

چارچوب چندهدفه تصادفی جهت بازآرایی و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع

سیدعلیرضا احمدی^۱ وحید وحیدی نسب^۲ محمدصادق قاضی زاده^۱

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- آزمایشگاه سامانه‌های هوشمند انرژی (سُها)- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران
- ۲- استادیار- آزمایشگاه سامانه‌های هوشمند انرژی (سُها)- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران
- ۳- دانشیار- آزمایشگاه سامانه‌های هوشمند انرژی (سُها)- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

چکیده: در این مقاله، به منظور اجرای بازآرایی شبکه توزیع هوشمند و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده به طور هم‌زمان، چارچوبی چندهدفه و تصادفی ارائه می‌شود که در آن اهداف کاهش تلفات، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش انتشار آلاینده‌های زیست-محیطی دنبال می‌شود. در بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینه بازآرایی، بار مشترکین و پست‌های توزیع ثابت فرض شده است؛ در حالی که در واقعیت این بارها دائماً در حال تغییر هستند. عموماً به جهت برنامه‌ریزی، بدترین حالت که همان حداکثر بار است را مدنظر قرار می‌دهند، ولی آرایش به دست آمده با این فرضیه، به طور حتم آرایش بهینه نیست. به همین دلیل برای رفع این مشکل، در این مقاله به منظور پوشش عدم قطعیت‌های مربوط به بار، چارچوب مسئله بازآرایی و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی مقید به شانس ارائه شده و در آن شبیه‌سازی مونت کارلو به کار گرفته شده است. مسئله بازآرایی و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده به طور هم‌زمان به منظور دستیابی به اهداف از پیش تعیین شده، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است. به منظور حل مسئله بهینه‌سازی ارائه شده در چارچوب چندهدفه تصادفی این مقاله، از یک روش بهینه‌سازی قدرتمند تازه معرفی شده به نام رهیافت بهینه‌سازی مبتنی بر رفتار انسان استفاده شده است. در نهایت چارچوب چندهدفه تصادفی ارائه شده، بر روی یک شبکه‌ی ۳۳ شینه IEEE پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از آن تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: بازآرایی شبکه توزیع، تولیدات پراکنده، برنامه‌ریزی مقید به شانس، بهینه‌سازی مبتنی بر رفتار انسان

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.153

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۸/۱۹

تاریخ پذیرش مشروط: ۱۳۹۸/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۷/۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر وحید وحیدی نسب

نشانی نویسنده‌ی مسئول: آزمایشگاه سامانه‌های هوشمند انرژی (سُها) - دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - پ دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع عموماً به صورت حلقوی طراحی شده و به صورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از جمله مزایای شبکه‌های شعاعی می‌توان به کم بودن سطح اتصال کوتاه و ساده بودن طرح حفاظتی آن اشاره کرد. در کنار مزایایی که شبکه‌های شعاعی دارند، معایبی نظیر کم بودن قابلیت‌اطمینان نیز دارند. برای همین، برای بهره‌بردن از مزایای ساختار شعاعی، باید شبکه توزیع به گونه‌ای پیکربندی شود که هم هزینه‌های شبکه و تلفات کاهش یابد و هم قابلیت‌اطمینان و پروفیل ولتاژ شبکه در مقدار مناسبی قرار گیرد. به علاوه در تمامی ساختارهای به دست آمده باید قیود و شرایط زیر حاکم باشد:

- ساختار شعاعی شبکه حفظ شود؛
- توان مورد نیاز کلیه مشترکین تأمین گردد؛
- خطوط دچار اضافه بار نگردند؛
- ولتاژ شین‌ها دچار افت غیراستاندارد نگردند.

تلفات بالا از بزرگ‌ترین مشکلات و چالش‌های شبکه‌های توزیع است [۱]. رساندن انرژی با کیفیت به مشترکین و قابلیت‌اطمینان بالا از مهم‌ترین مسائلی است که رضایت مشترکین را در پی دارد. به همین جهت در شبکه‌های توزیع، مدیران همواره به دنبال راه‌حلی برای این مسائل بوده‌اند. تغییر وضعیت کلیدها از وضعیت در حالت عادی بسته به وضعیت در حالت عادی باز و برعکس و در نتیجه آن تغییر پیکربندی شبکه توزیع از جمله روش‌هایی است که می‌تواند شرایط بهره‌برداری شبکه توزیع را بهبود بخشد [۲].

