها، در جداول (۱) و (۲) موجود است. قیمت ساعتی خرید و فروش انرژی نیز در شکل (۵) نمایش داده شده است. این قیمت بر اساس قیمت تبادل انرژی در کشور کره جنوبی می‌باشد [۲۷]. شکل شماره (۶) نیز نشان‌دهنده منحنی بار ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع، در ساعات مختلف شبانه روز، قبل از اجرای برنامه‌های پاسخ-گویی بار می‌باشد.

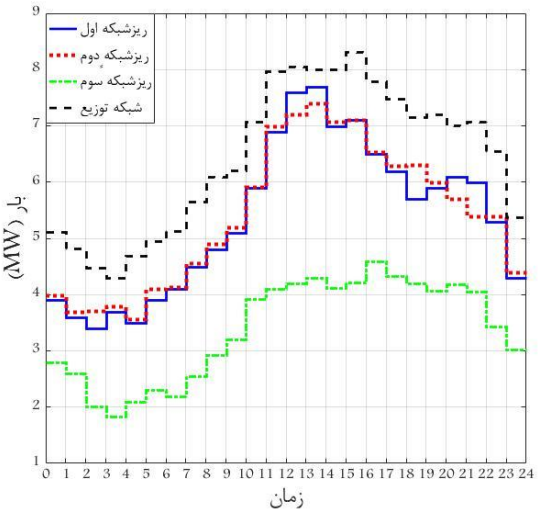


شکل (۴): سیستم ریزشبکه چندگانه مورد مطالعه



شکل (۵): قیمت خرید و فروش انرژی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]



شکل (۶): منحنی بار شبکه توزیع و ریزشبکه‌ها

جدول (۱): پارامترهای مربوط به دیزل‌ژنراتورها

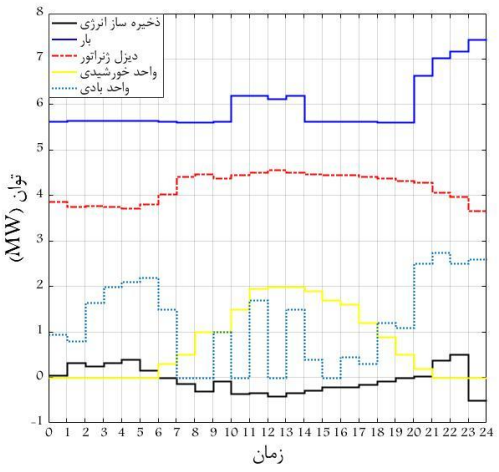
پارامتر	ریزشبکه اول	ریزشبکه دوم	شبکه توزیع
α	۱۵	۲۰	۱۲
β	۸۵	۸۰	۷۵
C	۰	۰	۰
C^{SU}	۱۵	۱۳	۱۵
r_{gen}	۰/۳	۰/۲	۰/۲
P_{gen}^{Max}	۴/۵	۱/۵	۲

جدول (۲): پارامترهای مربوط به ذخیره‌ساز انرژی

پارامتر	ریزشبکه اول	ریزشبکه دوم	ریزشبکه سوم	شبکه توزیع
ظرفیت (MWh)	۱	۱	۱	۳
انرژی اولیه (MWh)	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۱/۲
انرژی نهایی (MWh)	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱/۵
ظرفیت مبدل (KW)	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۷۵۰
بازدهی مبدل	۹۸	۹۸	۹۸	۹۹

