

بهره‌برداری ریزشبکه‌های چندگانه متصل به شبکه مقید به مشارکت در بازار انرژی و خدمات جانبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تولید و مصرف

مهدی ویسی^۱ فرید آدابی^۲ عبدالله کاوسی‌فرد^۳

۱- دانش آموخته دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی- سنجند- ایران

Veisi@yahoo.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی- سنجند- ایران

Farid.adabi@iau.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

Kavousi@sutech.ac.ir

چکیده: در این مقاله، بهره‌برداری شبکه توزیع هوشمند در حضور ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن مشارکت ریزشبکه‌ها در بازار انرژی و خدمات جانبی (بازار توان راکتیو و تنظیم رزرو) ارائه می‌شود. طرح پیشنهادی مابه‌التفاوت بین هزینه ریزشبکه‌ها و درآمد آنها در بازارهای مذکور را کمینه می‌کند. قیود مسئله نیز شامل معادلات پخش توان بهینه AC در شبکه توزیع هوشمند و ریزشبکه‌های چندگانه، مدل بهره‌برداری منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده می‌باشد. در این مسئله در پارامترهای بار، قیمت بازار، توان تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای سیار عدم قطعیت وجود دارد. لذا برای مدل‌سازی آنها از بهینه‌سازی تصادفی مبنی بر روش انتقال بی‌بو استفاده می‌شود. علاوه بر این، مسئله مذکور دارای ساختار غیرخطی است. در ادامه برای دسترسی به راه‌حل بهینه از الگوریتم بهینه‌سازی شیرمورچه استفاده می‌شود. در نهایت با اجرای طرح پیشنهادی بر روی شبکه توزیع و ریزشبکه‌های استاندارد، نتایج عددی بدست آمده از موارد مطالعاتی مختلف بیانگر قابلیت طرح پیشنهادی در ارتقاء وضعیت بهره‌برداری شبکه‌های مذکور نسبت به مطالعات پخش بار است، که این موضوع در کنار دستیابی به وضعیت مالی مطلوب برای ریزشبکه‌ها حاصل می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری، ریزشبکه‌های چندگانه، شبکه توزیع هوشمند، بازار انرژی و خدمات جانبی، بهینه‌سازی شیرمورچه، انتقال بی‌بو

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.20.4.2742

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عبدالله کاوسی‌فرد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: شیراز- بلوار مدرس- خیابان شهید کلانتری- دانشگاه صنعتی شیراز- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک

۱- مقدمه

به منظور دستیابی به شرایط تأمین انرژی پاک در سیستم قدرت و جلوگیری از اتمام زود هنگام سوخت‌های فسیلی، حضور فناوری‌های دوستدار محیط زیست مانند خودروهای الکتریکی^۱ (EV) و تولیدات پراکنده تجدیدپذیر^۲ (RDG) در نقاط مصرف راه‌کار مناسبی است [۱]. همچنین توجه شود که تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر^۳ (NRDG) نیز مانند پیل سوختی و میکروتوربین به علت دارا بودن ضریب آلودگی پایین‌تر نسبت به راه‌کارهای تأمین انرژی از نیروگاه‌های متمرکز، استفاده قابل توجهی در نقاط مصرف دارند [۱]. در زمینه هدف مذکور، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی^۴ (ESS) و طرح‌های پاسخ‌گویی بار^۵ (DRP) نیز توانایی و پتانسیل مطلوبی را دارا می‌باشند [۱]. ولی توجه شود که دستیابی به شرایط مطلوب زیست محیطی در کنار بهبود شرایط فنی و اقتصادی شبکه‌های انرژی مستلزم برقراری مناسب مدیریت انرژی این عناصر در شبکه است. لذا اولین قدم در این زمینه تجمیع عناصر مذکور در قالب‌های هماهنگ کننده مختلف مانند ریزشبکه^۶ (MG) است [۲]. پیرو این موضوع انتظار می‌رود که یک شبکه توزیع دارای چندین MG در خود باشد. در این طرح، MG دارای تعداد مشخصی منابع، ذخیره‌ساز و مصرف‌کننده است که برای هر کدام از آنها یک کنترل‌کننده محلی وجود دارد. همچنین خود MG دارای یک کنترل‌کننده مرکزی که تحت عنوان اپراتور ریزشبکه^۷ (MGO) شناخته می‌شود، می‌باشد. حال با اجرای زیرساخت‌های هوشمند و مخابراتی در MG انتظار می‌رود که هماهنگی دوطرفه مابین منابع، ذخیره‌سازها و مصرف‌کننده‌ها با MGO برقرار شود [۳]. در این صورت با اتخاذ سیستم مدیریت انرژی^۸ (EMS) یا توان^۹ (PMS) مناسب در قدم دوم می‌توان یک MG با قابلیت‌های مختلف از نظر اقتصادی و فنی مانند بهره‌برداری، قابلیت اطمینان و امنیت بدست آورد [۴]. علاوه بر این، در این طرح چندین MG و یا ریزشبکه‌های چندگانه^{۱۰} (MMG) با اپراتور سیستم توزیع^{۱۱} (DSO) در هماهنگی دوطرفه هستند، لذا پیش‌بینی می‌شود در این شرایط وضعیت مطلوبی از دیدگاه DSO نیز برای شبکه توزیع بدست آید [۵].

تحقیقات مختلفی در زمینه مدیریت انرژی و یا بهره‌برداری شبکه توزیع و یا ریزشبکه صورت گرفته است. به‌طوری که در [۶] یک مدل برنامه ریزی تصادفی دو مرحله‌ای مبتنی بر بهینه‌سازی چند هدفه به منظور بهره‌برداری بهینه ریزشبکه هوشمند با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌های زیست محیطی با حضور منابع تجدیدپذیر و پاسخ‌گویی بار پیشنهاد شده است. همچنین در [۷] یک مدل ریاضی مناسب جهت برنامه ریزی عملکرد و بهره‌برداری ۲۴ ساعته‌ی یک ریزشبکه‌ی هوشمند متصل به شبکه شامل توربین بادی، مولد خورشیدی، میکروتوربین و پیل سوختی با تولید همزمان برق و حرارت و با در نظر گرفتن نایقینی‌های مربوط به پیش‌بینی مصرف بارهای الکتریکی و گرمایی و پیش‌بینی تولید توان خورشیدی و بادی

پیشنهاد شده است. در [۸] مدیریت توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع هوشمند در حضور خودروهای الکتریکی بیان شده است. آن یک مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف نرمالیزه شده برابر با کمینه‌سازی هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست و انحرافات ولتاژ ارائه شده است که آن مقید به معادلات پخش توان بهینه AC^{۱۲} (AC-OPF) و معادلات پارکینگ EVها است. در ادامه‌ی آن از برنامه‌ریزی استوار جهت مدل-سازی پارامترهای عدم قطعیت پارکینگ EVها شامل نرخ شارژ EVها، انرژی مورد نیاز مسافرت EVها و ظرفیت شارژ EVها در پارکینگ استفاده شده است. در [۹] مدل‌سازی قطعی جایابی باتری‌ها مبتنی بر مدیریت انرژی منعطف^{۱۳} (FEM) انجام می‌شود، ولی در [۱۰] مدل-سازی استوار آن بیان می‌شود. براساس [۹ و ۱۰]، به علت وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولید منابع تجدیدپذیر، این امکان وجود دارد که تعادل مابین تولید و مصرف در بهره‌برداری زمان واقعی^{۱۴} (RTO) به علت خطای پیش‌بینی برقرار نشود. این موضوع به معنی کاهش انعطاف‌پذیری^{۱۵} سیستم است. حال اگر یک باتری در کنار منبع تجدیدپذیر باشد، از آنجا که ثابت زمانی تغییرات آن بسیار پایین است، لذا می‌تواند با تزریق و یا مصرف توان، عدم تعادل مابین تولید و مصرف را از بین ببرد. این موضوع به معنی انعطاف‌پذیری بالای سیستم خواهد بود. در [۱۱]، سیستم مدیریت انرژی در سیستم قدرت برای بهره‌برداری بهینه منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و بارهای اکتیو مانند EVها، ESSها و DRPها برای حفظ تعادل تولید و مصرف در باس‌های مختلف شبکه استفاده می‌شود. در [۱۲] این موضوع بیان شده است که افزایش تعداد RDGها، مشکلات جدیدی را برای بهره‌برداری ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع به وجود می‌آورد. RDGها به طور کلی منابع انرژی خورشیدی و سیستم‌های بادی، متناوب و تصادفی است که این شرایط به عوامل محیطی مانند سرعت باد و میزان تابش خورشید بستگی دارد. در [۱۳]، مدیریت انرژی به منظور برقراری انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان بالا در شبکه توزیع یک برنامه‌زمان-بندی بهینه برای تولیدات پراکنده^{۱۶} (DGها) و ESSها بدست می‌آورد. علاوه بر این، در [۱۴] نیز برنامه‌ریزی بهینه RDGها و ESSها در شبکه توزیع بیان شده است که این طرح از استراتژی مدیریت انرژی پیروی می‌کند. همچنین طرح مذکور در سطح خانگی و شبکه به منظور مدیریت بهینه شارژ/دشارژ EVها متناسب با برنامه زمان‌بندی RDGها در [۱۵] ذکر شده است. مشارکت بهینه ریزشبکه در بازار انرژی زمان واقعی و روز-بعد به ترتیب در [۱۶] و [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است. براساس این مراجع، با مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها می‌توان منفعت مالی مناسبی را برای ریزشبکه‌ها از بازار انرژی دریافت کرد.