این تغییر وضعیت کلیدها نیازمند سیستم پیشرفته اتوماسیون توزیع است. سیستم پیشرفته اتوماسیون توزیع که جزء اصلی شبکه‌های هوشمند است، می‌تواند با استفاده از ادوات اندازه‌گیری هوشمند و نیز حس‌گرهای تشخیص خاموشی، بلافاصله بعد از ایجاد حادثه در قسمتی از شبکه قدرت، مشکل را گزارش کرده و به‌طور خودکار به کمک کلیدهای موجود در شبکه توزیع، ساختار شبکه را تغییر داده و کمترین تعداد مصرف‌کننده را تحت تأثیر این عیب به وجود آمده در شبکه قرار دهد. تغییر ساختاری که با رعایت تمامی قیود شبکه و با اهدافی نظیر افزایش قابلیت‌اطمینان و کاهش تلفات انجام می‌گیرد. همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، به این تجدید آرایش و پیکربندی شبکه، بازآرایی می‌گویند.

بازآرایی شبکه توزیع از اقدامات اتوماسیون توزیع در شبکه‌های خودترمیم است. شبکه‌های خودترمیم، شبکه‌هایی هستند که قابلیت تشخیص خطا و رفع آن را در مواقع اضطراری دارند. اگر مسئله بازآرایی را به صورت یک تابع معرفی کنیم، ورودی آن وضعیت فعلی کلیدها و خطوط ارتباطی و همچنین وضعیت بارهای شبکه بوده و خروجی آن وضعیت جدید کلیدهاست. هرچقدر تعداد کلیدها بیشتر باشد می‌توان به نحو مؤثرتری به اهداف بازآرایی دست یافت و نتیجه

بهتری را انتظار داشت. اگرچه داشتن کلیدهای زیاد می‌تواند اهداف بازآرایی که همان کم کردن تلفات و بالابردن قابلیت‌اطمینان شبکه است را بهتر محقق کند، ولی این موضوع منجر به افزایش هزینه‌های ناشی از خرید تجهیزات و هزینه‌های بهره‌برداری شبکه توزیع می‌گردد. مسئله بازآرایی یک مسئله ذاتاً دشوار بهینه‌سازی است، چراکه در این مسئله هر کلید دو وضعیت باز و بسته دارد و در صورت وجود n کلید در شبکه، فضای جستجوی بهینه‌سازی ابعادی به اندازه 2^n دارد، و این موضوع کار بهینه‌سازی را بسیار دشوار می‌کند. بنابراین حجم عملیات مسئله بازآرایی بسیار بالا و تعداد راه‌حل‌های شدنی آن نیز بسیار زیاد است. باز یا بسته بودن کلیدها به‌عنوان خروجی این مسئله به ما می‌گوید که ساختار مسئله‌ی بهینه‌سازی بازآرایی یک مسئله گسسته و به‌طور دقیق‌تر در بعضی روش‌ها یک مسئله باینری است. حال اگر در این مسئله موضوعی مانند برنامه‌ریزی برای تعیین ظرفیت تولیدی واحدهای تولید پراکنده نیز وارد شود، ساختار مسئله پیچیده‌تر شده و به صورت ترکیبی گسسته، پیوسته تبدیل خواهد شد. برای حل این مسئله پیچیده تاکنون روش‌های زیادی در مراجع مورد استفاده قرار گرفته‌است. در [۳] چارچوب بازآرایی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی طراحی و از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری برای حل آن با هدف کاهش تلفات و افزایش قابلیت‌اطمینان استفاده شده‌است. از آنجایی که در این روش وضعیت کلیدها به صورت ۰ و ۱ و مسئله در فرم باینری بیان شده‌است، فضای جستجوی بهینه‌سازی ابعاد زیادی داشته که این موضوع احتمال گیر افتادن در بهینه محلی را زیاد می‌کند.

در [۴]، از الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی ترکیبی که در مرجع [۵] پیشنهاد شده‌بود، برای حل مسئله بازآرایی استفاده شده‌است. در [۴] کاهش تلفات به‌عنوان هدف بازآرایی دنبال شده‌است. نتایج حاصل از الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی ترکیبی با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقایسه شده‌است و در نهایت به پاسخ‌های تقریباً یکسانی رسیده‌اند.