نتایج مدیریت انرژی محلی ریزشبکه‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. به علاوه، جدول (۳) توان مازاد و توان تأمین نشده هر ریزشبکه را نشان می‌دهد. در ساعاتی که قیمت انرژی بالاست، نتایج مدیریت انرژی نشان می‌دهد که دیزل‌ژنراتور با حداکثر توان خود در حال تولید می‌باشد و در کنار آن، ذخیره‌ساز انرژی نیز در ساعاتی که قیمت انرژی بالاست، شروع به تخلیه شدن و در ساعاتی که قیمت پایین است، شروع به شارژ شدن می‌نمایند. به عنوان نمونه در ساعت ۱۲، در هر سه ریزشبکه توان باتری منفی است که به معنی تزریق توان به شبکه است و هم‌چنین در همین ساعت دیزل‌ژنراتور با حداکثر توان در حال کار کردن است. هم‌چنین با مقایسه شکل‌های (۶) و (۷) ملاحظه می‌شود که منحنی بار در پی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، هموارتر شده است. با مشاهده مقادیر جدول (۳) نیز مشخص است که در ساعاتی که انرژی ارزان است، ریزشبکه‌ها دارای توان تأمین نشده هستند و در ساعاتی که قیمت بالاست، ریزشبکه‌ها دارای توان مازاد می‌باشند. برای نمونه در ساعت ۳ که قیمت پایین است هر سه ریزشبکه دارای توان تأمین نشده هستند و این درحالیست که در ساعت ۱۲ که قیمت برق در حداکثر مقدار خود است، هر سه ریزشبکه دارای توان مازاد هستند. این نتایج با هدف حداقل کردن هزینه‌های بهره‌برداری هر ریزشبکه به دست آمده‌اند و برای ریزشبکه‌ها به صرفه است تا اینکه به جای تولید محلی، با شبکه بالادستی تبادل توان انجام دهند.

در شکل (۸) نیز برنامه‌ریزی شبکه توزیع نشان داده شده است. میزان توان خریداری شده از هر ریزشبکه در شکل مشخص شده است. در ساعات ۸ تا ۲۰، ریزشبکه‌ها به شبکه توزیع توان می‌فروشند که منجر به افزایش سود آن‌ها می‌شود. به علاوه، شبکه توزیع نیز با خرید انرژی با قیمت پایین‌تر نسبت به هزینه‌های تولید دیزل‌ژنراتورهای محلی خود، هزینه‌های بهره‌برداری خود را کاهش می‌دهد. بر اساس اعلام نیاز شبکه توزیع، ریزشبکه‌ها نیز برنامه‌ریزی واحدهای خود را تغییر می‌دهند. واحد تنظیم‌کننده بازار نیز بر اجرای این فرایندها نظارت می‌کند تا هیچ یک از شرکت‌کننده‌ها در فرایند مدیریت انرژی از برنامه‌ریزی‌های به دست آمده تخطی نکنند.

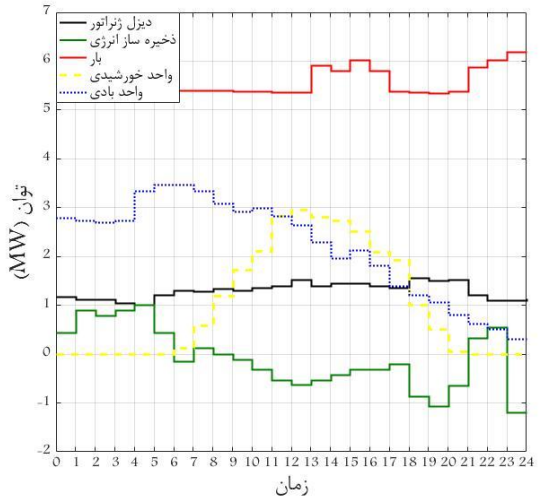


(الف)

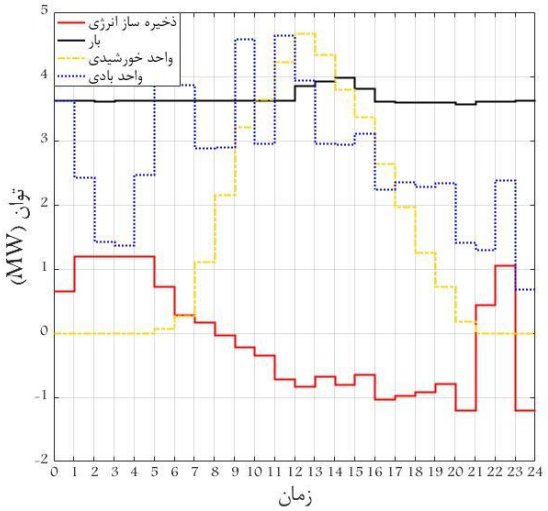
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