در زمینه مدیریت انرژی شبکه توزیع و ریزشبکه‌ها، مدل‌سازی‌های متفاوتی وجود دارد. اما بایستی گفت که شکاف‌های تحقیقاتی مهمی در ارتباط با موضوع مذکور در پیشینه تحقیق وجود دارد. همانطور که در پیشینه تحقیق مشاهده گردید، با اجرای مدیریت انرژی در

استخراج می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری‌ها در بخش پنجم ذکر می‌شود.

۲- مدل مسئله پیشنهادی

در این بخش فرمول‌بندی بهره‌برداری ریزشبه‌های چندگانه در شبکه توزیع هوشمند با در نظر گرفتن مشارکت ریزشبه‌ها در بازار انرژی، توان راکتیو و تنظیم رزرو بیان می‌شود. آن کمینه‌سازی مابه‌التفاوت هزینه و درآمد MGها را بر عهد دارد، با شرطی که قیود AC-OPF شبکه و مدل بهره‌برداری منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده برآورده شود. بنابراین، این مسئله به صورت زیر نگارش می‌شود. لطفاً دقت گردد که این تابع هدف هزینه‌های کلی ریزشبه را نشان داده که مقدار مثبت در آن به معنی تولید هزینه و منفی جبران هزینه می‌باشد. به بیانی دیگر، مقادیر منفی نمایانگر فروش برق توسط ریزشبه بوده که سودآوری برای ریزشبه داشته و عملاً موجب کاهش هزینه‌ها می‌گردد. ترم آخر در این رابطه عملاً اشاره به فروش ریزشبه و در نتیجه کاهش هزینه‌های آن دارد. مجموع هزینه‌های حاصل نهایی می‌تواند در هر واحد پولی محاسبه گردد که در این مقاله به واحد دلار می‌باشد.

(۱)

$$\min \sum_{\omega \in \Omega_t} \pi_{\omega} \sum_{t \in \Omega_{OH}} \left\{ \sum_{i \in \Omega_{MG}} \sum_{b \in \Omega_{GB}} \beta_{i,b} P_{NR,i,b,t,\omega} - \sum_{t \in \Omega_{MG}} \gamma_{t,\omega} \left(\frac{P_{MG,i,t,\omega} + K_Q Q_{MG,i,t,\omega}}{+ K_R R_{MG,i,t,\omega}} \right) \right\}$$

به شرطی که:

(۲)

$$P_{DS,b,t,\omega} + \sum_{i \in \Omega_{MG}} A_{MGb,i} P_{MG,i,t,\omega} + \sum_{j \in \Omega_B} A_{Lb,j} P_{Lb,j,t,\omega} = L_{Pb,t,\omega} \quad \forall b, t, \omega$$

(۳)

$$Q_{DS,b,t,\omega} + \sum_{i \in \Omega_{MG}} A_{MGb,i} Q_{MG,i,t,\omega} + \sum_{j \in \Omega_B} A_{Lb,j} Q_{Lb,j,t,\omega} = L_{Qb,t,\omega} \quad \forall b, t, \omega$$

(۴)

$$P_{Lb,j,t,\omega} = G_{Lb,j} (V_{b,t,\omega})^2 - V_{b,t,\omega} V_{j,t,\omega} \left\{ \begin{aligned} &G_{Lb,j} \cos(\phi_{b,t,\omega} - \phi_{j,t,\omega}) + \\ &B_{Lb,j} \sin(\phi_{b,t,\omega} - \phi_{j,t,\omega}) \end{aligned} \right\} \quad \forall b, j, t, \omega$$

(۵)

$$Q_{Lb,j,t,\omega} = -B_{Lb,j} (V_{b,t,\omega})^2 + V_{b,t,\omega} V_{j,t,\omega} \left\{ \begin{aligned} &B_{Lb,j} \cos(\phi_{b,t,\omega} - \phi_{j,t,\omega}) - \\ &G_{Lb,j} \sin(\phi_{b,t,\omega} - \phi_{j,t,\omega}) \end{aligned} \right\} \quad \forall b, j, t, \omega$$

(۶)

$$\phi_{b,t,\omega} = 0 \quad \forall b = \text{Slack bus of SDN}, t, \omega$$

(۷)

$$\sqrt{(P_{DS,b,t,\omega})^2 + (Q_{DS,b,t,\omega})^2} \leq \bar{S}_{DSb} \quad \forall b = \text{Slack bus of SDN}, t, \omega$$

(۸)

$$\sqrt{(P_{Lb,j,t,\omega})^2 + (Q_{Lb,j,t,\omega})^2} \leq \bar{S}_{Lb,j} \quad \forall b, j, t, \omega$$

(۹)

$$V_{\min} \leq V_{b,t,\omega} \leq V_{\max} \quad \forall b, t, \omega$$

ریزشبه‌ها، آنها قابلیت بهبود وضعیت فنی شبکه توزیع را دارند. از اینرو آنها می‌توانند با مشارکت در بازارهای مختلف برق، منفعت مالی خود را ارتقاء دهند. ولی توجه شود که در بیشتر تحقیقات صورت گرفته در پیشینه تحقیق، عموماً مدل بازار انرژی برای ریزشبه‌ها در نظر گرفته شده بود. ولی بایستی گفت که ریزشبه با استفاده از منابع ژنراتور بیس مانند میکروتوربین و عناصر اینورتر بیس مانند منابع تجدیدپذیر، ESSها و EVها، قادر به کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو می‌باشند [۸-۹]. از اینرو آنها می‌توانند در کنار مشارکت در بازار انرژی، همزمان در بازار خدمات جانبی اکتیو مانند تنظیم رزرو و خدمات جانبی راکتیو شرکت داشته باشند. علاوه بر این در طرح مدیریت انرژی شبکه، عدم قطعیت‌هایی در پارامترهای بار، توان تجدیدپذیر، قیمت انرژی و ذخیره‌سازهای سیار وجود دارد. لذا تعداد عدم قطعیت‌ها بالا است، و مدل‌سازی آن مبنی بر سناریو حجم زیادی برای مسئله ایجاد می‌کند. این مورد منجر به ایجاد زمان محاسباتی بالا خواهد شد. ولی توجه شود که در مسائل بهره‌برداری گام اجرایی پایین است، لذا پایین بودن زمان محاسباتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پس به منظور دسترسی به این موضوع، نیاز به مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها با تعداد سناریو پایین است. بنابراین برای جبران این شکاف-های تحقیقاتی، این مقاله بهره‌برداری MMGها در شبکه توزیع هوشمند (SDN)^{۱۷} را ارائه می‌دهد، که در آن MMGها در بازار انرژی، توان راکتیو و تنظیم رزرو مشارکت دارند. طرح مذکور کمینه‌سازی مابه‌التفاوت بین هزینه ریزشبه‌ها و درآمد آنها در بازارهای مذکور را برعهده دارد، و آن نیز مقید به AC-OPF در شبکه‌های یاد شده، و مدل بهره‌برداری منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده است. این طرح شامل عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی، توان تجدیدپذیر و پارامترهای ذخیره‌ساز سیار است، که در این مقاله از بهینه‌سازی تصادفی مبنی بر روش انتقال بی بو^{۱۸} (UT) استفاده می‌شود. زیرا که آن کمینه‌ترین تعداد سناریو را نسبت به روش‌های دیگر بهینه‌سازی تصادفی بدست می‌آورد. علاوه بر این، طرح پیشنهادی در قالب بهینه‌سازی غیرخطی است، که براساس استخراج راه‌حل بهینه در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی شیرمورچه^{۱۹} (ALO) استفاده می‌گردد. در نهایت نوآوری-های این طرح به شرح زیر است:

- بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور ریزشبه-های چندگانه،
 - مشارکت ریزشبه همزمان در بازارهای انرژی، توان راکتیو و تنظیم رزرو، و
 - مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، توان تجدیدپذیر، قیمت انرژی، ذخیره‌ساز سیار با استفاده از روش انتقال بی بو.
- در ادامه مقاله بدین شرح تقسیم‌بندی می‌شود: در بخش دوم مدل-سازی طرح پیشنهادی با مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها بیان می‌شود. روش حل مسئله در بخش سوم ارائه می‌گردد. در بخش چهارم نتایج عددی

انرژی، توان راکتیو یا رزرو درآمد کسب می‌کنند. در غیر این صورت، یعنی متغیرهای مذکور دارای مقدار منفی باشد، MGها در بازارهای یاد شده دارای هزینه می‌باشند.

۲-۲- قیود SDN

روابط (۲)-(۶) اشاره به قیود پخش توان AC (AC-PF) در SDN دارند [۸-۱۰]. این قیود به ترتیب معرف تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس، توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط توزیع و زاویه ولتاژ باس مرجع هستند. در ادامه، محدودیت‌های بهره‌برداری SDN در روابط (۷)-(۹) ارائه شده است، که به ترتیب معرف محدودیت‌های حداکثر توان ظاهری قابل عبور از پست SDN و خط توزیع، و محدودیت ولتاژ در باس‌های SDN است [۱-۲]. به عنوان نکته دیگر، فرض بر این است که SDN از طریق پست توزیع مستقر در باس مرجع به شبکه بالادست اتصال می‌یابد. بنابراین متغیرهای P_{DS} و Q_{DS} تنها در باس مرجع دارای مقدار خواهند بود.

۳-۲- قیود MMG

قیود MGها در روابط (۱۰)-(۲۱) ارائه شده است. از معادلات AC-OPF، قیود (۴)-(۹) برای MGها صادق است که آن در قید (۱۰) بیان شده است. قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو در باس‌های مختلف MGها در حضور منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده به ترتیب همانند روابط (۱۱) و (۱۲) خواهد بود. در رابطه (۱۲)، فرض بر این است که منابع و ذخیره‌سازها قادر به کنترل توان راکتیو هستند. منابع تجدیدناپذیر عموماً ژنراتور بیس هستند، پس ژنراتور آنها می‌تواند توان راکتیو این منابع را کنترل کند. منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها عموماً توسط میدل الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند. با اتخاذ ساختار مناسب برای این میدل‌ها مانند انتخاب پل IGBT در آنها می‌توان توان راکتیو این عناصر را کنترل کرد [۱۸]. در قیود (۱۳) و (۱۴) فرمول‌بندی DRP مبنی بر تشویق ارائه شده است [۱]. در این مدل مصرف‌کننده‌گان متناسب با سیگنال قیمت انرژی، انرژی مصرفی خود را در ساعات پرباری (متناظر با قیمت انرژی بالا) کاهش می‌دهند و آن را در ساعات کم‌باری (متناسب با قیمت انرژی پایین) از شبکه دریافت می‌کنند. بنابراین قید (۱۳) محدودیت کنترل توان مصرف‌کننده‌گان در قالب DRP را بیان می‌کند. قید (۱۴) تضمین می‌کند که کل انرژی کاهش یافته در بازه پرباری در بازه کم‌باری تأمین شود. معادلات (۱۵)-(۱۸) اشاره به مدل بهره‌برداری ذخیره‌سازها دارد، که به ترتیب بیانگر محدودیت انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز، محدودیت‌های نرخ شارژ، نرخ دشارژ و ظرفیت شارژر ذخیره‌سازها هستند [۹-۱۰]. در مورد ذخیره‌سازهای سیار مانند EVها، مدلی همانند (۱۵)-(۱۸) قابل استفاده است، با این تفاوت تعداد EVها در هر سناریو و زمان متفاوت است. لذا اندیس t و ω برای پارامترهای α_{CR} ، α_{DR} و \bar{S}_E استفاده

(۱۰) قیود (۴)-(۹) با اضافه شدن اندیس i به همه پارامترها و متغیرها، و جایگزینی عبارت MG به جای عبارت DS به ازای i (۱۱)

$$P_{MG i, b, t, \omega} + P_{NR i, b, t, \omega} + P_{R i, b, t, \omega} + P_{DR i, b, t, \omega} + (P_{DIS i, b, t, \omega} - P_{CH i, b, t, \omega}) + \sum_{j \in O_B^{MG}} A_{Lb, j} P_{Li, b, j, t, \omega} = L_{Pi, b, t, \omega} \quad \forall i, b, t, \omega, P_{MG i, t, \omega} = P_{MG i, b = \text{slack bus of } MG, t, \omega} \quad (12)$$

$$Q_{MG i, b, t, \omega} + Q_{NR i, b, t, \omega} + Q_{R i, b, t, \omega} + Q_{E i, b, t, \omega} + \sum_{j \in O_B^{MG}} A_{Lb, j} Q_{Li, b, j, t, \omega} = L_{Qi, b, t, \omega} \quad \forall i, b, t, \omega, Q_{MG i, t, \omega} = Q_{MG i, b = \text{slack bus of } MG, t, \omega} \quad (13)$$

$$-\xi_{i, b} L_{Pi, b, t, \omega} \leq P_{DR i, b, t, \omega} \leq \xi_{i, b} L_{Pi, b, t, \omega} \quad \forall i, b, t, \omega \quad (14)$$

$$\sum_{t \in O_{OH}} P_{DR i, b, t, \omega} = 0 \quad \forall i, b, \omega \quad (15)$$

$$\underline{E}_{i, b} \leq IE_{i, b} + \sum_{t'=1}^t \left(\eta_{CH} P_{CH i, b, t', \omega} - \frac{1}{\eta_{DIS}} P_{DIS i, b, t', \omega} \right) \leq \bar{E}_{i, b} \quad \forall i, b, t, \omega \quad (16)$$

$$0 \leq P_{CH i, b, t, \omega} \leq \alpha_{CR i, b} \quad \forall i, b, t, \omega \quad (17)$$

$$0 \leq P_{DIS i, b, t, \omega} \leq \alpha_{DR i, b} \quad \forall i, b, t, \omega \quad (18)$$

$$\sqrt{(P_{DIS i, b, t, \omega} - P_{CH i, b, t, \omega})^2 + (Q_{E i, b, t, \omega})^2} \leq \bar{S}_{E i, b} \quad \forall i, b, t, \omega \quad (19)$$

$$\sqrt{(P_{R i, b, t, \omega})^2 + (Q_{R i, b, t, \omega})^2} \leq \bar{S}_{R i, b} \quad \forall i, b, t, \omega \quad (20)$$

$$\sqrt{(P_{NR i, b, t, \omega})^2 + (Q_{NR i, b, t, \omega})^2} \leq \bar{S}_{NR i, b} \quad \forall i, b, t, \omega \quad (21)$$

$$\sqrt{(P_{MG i, b, t, \omega} + R_{MG i, b, t, \omega})^2 + (Q_{MG i, b, t, \omega})^2} \leq \bar{S}_{MG i, b} \quad \forall R_{MG i, b, t, \omega} \geq 0, i, b = \text{Slack bus of } MG, t, \omega$$