در [۶]، الگوریتم ژنتیک برای اجرای بازآرایی انتخاب شده‌است. با توجه به ماهیت گسسته الگوریتم ژنتیک مسئله بازآرایی با این الگوریتم به پاسخ‌های نسبتاً خوبی رسیده‌است. به همین دلیل در مراجع دیگری نظیر [۷] نیز از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله استفاده گردیده‌است و کاهش تلفات به‌عنوان هدف بازآرایی عنوان گردیده‌است.

در [۸] از ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی برای انجام عملیات بازآرایی استفاده شده‌است و در آن کاهش تلفات و تعداد قطعی مصرف‌کنندگان به‌عنوان هدف دنبال شده‌است. از دیگر مراجعی که از روش‌های مبتنی بر منطق فازی بری حل مسئله بازآرایی استفاده کرده‌اند می‌توان به [۹] و [۱۰] اشاره کرد. ضعف عمده این روش‌ها عدم اطمینان از بهینه بودن پاسخ نهایی است.

در [۱۱-۱۲]، تأثیر حضور تولیدات پراکنده در مسئله بازآرایی مورد بررسی قرار گرفته‌است و به کمک الگوریتم ژنتیک پروفیل ولتاژ شبکه و تلفات را بهبود بخشیده شده‌است. در [۱۳] به‌طور مشابه

این مقاله مشابه [۱۵] از روشی مبتنی بر نظریه گراف استفاده شده- است.

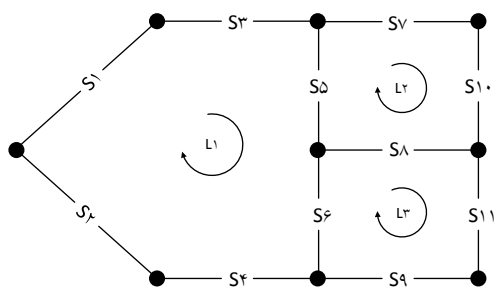
هر پیکربندی شبکه توزیع را می‌توان به صورت یک گراف در نظر گرفت که در آن شین‌ها راس‌های گراف و خطوط یال‌های آن هستند. از آن- جایی که تمامی پیکربندی‌های به وجود آمده از فرآیند بازآرایی می- بایست ساختار شعاعی داشته باشند و همچنین تمامی شین‌ها باید متصل به شین مرجع بوده و همواره تغذیه شوند، با استفاده از تعریف درخت در نظریه گراف، می‌توان نتیجه گرفت که گراف شبکه باید یک درخت باشد. بنابراین در فرآیند بازآرایی این مقاله، شرایط زیر باید برقرار باشد تا گراف به دست آمده از بازآرایی یک درخت باشد:

۱. اگر در یک شبکه p شین و q خط وجود داشته باشد، باید داشته باشیم:

$$q = p - 1 \quad (1)$$

۲. هیچ حلقه‌ای نباید در ساختار گراف شبکه وجود داشته باشد. در صورتی که وضعیت باز یا بسته بودن کلیدها و بالطبع وضعیت تمامی خطوط مشخص باشد، ماتریس وضعیت کلیدها به صورت زیر قابل تعریف است:

$$SSM = [s_1, s_2, \dots, s_n] \quad (2)$$



شکل (۱): شبکه نمونه ساده برای ارزیابی شعاعی بودن شبکه در روش بازآرایی

در ماتریس فوق برای کلیدهای باز $s=0$ بوده و برای کلیدهای بسته $s=1$ است. با همین رهیافت، تمامی حلقه‌های سیستم قابل تعریف است. برای مثال شبکه شکل (۱) را در نظر بگیرید. ماتریس وضعیت کلیدها در هر حلقه (بدون حلقه اساسی شبکه)، به صورت زیر است:

$$L_1 = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6] \quad (3)$$

$$L_2 = [s_5, s_6, s_7, s_8] \quad (4)$$

$$L_3 = [s_6, s_8, s_9, s_{10}] \quad (5)$$

$$L_{1,2} = (L_1 \cup L_2) - (L_1 \cap L_2) \quad (6)$$

$$L_{1,3} = (L_1 \cup L_3) - (L_1 \cap L_3) \quad (7)$$

$$L_{2,3} = (L_2 \cup L_3) - (L_2 \cap L_3) \quad (8)$$

اکنون برای برآوردن شرایط شعاعی بودن شبکه، در هر حلقه یک کلید می‌بایست باز شود و این درحالی‌ست که هیچ کلید باز مشترکی بین دو

عملیات بازآرایی در حضور تولیدات پراکنده انجام گرفته‌است و مسئله بهینه‌سازی با هدف کاهش تلفات، انتشار آلاینده‌ها و هزینه تولید با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری حل شده- است. در [۱۴] برای کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ به کمک بازآرایی در حضور تولیدات پراکنده از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شده‌است.