جدول (۳): توان تأمین نشده و مازاد ریزشبکه‌ها

زمان	توان مازاد (MW)			توان تأمین نشده (MW)		
	ریزشبکه اول	ریزشبکه دوم	ریزشبکه سوم	ریزشبکه اول	ریزشبکه دوم	ریزشبکه سوم
۰	۰	۰	۰	۱/۰۰۵	۱	۰/۲۶۴
۱	۰	۰	۰	۱/۵۷۴	۱/۶۹۸	۲/۳
۲	۰	۰	۰	۰/۶۴۹	۱/۵۶۵	۳/۲۴
۳	۰	۰	۰	۰/۴۲۴	۱/۹۳۵	۳/۶۳
۴	۰	۰	۰	۰/۴۳۶	۱/۴۴	۲/۲۵
۵	۰	۰	۰	۰	۱/۳۴۲	۰/۰۵۵
۶	۰	۰	۰	۰	۱/۱۶	۰
۷	۰	۰	۰	۰/۷۵۵	۰/۲۱	۰
۸	۰	۰/۴۹	۱/۲۸	۰	۰	۰
۹	۰/۶۵۲	۰/۶۱۲	۴/۲۲	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰/۴۲	۳/۱۵۴	۰	۰	۰
۱۱	۲/۰۷۲	۰/۴۸	۵/۵۷۸	۰	۰	۰
۱۲	۰/۶۳۵	۰/۳۹۵	۵/۴۴۵	۰	۰	۰
۱۳	۱/۹۳	۰/۴۸	۳/۸۹	۰	۰	۰
۱۴	۱/۲۵۷	۰/۵۱۷	۳/۲۴	۰	۰	۰
۱۵	۰/۵۶۵	۰/۴۶۵	۳/۱۸	۰	۰	۰
۱۶	۰/۹۱۴	۰/۴۱۱	۲/۱۸	۰	۰	۰
۱۷	۰/۲۶۷	۰/۵۱۱	۱/۵۷۸	۰	۰	۰
۱۸	۰/۷۴۳	۰	۰/۷۵	۰	۰/۳۵	۰
۱۹	۰/۱۳۵	۰	۰/۱۶	۰	۰/۵۰۲	۰
۲۰	۰	۰	۰	۰	۱/۷۴۴	۰/۸۵۵
۲۱	۰	۰	۰	۰/۸۹۲	۲/۲۹۱	۲/۵۵
۲۲	۰	۰	۰	۱/۴۸۲	۳/۵۵۴	۲/۳۳
۲۳	۰	۰	۰	۱/۰۴۹	۲/۷۶۶	۱/۸۲۱

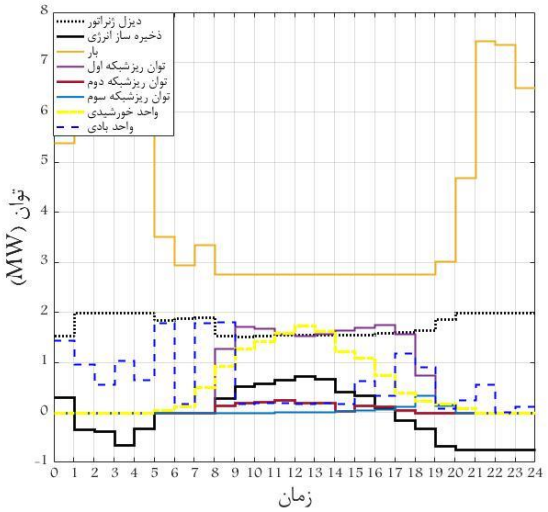


(ب)



(ج)

شکل (۷): برنامه‌ریزی محلی ریزشبکه‌ها: (الف) ریزشبکه اول، (ب)ریزشبکه دوم، (ج) ریزشبکه سوم.