۱-۲- تابع هدف

تابع هدف این مسئله همانند رابطه (۱) بیانگر کمینه‌سازی مابه‌التفاوت هزینه MGها (شامل هزینه بهره‌برداری منابع تجدیدناپذیر ارائه شده در بخش اول این رابطه) و درآمد مورد انتظار آنها در بازارهای مذکور (بخش دوم این رابطه) است. در بخش دوم رابطه (۱)، در صورتی میزان متغیرهای توان اکتیو، راکتیو یا رزرو مثبت باشد، پس MGها در بازار

- ۱- تعیین N (معرف اندازه جمعیت) مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری و ضرایب لاگرانژ
- ۲- محاسبه میزان متغیرهای وابسته به ازای N مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری
- ۳- محاسبه تابع برازندگی به ازای N مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری و ضرایب لاگرانژ
- ۴- استخراج بهینه‌ترین (کمینه‌ترین براساس رابطه (۱)) مقدار تابع برازندگی
- ۵- بهنگام‌سازی میزان متغیرهای تصمیم‌گیری و ضرایب لاگرانژ براساس فرآیند ALO متناسب با نتایج مرحله ۴
- ۶- اجرای مراحل ۲-۴
- ۷- بررسی وضعیت همگرایی مسئله، به‌طوری که اگر تکرار مراحل ۵-۶ کمتر از حداکثر تکرار همگرایی (I_{max}) باشد، به مرحله ۵ برویم، در غیر این‌صورت مرحله ۸ اجرا شود.
- ۸- چاپ نتایج عددی

۴- نتایج عددی

۴-۱- مورد مطالعاتی

طرح پیشنهادی در این بخش بر روی SDN ۳۳ با سه شعاعی [۲۱] دارای سه MG1، MG2 و MG3 همانند شکل (۱) اعمال می‌شود. داده‌های پیک بار و مشخصات خطوط و پست توزیع SDN در [۲۱] گزارش شده است، و این اطلاعات برای MGها در [۲۳] بیان شده است. توجه شود که باس ۱ برای SDN به عنوان باس مرجع است، و باس‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۶ همانند شکل (۱) به ترتیب برای MGهای اول الی سوم به عنوان باس مرجع می‌باشد. محدودیت دامنه ولتاژ برای شبکه‌های مذکور برابر بازه [۱/۱ ۰/۹] پریوینت است. توجه شود که در MG منابع تجدیدپذیر مانند سیستم بادی و خورشیدی، منبع تجدیدناپذیر مانند دیزل ژنراتور وجود دارد که اطلاعات آنها در [۲۳] ارائه شده است. همچنین این MGها دارای باتری هستند، که مشخصات آنها در MGهای مختلف در [۲۳] بیان شده است. البته در [۲۳]، سخنی از ظرفیت شارژر باتری‌ها نشده است، ولی در اینجا آن برابر ۵۰٪ ظرفیت باتری در نظر گرفته شده است. در [۲۳] اطلاعات پارکینگ EVها وجود ندارد. ولی در اینجا فرض شده است که در باس‌هایی از MGها که منبع تجدیدپذیر وجود دارد، پارکینگ EVها با ظرفیت ۳۰۰ خودرو قرار می‌گیرد. مشخصات دیگر EVها از قبیل نرخ شارژ و دشارژ، ظرفیت شارژر و مواردی دیگر در [۱ و ۸] ارائه شده است. در MGها فرض بر این است که مصرف‌کنندگان با نرخ ۳۰٪ در DRP مشارکت می‌کنند [۱]. قیمت انرژی برای بازار انرژی برای ساعات ۷:۰۰-۱۰:۰۰، ۷:۰۰-۱۶:۰۰، ۲۳:۰۰-۲۴:۰۰ و ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰ به ترتیب برابر ۱۶ \$/MWh، ۲۴ \$/MWh و ۳۰ \$/MWh مفروض شده است [۸]. عبارت K_Q براساس [۲۴] برابر ۰/۸ انتخاب شده است، و ضریب K_R نیز برابر ۱ در نظر گرفته شده است. داده‌های ساعتی بار (توان تولیدی منبع تجدیدپذیر) برابر با حاصل ضرب پیک

می‌شود. براساس [۱ و ۸]، α_{CR} ، α_{DR} و \bar{S}_E در هر ساعت t برابر مجموع نرخ شارژ/ نرخ دشارژ/ ظرفیت شارژر EVهای متصل به پارکینگ در این ساعت است. IE در ساعت t برابر با مجموع انرژی اولیه EVهای تازه وصل شده به پارکینگ در ساعات t است. پارامتر \bar{E} به علت تغییر تعداد EVها در هر سناریو دارای اندیس ω خواهد بود، و آن برابر با مجموع انرژی مصرفی مورد نیاز EVها در مسافرت خودشان است. در مدل بهره‌برداری EVها، عبارت نامساوی در طرف راست قید (۱۵) به‌صورت مساوی بیان خواهد شد. قیود مدل بهره‌برداری منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در روابط (۱۹) و (۲۰) ذکر شده است، که آنها بیانگر محدودیت ظرفیت و یا توان ظاهری این منابع می‌باشند. در ادامه توجه شود که توان رزرو که همواره متغیری مثبت است، از قید (۲۱) قابل محاسبه است.

۴-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها

در مسئله (۱)-(۲۱)، پارامترهای بار، L_P و L_Q ، توان تجدیدپذیر، P_R ، قیمت انرژی، γ ، نرخ شارژ و دشارژ EVها، α_{CR} و α_{DR} ، انرژی اولیه و ظرفیت شارژر EVها، IE و \bar{S}_E ، و انرژی مصرفی EVها، \bar{E} ، به‌صورت عدم قطعیت هستند. لذا طرح پیشنهادی دارای ۹ پارامتر عدم قطعیت است. در این مقاله از روش UT بر پایه تکنیک $2n + 1$ برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شود. در این روش، n معرف تعداد پارامترهای عدم قطعیت است که در طرح پیشنهادی آن برابر ۹ است. همچنین عبارت $2n+1$ برابر تعداد کل سناریوهای اعمال شده به مسئله است که آن برابر ۱۹ سناریو برای طرح پیشنهادی است. جزئیات این روش به همراه فرمول‌بندی در [۱۹] ارائه شده است.

۳- حل مسئله مبنی بر ALO

مسئله (۱)-(۲۱) دارای فرمول‌بندی غیرخطی است، که در این مقاله برای حل آن از الگوریتم ALO [۲۰] استفاده می‌شود. در حل مسئله، میزان متغیرهای تصمیم‌گیری شامل P_{CH} ، P_{DIS} ، P_{DR} ، Q_{NR} ، P_{NR} ، Q_E و Q_R به ترتیب براساس بازه $[0, \bar{S}_{NR}]$ ، $[0, \bar{S}_{NR}]$ ، $[0, \bar{S}_{NR}]$ ، $[0, \bar{S}_{NR}]$ ، $[0, \bar{S}_{NR}]$ و $[0, \bar{S}_{NR}]$ ، قیود (۱۳)، (۱۶)، (۱۷)، بازه $[0, \bar{S}_R]$ ، $[0, \bar{S}_E]$ و $[0, \bar{S}_{MG}]$ توسط ALO مشخص می‌شود. سپس میزان دیگر متغیرها که تحت عنوان متغیر وابسته شناخته می‌شوند از قیود AC-PF محاسبه می‌شود. برای حل AC-PF از روش پسر-پیشرو [۲۱] در این مقاله استفاده می‌شود. در ادامه برای ارزیابی قیود نامساوی (۷)-(۹)، (۱۵)، (۱۸)-(۲۱)، و قید مساوی (۱۴) از تکنیک تابع جریمه [۲۲] استفاده می‌شود. در این تکنیک، تابع برازندگی برابر مجموع تابع هدف (۱) و توابع جریمه است. تابع جریمه برای قیود $a \leq b$ و $a = b$ به ترتیب به‌صورت $\max(0, \varphi(b-a))$ و $\varphi(b-a)$ بیان می‌شود. $\varphi \in (-\infty, +\infty)$ و $\varphi \geq 0$ معرف ضرایب لاگرانژ هستند، که مقدار آنها توسط ALO تعیین می‌شود. روند حل توسط ALO به شرح زیر است:

در این بخش برای حل مسئله پیشنهادی از حل‌کننده‌های ALO، الگوریتم جستجوی کلاغ‌ها (CSA) [۲۵]، بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) [۲۶]، و الگوریتم ژنتیک (GA) [۲۲] استفاده می‌شود. اندازه جمعیت و حداکثر تکرار همگرایی برای آن به ترتیب برابر ۸۰ و ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین میزان دیگر پارامترهای تنظیم الگوریتم‌های مذکور براساس [۲۰، ۲۲، ۲۶-۲۵] انتخاب می‌شود. هر الگوریتم مسئله را ۳۰ بار حل می‌کنند. سپس نتایج مرحله آخر در جدول (۵) گزارش شده است. براساس جدول (۱) دیده می‌شود که الگوریتم ALO کمینه‌ترین تابع هدف را دارا می‌باشد که این نقطه بهینه در تکرار همگرایی ۱۳۷۵ و زمان محاسباتی ۶/۸ دقیقه بدست می‌آید. اما دیگر الگوریتم‌های یاد شده نقطه همگرایی را در تکرار بیش از ۲۲۵۰ و زمان محاسباتی بیش از ۱۰/۵ دقیقه بدست آورده‌اند. بنابراین ALO قادر است که دقیق‌ترین راه‌حل را با سرعت همگرایی بالاتری نسبت به CSA، GWO و GA بدست آورد.