در مقالات بالا، بار مشترکین ثابت در نظر گرفته شده‌است. درحالی‌که در واقعیت این بارها دائماً در حال تغییر هستند. به همین منظور در این مقاله از برنامه‌ریزی مقیدبه‌شانس برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار در مسئله استفاده شده‌است. سپس مسئله بازآرایی و تعیین ظرفیت در شرایط عدم قطعیت به صورت یک مسئله بهینه‌سازی بیان شده و از رهیافت بهینه‌سازی مبتنی بر رفتار انسان برای حل آن استفاده شده- است. در ادامه چارچوب مدل‌سازی مسئله و رهیافت بهینه‌سازی ارائه خواهد شد و در انتها روش بر روی یک شبکه نمونه مورد آزمایش و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- ارائه چارچوب مدل‌سازی مسئله

هدف از مسئله مورد نظر، پیدا کردن وضعیت مناسب کلیدها و ظرفیت تولیدات پراکنده است، به طوری که اهداف از پیش تعیین شده که در قسمت بعد شرح داده می‌شود، را برآورده نماید. به همین منظور باید وضعیت بهینه‌ی باز یا بسته بودن کلیدها و نیز اندازه تولید توان واحدهای تولید پراکنده در این مسئله به دست آید. لذا مسئله موجود یک مسئله بهینه‌سازی است که متغیرهای تصمیم‌گیری در آن را می- توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به بازآرایی هستند که قرار است وضعیت نهایی و بهینه کلیدها را مشخص کنند و دسته دوم متغیرهای مربوط به تعیین ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده هستند.

۲-۱- روش بازآرایی

در فرآیند بازآرایی، وضعیت کلیدها باید به صورت هوشمندانه‌ای تغییر کند. مهم‌ترین شرطی که در این تغییر باید در نظر گرفته شود، حفظ شرایط شعاعی بودن ساختار شبکه است. به همین دلیل، در این مقاله، از روشی استفاده شده‌است که حفظ ساختار شعاعی شبکه را تضمین کند. در بعضی از روش‌ها بازآرایی در یک مدل باینری انجام می‌گیرد که در آن بهینه‌ساز وضعیت باز یا بسته بودن کلیدها را تک‌به‌تک بررسی و مشخص می‌نماید [۱۴]. در این گونه روش‌ها در صورتی که n کلید در شبکه وجود داشته باشد، فضای جستجوی بهینه‌سازی ابعادی به اندازه 2^n دارد، و این موضوع کار بهینه‌سازی را بسیار دشوار می‌کند. به علاوه این روش‌ها نیازمند زمان اجرای زیادی است و احتمال گیر افتادن در بهینه محلی آن‌ها نیز بالاست. مهم‌تر از همه اینکه این روش‌ها هیچ تضمینی برای ایجاد ساختارهای شعاعی جدید ندارند. در

در بهینه‌سازی این مقاله دنبال می‌شود. اگر هزینه تولید توان توسط i -امین واحد تولید پراکنده را با $Cost_{DG_i}$ و هزینه خرید انرژی الکتریکی از شبکه را با $Cost_{Grid}$ نمایش دهیم، کل هزینه توان تولیدشده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Cost_{total} = Cost_{Grid} + \sum_{i=1}^{N_{DG}} Cost_{DG_i} \quad (11)$$

که در آن N_{DG} تعداد واحدهای تولید پراکنده است و داریم:

$$Cost_{Grid} = C_{Grid} \times P_{Grid} \quad (12)$$

$$Cost_{DG_i} = C_{DG_i} \times P_{DG_i} \quad (13)$$

در روابط فوق، C_{Grid} و C_{DG_i} به ترتیب ضرایب هزینه‌های شبکه و i -امین واحد تولید پراکنده است. P_{Grid} مقدار توان گرفته شده از شبکه و P_{DG_i} مقدار توان تولیدی توسط i -امین واحد تولید پراکنده است.