شکل (۸): برنامه‌ریزی شبکه توزیع

۶- نتیجه

در این مقاله، یک روش سلسله مراتبی برای مدیریت انرژی ریزشبکه‌های چندگانه مطرح گردید. یک سیستم توزیع شامل چندین ریزشبکه و هم‌چنین منابع تولید پراکنده محلی، ذخیره‌سازهای انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا هر ریزشبکه مدیریت انرژی محلی برای خود انجام می‌دهد. به دلیل کوچک بودن ابعاد ریزشبکه، این مدیریت انرژی توسط یک روش ریاضی انجام می‌شود. با مشخص شدن خروجی واحدها، توان مازاد و توان تأمین نشده، سیستم توزیع نیز شروع به انجام مدیریت انرژی می‌نماید. با توجه به امکان بزرگ بودن اندازه سیستم توزیع، برای انجام این مدیریت انرژی، از یک روش هوشمند استفاده می‌شود. در نهایت نتایج و شبیه‌سازی توسط نرم-افزارهای GAMS و MATLAB قرار گرفته است.

مراجع

[1] F. Farzan, S. Lahiri, M. Kleinberg, K. Gharieh, F. Farzan, and M. Jafari, “Microgrids for fun and profit: The economics of installation investments and operations,”

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

loads.", *Proceedings of the 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, pp. 1-7, Jul 2011.

[16] T. Lv, and Q. Ai, "Interactive energy management of networked microgrids-based active distribution system considering large-scale integration of renewable energy resources," *Applied Energy*, vol. 163, pp. 408-422, 2016.

[17] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and A. M. Khambadkone, "Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system," *Electric Power Systems Research*, vol. 81 ,no. 1, pp. 138-148, 2011.

[18] H. K. Nunna, and S. Doolla, "Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1678-1687, 2013.

[19] J. Xiao, P. Wang, L .Setyawan, and Q. Xu, "Multi-Level Energy Management System for Real-Time Scheduling of DC Microgrids With Multiple Slack Terminals," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 392-400, 2016.

[20] T. Morstyn, B. Hredzak, and V. G. Agelidis , "Cooperative multi-agent control of heterogeneous storage devices distributed in a DC microgrid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 2974-2986, 2016.

[21] A. G. Tsikalakis, N. D. Hatziargyriou, "Centralized control for optimizing microgrids operation", *Proceedings of IEEE Power Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, Jul. 2011.

[22] T. Suehiro, and T. Namerikawa, "Decentralized control of smart grid by using overlapping information." *SIC E Annual Conference 2012*, pp. 125-130, 2012.

[23] M. Mao, P. Jin, N. D. Hatziargyriou, and L. Chang, "Multiagent-based hybrid energy management system for microgrids," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 938-946, 2014.

[24] C.-X. Dou, and B. Liu, "Multi-agent based hierarchical hybrid control for smart microgrid," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 4, no. 2, pp. 771-778 ,2013.

[25] N.-O. Song, J.-H. Lee, H.-M. Kim, Y. H. Im, and J. Y. Lee, "Optimal energy management of multi-microgrids with sequentially coordinated operations," *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 8371-8390, 2015.

[26] J. Ren, K. Tan, B. Sivaneasan, P. So, and E .Gunawan, "Energy management of a multi-agent based multi-microgrid system.", *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1-6, Dec. 2014.

[27] V.-H. Bui, A. Hussain, and H.-M. Kim, "A Multiagent-Based Hierarchical Energy Management Strategy for Multi-Microgrids Considering Adjustable Power and Demand Response," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016.