جدول (۱): وضعیت همگرایی مسئله پیشنهادی بدست آمده از

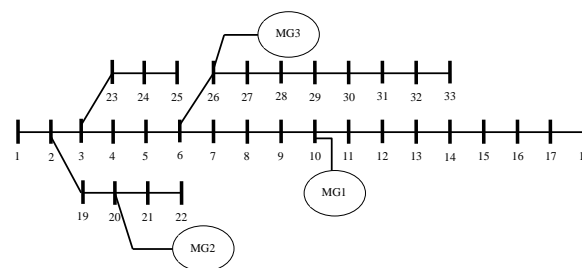
حل‌کننده‌های مختلف

حل‌کننده	تابع هدف (\$)	تکرار همگرایی	زمان محاسباتی (دقیقه)
ALO	-۱۲۵۶	۱۳۷۵	۶/۸
CSA	-۱۱۸۹	۲۲۸۶	۱۰/۹
GWO	-۱۱۰۶	۲۹۱۱	۱۵/۴
GA	-۱۰۲۳	۳۵۸۹	۲۱/۳

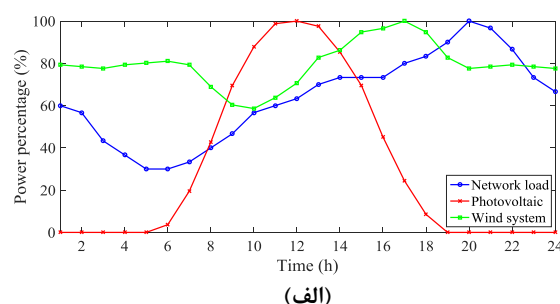
۴-۲-۲- بررسی عملکرد MGها

جدول‌های (۲)–(۳) منحنی مورد انتظار روزانه MGها در بازار انرژی، توان راکتیو و رزرو را ارائه می‌دهد. براساس جدول (۲)، MGها با مدیریت مناسب منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده قادر هستند که در کلیه ساعات بهره‌برداری، توان اکتیو به SDN تزریق کنند و از بازار انرژی کسب منفعت مالی داشته باشند. البته آنها در ساعات اولیه بهره‌برداری، ۱:۰۰–۴:۰۰، و بازه نهایی زمان‌بندی انرژی، ۱۸:۰۰–۲۴:۰۰، توان اکتیو پایین‌تری را نسبت به ساعات دیگر به SDN تزریق می‌کنند. زیرا که براساس داده‌های بخش ۴–۱، قیمت انرژی در ساعات ۱:۰۰ الی ۴:۰۰ کمترین مقدار را نسبت به بازه‌های زمانی دیگر دارد، و منابع تجدیدپذیر براساس بخش ۴–۱ در این ساعات دارای قیمت سوخت (\$/MWh ۲۰) بالاتر از قیمت انرژی (\$/MWh ۱۶) هستند. بنابراین به منظور کمینه‌سازی هزینه MGها، رابطه (۱)، EVها، باتری‌ها و بارهای پاسخ‌گو در این ساعات مصرف‌کننده انرژی می‌باشند، و منابع تجدیدپذیر توان پایینی را به MGها تزریق می‌کنند. در ساعات ۱۸:۰۰–۲۴:۰۰ میزان بار پسیو شبکه بالا است، به عبارتی شبکه دارای وضعیت پرباری است، از اینرو MGها توانایی پایینی در تزریق توان اکتیو به SDN در این ساعات را دارند. نکته دیگر، منابع تجدیدپذیر در ساعات ۱:۰۰–۴:۰۰ و ۱۸:۰۰–۲۴:۰۰ قادر نیستند که توان اکتیو بالایی را براساس داده‌های شکل (۲) تولید کنند، به‌طوری

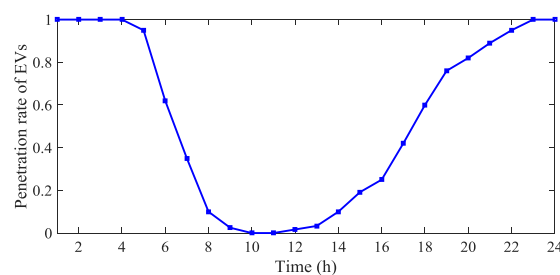
بار (ظرفیت منبع) و ضریب بار (نرخ توان) است، و تعداد EVها متصل شده به پارکینگ در هر ساعات برابر با تعداد کل EVها قابل اتصال به پارکینگ و نرخ نفوذ EVها می‌باشد. منحنی روزانه ضریب بار، نرخ توان منابع تجدیدپذیر و نرخ نفوذ EVها در پارکینگ در شکل (۲) رسم شده است [۱]. لازم به ذکر است که مقادیر قیمت ساعت برق بر اساس مقدار بازار برق برای ۲۴ ساعت بعد بوده که بصورت ثابت لحاظ شده‌اند. این مقادیر از مراجع معتبر استخراج گردیده‌اند. در عمل، برای ۲۴ ساعت آتی این مقادیر پیش بینی گردیده و در نهایت مقدار یش بینی شده به عنوان مبنای برنامه ریزها مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۱): سیستم مورد مطالعه [۲۱]



(الف)



(ب)

شکل (۲): منحنی روزانه، (الف) نرخ توان RDG و ضریب بار، (ب) نرخ نفوذ EVها [۱]

۴-۲-۲- نتایج

طرح پیشنهادی متناسب با داده‌های بخش پیشین و فرآیند حل ALO در محیط نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. سپس نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف در ادامه گزارش می‌شود.

۴-۲-۱- ارزیابی قابلیت ALO

اختصاص به تولید توان اکتیو داده‌اند. پس در این شرایط ظرفیت تولید توان راکتیو توسط منابع کاهش یافته است. در نهایت منحنی روزانه مورد انتظار توان رزرو MGها در جدول (۴) ارائه شده است. براساس این جدول، MGها در ساعات ۵:۰۰ الی ۱۸:۰۰ قادر تأمین رزرو هستند، زیرا که در این ساعات براساس جدول (۲)، منابع قادر به تولید انرژی بالا هستند، و آنها نیز بخش کمی از ظرفیت خود را به تولید توان راکتیو اختصاص داده‌اند. لذا با توجه به رابطه (۲۱) و داده‌های بخش ۴-۱، ظرفیت MGها بالا است و آنها نیز می‌توانند در تأمین رزرو در این ساعات نقش داشته باشند. در ساعات دیگر میزان بار مصرفی بالا است، لذا بخش قابل توجهی از منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌گو (تنها در ساعات پرباری) در تأمین انرژی صرف می‌شود. همچنین به منظور جلوگیری از افت شدید ولتاژ در این شرایط نیاز به تخصیص بخشی از ظرفیت منابع و ذخیره‌سازها به تولید توان راکتیو است. پس در این ساعات ظرفیت MG پایین است، و آنها توانایی در تأمین رزرو همانند جدول (۴) در ساعات ۱:۰۰-۴:۰۰ و ۱۹:۰۰-۲۴:۰۰ نخواهند داشت.

فتوولتائیک‌ها در این ساعات خاموش هستند. در ساعات ۵:۰۰ الی ۱۷:۰۰ به علت تولید توان اکتیو بالای منابع و کاهش مصرف انرژی EVها، باتری‌ها و بارهای پاسخ‌گو، MGها توان اکتیو بالایی را نسبت به ساعات دیگر قادر هستند به SDN تزریق نمایند. منحنی مورد انتظار روزانه توان راکتیو MGها در جدول (۳) ارائه شده است. براساس این جدول، MGها در افق بهره‌برداری همواره تولید کننده توان راکتیو هستند. زیرا که براساس رابطه (۱۲) دیده می‌شود که MGها از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و ذخیره‌سازها توان راکتیو دریافت می‌کنند. از آنجا که تعداد منابع راکتیو و ظرفیت آنها در MG براساس بخش ۴-۱ بالا است، پس آنها به صورت یک تولید کننده توان راکتیو در SDN عمل می‌کنند. توجه شود در ساعات ۱:۰۰ الی ۶:۰۰، MGها دارای توان راکتیو تولیدی بالایی هستند، زیرا که در این ساعات براساس جدول (۲)، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌گو در وضعیت شارژ هستند. لذا به منظور جلوگیری از افت شدید ولتاژ در این ساعات، منابع، توان راکتیو بالایی را به MG تزریق می‌نمایند. در ساعات ۷:۰۰ الی ۲۴:۰۰ میزان توان راکتیو MGها پایین است، زیرا که در این ساعات منابع براساس جدول (۲)، بخش بالایی از ظرفیت خود را

جدول (۲): منحنی روزانه توان اکتیو MGها (MW)

ساعت	MG1	MG2	MG3	ساعت	MG1	MG2	MG3
۱:۰۰	۰/۰۳۷۲	۰/۱۷۵۱	۰/۳۲۳۵	۱۳:۰۰	۵/۱۱۵۰	۵/۲۸۶۷	۵/۱۹۶۷
۲:۰۰	۰/۱۴۸۰	۰/۲۶۹۷	۰/۴۸۱۰	۱۴:۰۰	۴/۷۰۸۵	۴/۶۵۴۹	۴/۷۳۶۱
۳:۰۰	۱/۶۶۱	۱/۷۶۶	۱/۱۷۹۱	۱۵:۰۰	۴/۳۸۸۷	۴/۵۸۰۳	۴/۴۳۴۴
۴:۰۰	۲/۴۶۴۷	۲/۴۹۳۵	۲/۰۱۲۰	۱۶:۰۰	۴/۳۱۵۴	۴/۵۲۱۵	۴/۲۴۶۴
۵:۰۰	۳/۱۹۴۸	۲/۸۴۹۲	۲/۷۶۱۶	۱۷:۰۰	۴/۰۰۷۷	۴/۴۵۳۸	۴/۰۶۲۴
۶:۰۰	۳/۵۶۴۱	۲/۹۶۱۵	۳/۴۲۱۰	۱۸:۰۰	۳/۰۶۱۴	۳/۲۳۵۰	۳/۲۴۴۱
۷:۰۰	۳/۷۵۹۶	۳/۱۰۱۳	۳/۹۹۲۹	۱۹:۰۰	۱/۶۸۹۵	۱/۷۸۴۸	۱/۸۷۲۲
۸:۰۰	۴/۹۱۸۵	۴/۲۸۹۶	۵/۰۴۵۹	۲۰:۰۰	۰/۶۴۲۳	۱/۴۰۵۹	۱/۴۴۴۶
۹:۰۰	۴/۹۴۴۲	۴/۶۵۵۷	۵/۱۴۵۱	۲۱:۰۰	۰/۵۴۳۶	۱/۰۸۸۸	۱/۰۶۸۴
۱۰:۰۰	۵/۱۹۲۰	۴/۶۶۸۵	۵/۱۶۱۳	۲۲:۰۰	۱/۲۵۳۸	۱/۴۵۲۱	۱/۳۳۷۴
۱۱:۰۰	۵/۲۹۳۹	۵/۲۰۴۴	۵/۱۹۶۷	۲۳:۰۰	۱/۳۸۳۷	۱/۵۰۱۵	۱/۴۲۳۴
۱۲:۰۰	۵/۳۱۲۸	۵/۳۳۸۷	۵/۲۲۸۲	۲۴:۰۰	۱/۶۹۰۵	۱/۸۵۷۳	۱/۷۳۹۸

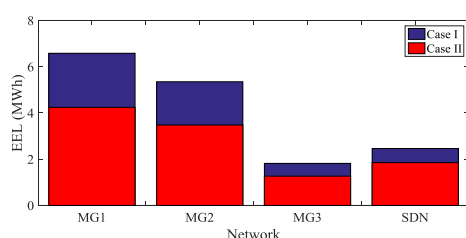
جدول (۳): منحنی روزانه توان راکتیو MGها (MVar)

ساعت	MG1	MG2	MG3	ساعت	MG1	MG2	MG3
۱:۰۰	۱/۶۳۵۱	۱/۴۸۱۵	۱/۸۲۳۴	۱۳:۰۰	۰/۳۲۹۲	۰/۳۴۱۸	۰/۱۹۲۴
۲:۰۰	۱/۶۶۰۹	۱/۵۰۴۸	۱/۸۴۹۹	۱۴:۰۰	۰/۳۴۱۸	۰/۳۷۸۶	۰/۳۴۷۵
۳:۰۰	۱/۷۶۴۲	۱/۵۹۷۸	۱/۹۵۵۸	۱۵:۰۰	۰/۴۴۲۶	۰/۴۶۱۱	۰/۴۶۶۸
۴:۰۰	۱/۸۱۵۸	۱/۶۴۴۳	۲/۰۰۸۷	۱۶:۰۰	۰/۵۰۶۸	۰/۵۱۳۶	۰/۵۳۲۵
۵:۰۰	۱/۸۱۲۵	۱/۶۴۵۸	۱/۹۹۶۷	۱۷:۰۰	۰/۵۲۲۲	۰/۵۲۴۲	۰/۵۴۹۷
۶:۰۰	۱/۴۴۹۵	۱/۳۴۸۸	۱/۵۶۷۷	۱۸:۰۰	۰/۶۱۴۳	۰/۵۵۸۸	۰/۷۱۸۱
۷:۰۰	۱/۱۲۶۷	۱/۰۸۲۵	۱/۱۹۰۳	۱۹:۰۰	۰/۷۳۸۶	۰/۶۵۶۳	۰/۸۷۳۱
۸:۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۵۱۱۰	۰/۵۱۲۳	۲۰:۰۰	۰/۷۲۷۱	۰/۶۴۰۶	۰/۸۷۱۷
۹:۰۰	۰/۴۶۵۸	۰/۳۹۷۰	۰/۴۶۱۸	۲۱:۰۰	۰/۸۲۹۹	۰/۷۲۶۸	۰/۹۸۹۲
۱۰:۰۰	۰/۳۶۰۹	۰/۳۰۴۸	۰/۳۴۹۹	۲۲:۰۰	۰/۹۷۳۴	۰/۸۵۰۸	۱/۱۴۶۶
۱۱:۰۰	۰/۲۰۴۸	۰/۲۸۱۵	۰/۲۲۰۰	۲۳:۰۰	۱/۱۳۱۸	۰/۹۸۸۶	۱/۳۱۷۵
۱۲:۰۰	۰/۰۹۱۵	۰/۲۱۰۸	۰/۱۶۴۹	۲۴:۰۰	۱/۱۸۳۴	۱/۰۳۵۰	۱/۳۷۰۴

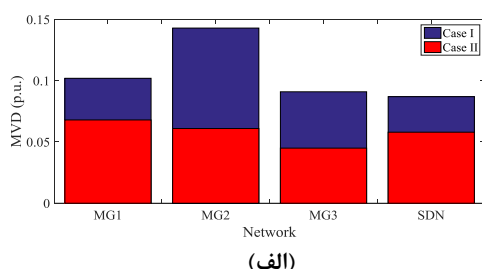
جدول (۴): منحنی روزانه توان رزرو MGها (MW)