[28] S. S. Soman, H. Zareipour, O. Malik, and P. Mandal, "A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons.", *Proceedings of North America Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-8, 2010.

IEEE Power and Energy Magazine, vol. 11, no. 4, pp. 52-58, 2013.

[2] Z. Wang, B. Chen ,J. Wang, J. Kim, and M. M. Begovic, "Robust optimization based optimal DG placement in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2173-2182, 2014.

[3] Z. Wang, B. Chen, and J. Wang, "Decentralized energy management system for networked microgrids in grid-connected and islanded modes," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 1097-1105, 2016.

[4] D. E. Olivares, C. A. Cañizares, and M. Kazerani, "A centralized energy management system for isolated microgrids," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1864-1875, 2014.

[5] Q. Jiang, M. Xue, and G. Geng, "Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes," *IEEE transactions on power systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3380-3389, 2013.

[6] Y. Zhang, N .Gatsis, and G. B. Giannakis, "Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 944-953, 2013.

[7] B. Huang, Y. Li, H. Zhang, and Q. Sun, "Distributed optimal co-multi-microgrids energy management for energy internet," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 3, no. 4, pp. 357-364, 2016.

[8] S. A. Arefifar, M. Ordonez, and Y. A.-R. I. Mohamed, "Energy Management in Multi-Microgrid Systems—Development and Assessment ",*IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 910-922, 2017.

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

[10] Z. Wang, K. Yang, and X. Wang, "Privacy-preserving energy scheduling in microgrid systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1810-1820, 2013.

[11] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-time demand response model," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 236-242, 2010.

[12] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Demand response as a load shaping tool in an intelligent grid with electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol . 2 ,no. 4, pp. 624-631, 2011.

[13] Z. Zhou, F. Zhao, and J. Wang, "Agent-based electricity market simulation with demand response from commercial buildings," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 580-588, 2011.

[14] P. Malysz, S. Sirouspour ,and A. Emadi, "An optimal energy storage control strategy for grid-connected microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1785-1796, 2014.

[15] H. HassanzadehFard, S. Moghaddas-Tafreshi, and S. Hakimi, "Effect of energy storage systems on optimal sizing of islanded micro-grid considering interruptible

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]

[29] C. Monteiro, L. A. Fernandez-Jimenez, I. J. Ramirez-Rosado, A. Muñoz-Jimenez, and P. M. Lara-Santillan, "Short-term forecasting models for photovoltaic plants: Analytical versus soft-computing techniques," *Mathematical problems in engineering*, vol. 2013, 2013.

[30] N. Li, L. Chen, and S. H. Low, "Optimal demand response based on utility maximization in power networks.", *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, pp. 1-8, Jul. 2011.

[31] S. H. Low, "Convex relaxation of optimal power flow—Part I: Formulations and equivalence," *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 15-27, 2014

[32] D. Simon, "Biogeography-based optimization," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 12, no. 6, pp. 702-713, 2008.

زیرنویس‌ها

[1] Reliability
[2] Distributed Generation (DG)
[3] Renewable Energy
[4] Energy Storage Systems (ESS)
[5] Microgrid (MG)
[6] Islanded operation
[7] Grid-connected operation
[8] Energy Management
[9] Multi-Microgrids
[10] Robust optimization
[11] Stochastic optimization
[12] Mixed Integer Linear Programming (MILP)
[13] Demand Response (DR)
[14] Backward-Foreword load flow
[15] Monte Carlo simulation
[16] Real time price
[17] Multi-Agent System (MAS)
[18] Independent System Operator (ISO)
[19] Security constraints
[20] Financial Regulator
[21] Per Unit (p.u)
[22] Biogeography-Based Optimization (BBO)
[23] Habitat Suitability Index (HSI)
[24] Suitability Index Variable (SIV)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.10.9]