ساعت	MG1	MG2	MG3	ساعت	MG1	MG2	MG3
۱:۰۰	۰	۰	۰	۱۳:۰۰	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۵۸
۲:۰۰	۰	۰	۰	۱۴:۰۰	۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۵۶
۳:۰۰	۰	۰	۰	۱۵:۰۰	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۴۴
۴:۰۰	۰	۰	۰	۱۶:۰۰	۰/۵۱	۰/۴۹	۰/۳۹
۵:۰۰	۰/۶۰	۰/۵۷	۰/۴۷	۱۷:۰۰	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۲۱
۶:۰۰	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۵۳	۱۸:۰۰	۰/۱۰	۰/۱۹	۰/۰۵
۷:۰۰	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۵۵	۱۹:۰۰	۰	۰	۰
۸:۰۰	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۵۸	۲۰:۰۰	۰	۰	۰
۹:۰۰	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۵۸	۲۱:۰۰	۰	۰	۰
۱۰:۰۰	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۵۸	۲۲:۰۰	۰	۰	۰
۱۱:۰۰	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۵۸	۲۳:۰۰	۰	۰	۰
۱۲:۰۰	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۵۸	۲۴:۰۰	۰	۰	۰

جدول‌های (۳) و (۴)، طرح پیشنهادی (مورد II) با مدیریت مناسب منابع، ذخیره‌سازها و بارها پاسخ‌ده براساس استراتژی پیشنهادی، (۱) - (۲۱)، قادر هستند که کلیه شاخص‌های فنی اشاره شده را در شبکه‌ها نسبت به مورد I ارتقاء دهند. به‌طوری که طرح پیشنهادی با ظهور MOV بین ۰/۰۱۲ الی ۰/۰۱۵ پروینیت (کمتر از حد مجاز، ۰/۱ پروینیت (۱ - ۱/۱)) توانسته است که MVD را در شبکه‌های مختلف به زیر ۰/۰۶۸ پروینیت تنزل دهد، در صورتی MVD در مورد I بیش از ۰/۰۸۵ پروینیت است. در نهایت تلفات انرژی در MGهای اول الی سوم و SDN به ترتیب در حدود $\frac{4}{581} \div \frac{4}{242} = 3.5/5\%$ ، $\frac{3}{30} \div \frac{9}{34} = 3.0/3\%$ و $\frac{8}{24} \div \frac{8}{24} = 2.4/8\%$ در مورد II نسبت به مورد I کاهش می‌یابد.



شکل (۳): میزان EEL در شبکه‌های مختلف به ازای موارد مطالعاتی متفاوت



(الف)

۴-۲-۳- وضعیت اقتصادی MGها

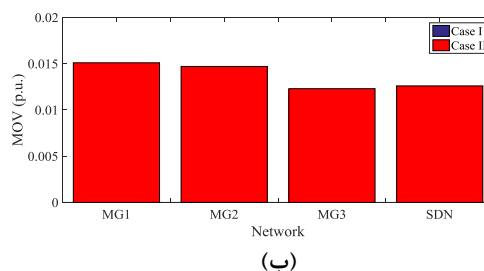
جدول (۵) وضعیت اقتصادی MGها را بیان می‌کند. براساس این جدول مشاهده می‌شود که طرح پیشنهادی توانسته است که با مدیریت توان منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده یک منفعت مالی مناسبی را برای MGها از بازارهای انرژی، توان راکتیو و تنظیم رزرو بدست آورد. بیشترین منفعت از بازار انرژی بدست آمده است، زیرا که قیمت انرژی براساس بخش ۴-۱ بالا است. همچنین توان اکتیو نیز براساس جدول (۲) دارای مقدار بالایی است. اما کمترین منفعت در بازار توان راکتیو بدست آمده است. زیرا که آن دارای قیمت توان راکتیو پایینی براساس بخش ۴-۱ است.

جدول (۵): شاخص‌های اقتصادی MGها

ریز شبکه	هزینه (\$)	درآمد (\$) در			سود (\$)
		بازار انرژی	بازار توان راکتیو	بازار کل	
۱	۸۸۴/۱	۷۴۹/۷	۱۵۲/۱	۲۶۷/۷	۱۱۶۹/۵
۲	۷۰۹/۳	۸۸۲/۹	۲۳۸/۶	۳۰۲/۵	۱۴۲۴
۳	۸۴۵/۶	۷۳۸/۴	۱۴۵/۵	۲۱۷/۶	۱۱۰۱/۵

۴-۲-۴- ارزیابی وضعیت فنی ریزشبکه‌ها

در شکل‌های (۳) و (۴) مقادیر شاخص‌های بهره‌برداری مانند تلفات انرژی مورد انتظار (EEL)، حداکثر افت ولتاژ (MVD) و حداکثر اضافه ولتاژ (MOV) برای MGها و SDN به ازای دو مورد مطالعاتی بررسی شده است. یک مورد مطالعاتی (مورد I) اشاره به مطالعات پخش بار شبکه‌های مذکور دارد. مورد II اشاره به طرح پیشنهادی دارد. براساس



شکل (۴): میزان، الف) MVD، ب) MOV در شبکه‌های مختلف به ازای موارد مطالعاتی متفاوت

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهره‌برداری ریزشبکه‌های چندگانه در شبکه توزیع هوشمند با مشارکت آنها در بازار انرژی، توان راکتیو و تنظیم رزرو ارائه شد. طرح پیشنهادی کمینه‌سازی مابه‌التفاوت هزینه بهره‌برداری منابع تجدیدناپذیر و درآمد ریزشبکه‌ها در بازارهای مذکور را برعهده داشت. آن نیز مقید به معادلات پخش توان بهینه شبکه‌ها و مدل بهره‌برداری منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده بود. سپس UT برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، توان تجدیدپذیر، قیمت بازار و ذخیره‌سازها استفاده شد، و ALO برای حل مسئله استفاده گردید. براساس نتایج عددی مشاهده شد که ALO نسبت به دیگر الگوریتم‌های تکاملی توانسته است که نقطه بهینه‌تری را در تکرار همگرایی و زمان محاسباتی پایین‌تری بدست آورد. همچنین طرح پیشنهادی با مدیریت توان منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده توانسته است که منفعت مالی مناسبی برای ریزشبکه‌ها از بازارهای مذکور بدست آورد. به‌طوری که بیشترین (کمترین) منفعت از بازار انرژی (توان راکتیو) حاصل شده است. در نهایت طرح پیشنهادی نسبت به مطالعات پخش بار توانسته است که تلفات انرژی را در حدود ۲۴٪ الی ۳۶٪ کاهش دهد. همچنین آن با ایجاد اضافه ولتاژ ناچیز پایین در شبکه قادر است که حداکثر افت ولتاژ را در شبکه به کمتر از ۰/۰۷ پریونیت تنظیم کند، در صورتی که آن در مطالعات پخش بار بیش از ۰/۰۸۵ پریونیت است.

پیوست‌ها

اندیس و مجموعه

b, i, t, ω	اندیس‌های باس، MG، ساعت بهره‌برداری و نمونه سناریو
j	اندیس کمکی نمایانگر باس
O_B, O_{MG}, O_{OH}, O_S	مجموعه‌ها باس، MG، ساعت بهره‌برداری و نمونه سناریو
O_B^{MG}	مجموعه باس‌های MG

متغیرها

P_{CH}, P_{DIS}	توان اکتیو شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز (p.u)
-------------------	---

P_{DS}, P_{MG}, P_L	توان اکتیو پست SDN، پست MG و خط توزیع
P_{NR}, P_{DR}	توان اکتیو منبع تجدیدناپذیر و توان اکتیو بارهای پاسخ‌گو در طرح پاسخ‌گویی بار (DRP) بر حسب p.u
$Q_{DS}, Q_{MG}, Q_L, Q_{NR}, Q_R, Q_E$	توان راکتیو پست SDN، پست MG، خط توزیع، منبع تجدیدناپذیر، منبع تجدیدپذیر و شارژر ذخیره‌ساز (p.u)
R_{MG}	توان رزرو MG دیده شده از سمت پست MG (p.u)
V	دامنه ولتاژ (p.u)
φ	زاویه ولتاژ (رادیان)
ثابت‌ها	
A_L	ماتریس تلاقی باس و خط توزیع
A_{MG}	ماتریس تلاقی باس در SDN با MG
B_L, G_L	سوسپتانس و رسانایی خط توزیع (p.u)
$\underline{E}, \bar{E}, IE$	حداقل انرژی قابل ذخیره در ذخیره‌ساز، ظرفیت (حداکثر انرژی قابل ذخیره) ذخیره‌ساز و انرژی اولیه ذخیره‌ساز (MWh)
K_Q, K_R	نسبت قیمت توان راکتیو به قیمت انرژی، و نسبت قیمت رزرو به قیمت انرژی (بدون واحد)
L_P, L_Q	بار اکتیو و راکتیو (p.u)
P_R	توان اکتیو منبع تجدیدپذیر (p.u)
$\bar{S}_{DS}, \bar{S}_{MG}$	ظرفیت (حداکثر توان ظاهری) پست SDN و پست MG (p.u)
\bar{S}_L, \bar{S}_{NR}	ظرفیت (حداکثر توان ظاهری) خط توزیع و منبع تجدیدناپذیر (p.u)
\bar{S}_R, \bar{S}_E	ظرفیت (حداکثر توان ظاهری) منبع تجدیدپذیر و شارژر ذخیره‌ساز (p.u)
V_{min}, V_{max}	حد پایین و بالای دامنه ولتاژ (p.u)
α_{CR}, α_{DR}	نرخ شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز (p.u)
β	قیمت سوخت منبع تجدیدناپذیر (\$/MWh)
γ	قیمت انرژی (\$/MWh)
η_{CH}, η_{DIS}	راندمان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز
π	احتمال وقوع سناریو
ξ	نرخ مشارکت مصرف‌کننده‌گان در DRP

مراجع

- [14] E. Hooshmand and A. Rabiee, "Robust model for optimal allocation of renewable energy sources, energy storage systems and demand response in distribution systems via information gap decision theory," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 4, pp. 511-520, 26 2 2019.
- [15] H. Kikusato et al., "Electric Vehicle Charge-Discharge Management for Utilization of Photovoltaic by Coordination Between Home and Grid Energy Management Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3186-3197, May 2019.
- [16] Y. Yu, Z. Cai and Y. Huang, "Energy Storage Arbitrage in Grid-Connected Micro-Grids Under Real-Time Market Price Uncertainty: A Double-Q Learning Approach," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 54456-54464, 2020.
- [17] G. Liu, Y. Xu and K. Tomovic, "Bidding Strategy for Microgrid in Day-Ahead Market Based on Hybrid Stochastic/Robust Optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 227-237, Jan. 2016.
- [18] S. Pirouzi, and et al., "Power conditioning of distribution networks via single-phase electric vehicles equipped with bidirectional chargers," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, pp. 3433-3442, Sept. 2019.
- [19] M. Dabbaghjamesh, A. Kavousi-Fard, and S. Mehraeen, "Effective scheduling of reconfigurable microgrids with dynamic thermal line rating," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 66, No. 2, pp. 1552-1564, 2019.
- [20] J.J. & D. Das, "Scenario-based multi-objective optimisation with loadability in islanded microgrids considering load and renewable generation uncertainties," *IET Renew. Pow. Gene.*, vol. 13, no. 5, pp. 785-800, 2019.
- [21] P. R. Babu, C. P. Rakesh, G. Srikanth, M. N. Kumar, and D. P. Reddy, "A novel approach for solving distribution networks," *India Conference (INDICON), 2009 Annual IEEE*, pp. 1-5, Dec. 2009.
- [22] W. K. A. Najj, H. H. Zeineldin and W. L. Woon, "Optimal Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capability," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1668-1677, April 2013.
- [23] F. Hamzeh-Aghdam, S. Ghaemi, N. Taghizadegan-Kalantari, "Evaluation of loss minimization on the energy management of multi-microgrid based smart distribution network in the presence of emission constraints and clean productions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 185-201, 2018.
- [24] S. Pirouzi, J. Aghaei, V. Vahidinasab, T. Niknam, and A. Khodaei, "Robust linear architecture for active/reactive power scheduling of EV integrated smart distribution networks," *Electric Power System Research*, vol. 155, pp. 8-20, 2018.
- [25] A. Askarzadeh, "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm," *Computers and Structures*, vol. 169, pp. 1-12, 2016.
- [26] S.A. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [1] ر. فتحي، ب. طوسی، س. گلوئی، «تخصیص بهینه منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت براساس تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی با استفاده از الگوریتم اجتماع سالپ بهبود یافته» مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۲۰، شماره ۶۸، ۱۴۰۱.
- [۲] ق. میربابایی رکنی، م. رادمهر، ع. ذکریزاده، «مدل‌سازی مدیریت منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه با استفاده از روش توزیع شده» مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، ص. ۱۳۹۸، ۲۵۲-۲۴۱.
- [۳] ن. گرامی، ا. قاسمی، «مدل‌سازی مصرف انرژی در فرآیندهای تولید واحدهای صنعتی بر مبنای روش تقریب خطی تکه‌ای با هدف اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و مشارکت در بازار انرژی و خدمات جانبی» مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۹، ص. ۱۳۹۸، ۱۹۳-۱۷۹.
- [4] B. Tan, H. Chen, "Multi-objective energy management of multiple microgrids under random electric vehicle charging," *Energy*, vol. 208, pp. 23-35, 2020.
- [5] M. Hu, Y.W. Wang, X. Lin, "Multi-energy management with hierarchical distributed multi-scale strategy for pelagic islanded microgrid clusters," *Energy*, vol. 185, pp. 910-921, July 2019.
- [۶] نیکزاد مهدی، صمیمی ابوذر. برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای همزمان انرژی و رزرو در ریز شبکه‌های هوشمند مبتنی بر بهینه‌سازی چند هدفه. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران ۱۴۰۱؛ ۱۹ (۱): ۷۵-۸۸
- [۷] جلال‌آبادی اسماعیل، رحیمی‌کیان اشکان. بهره‌برداری بهینه و مدیریت ریسک یک ریز شبکه متصل به شبکه. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران ۱۳۹۳؛ ۱۱ (۱): ۹-۱۸.
- [8] S. Pirouzi, J. Aghaei, M.A. Latify, G.R. Yousefi, and G. Mokryani, "A robust optimization approach for active and reactive power management in smart distribution networks using electric vehicles," *IEEE System Journal*, pp. 1-12, 2017.
- [9] P. Fortenbacher, A. Ulbig, and G. Andersson, "Optimal Placement and Sizing of Distributed Battery Storage in Low Voltage Grids using Receding Horizon Control Strategies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 3, May 2017.
- [10] Dr Seyed Mehdi Hakimi, Arezoo Hasankhani, Elnaz Sharabi, "Optimization of Economic Power Flow in Dc Microgrid in the Presence of Renewable Energy Resources With Voltage Controller Using Virtual Impedance and Real-Time Pricing," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 19, No1, pp. 109739, 2022.
- [11] Amirhossein Nazeri Ardekani1, Ali Asghar Khodadoost Arani, Mohammad Bagher Menhaj, Mehdi Karrari, "A Smart Fuzzy Controller for Microgrid Frequency Improvement Using Pso Algorithm Considering Nonlinear Conditions," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*; vol. 15, pp. 480-494, 2018.
- [12] R.M. Elavarasan et al., "A Comprehensive Review on Renewable Energy Development, Challenges, and Policies of Leading Indian States With an International Perspective," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74432-74457, 2020.
- [13] 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

زیر نویس‌ها

-
- ¹ Electric vehicles (EVs)
 - ² Renewable distributed generations (RDGs)
 - ³ Non-renewable distributed generations (NRDGs)
 - ⁴ Energy storage systems (ESSs)
 - ⁵ Demand response programs (DRPs)
 - ⁶ Microgrid (MG)
 - ⁷ Microgrid operator (MGO)
 - ⁸ Energy management system (EMS)
 - ⁹ Power management system (PMS)
 - ¹⁰ Multi-microgrid (MMG)
 - ¹¹ Distribution system operator (DSO)
 - ¹² AC optimal power flow (AC-OPF)
 - ¹³ Flexibility energy management (FEM)
 - ¹⁴ Real time operation (RTO)
 - ¹⁵ Flexibility
 - ¹⁶ Distributed generation (DGs)
 - ¹⁷ Smart distribution network (SDN)
 - ¹⁸ Unscented transformation (UT) method
 - ¹⁹ Ant-lion optimizer (ALO)
 - ²⁰ EVs penetration rate