ج) کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی: از دیگر اهدافی که در بهینه‌سازی این مقاله دنبال می‌شود، کاهش آلاینده‌های مخرب زیست‌محیطی است. در این راستا، شایع‌ترین آلاینده‌ها نظیر دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن در نظر گرفته شده است. مجموع آلاینده‌های تولیدی توسط شبکه و واحدهای تولید پراکنده از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$Emission_{total} = E_{Grid} + \sum_{i=1}^{N_{DG}} E_{DG_i} \quad (14)$$

$$E_{Grid} = \left(\begin{matrix} w_1 \times CO_2^{Grid} + \\ w_2 \times SO_2^{Grid} + \\ w_3 \times NO_x^{Grid} \end{matrix} \right) \times P_{Grid} \quad (15)$$

$$E_{DG_i} = \left(\begin{matrix} w_1 \times CO_2^{DG_i} + \\ w_2 \times SO_2^{DG_i} + \\ w_3 \times NO_x^{DG_i} \end{matrix} \right) \times P_{DG_i} \quad (16)$$

آلاینده‌های از نوع SO_2 و NO_x نسبت به CO_2 مضرتر بوده و کاهش آن‌ها اهمیت بیشتری دارد. به همین دلیل در مدل ارائه شده اثرات آن‌ها یکسان در نظر گرفته نشده است و دو ضریب وزنی W_1 و W_2 برای در نظرگیری این تفاوت در مدل آورده شده است.

۲-۳- ارائه تابع هدف کلی مسئله و قیود حاکم بر آن

مطابق با روش بازآرایی استفاده شده در مدل‌سازی‌های این مقاله، ابتدا تمامی کلیدها بسته شده و سپس در هر حلقه از شبکه یک کلید به صورت هوشمندانه و بهینه انتخاب شده و باز می‌شود. به علاوه ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده نیز به طور همزمان مشخص می‌شود. بنابراین همان‌طور که قبلاً گفته شد، مسئله موجود یک مسئله بهینه‌سازی است که در آن ماتریس متغیرهای تصمیم‌گیری به صورت زیر است:

یا چند حلقه نباید باشد. بنابراین سیستم نشان داده شده در شکل (۱) شعاعی است، اگر و تنها اگر شرط زیر در آن برقرار باشد.

$$\sum \left(\begin{matrix} prod(L_1), prod(L_2), \\ prod(L_3), prod(L_4), \dots \end{matrix} \right) \quad (9)$$

روش بازآرایی فوق تضمین‌کننده حفظ ساختار شعاعی شبکه است. این روش برای تمامی شبکه‌ها مانند شبکه شکل (۱) قابل اجراست. سرعت و سادگی از مهمترین ویژگی‌های این روش است. با استفاده از این روش، الگوریتم بهینه‌سازی در هر تکرار تنها یک کلید از هر حلقه انتخاب می‌کند و در صورتی که شرط رابطه فوق برقرار باشد، شبکه موردنظر با پیکربندی انتخابی شدنی در نظر گرفته شده و فرآیند ادامه می‌یابد. در غیر این صورت الگوریتم بهینه‌سازی یک دسته جدید از کلیدها را برای باز شدن از حلقه‌ها انتخاب می‌کند. با این روش، الگوریتم بهینه‌سازی امکان رسیدن به بهینه مطلق را دارد.

۲-۲- اهداف بهینه‌سازی

در فرآیند بازآرایی و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده هم باید وضعیت مناسب کلیدها و هم ظرفیت تولیدی واحدهای تولید پراکنده مشخص شود. وجه تمایز و برتری پیکربندی‌ها و ظرفیت‌های مختلف تولیدات پراکنده در میزان دستیابی آن‌ها به اهداف از پیش تعیین شده بهره‌برداری است. در این مقاله بازآرایی و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده با اهدافی نظیر کاهش تلفات، کاهش هزینه کلی تولید توان و کاهش آلاینده‌های منتشر شده توسط واحدهای تولید پراکنده انجام می‌گیرد. در زیر هر یک از این اهداف و نحوه رسیدن به آن‌ها در مسئله بهینه‌سازی توضیح داده خواهد شد.

الف) کاهش تلفات: به دلیل پایین بودن سطح ولتاژ شبکه توزیع و در نتیجه بالا بودن جریان عبوری از خطوط آن و نیز به دلیل شعاعی بودن ساختار شبکه توزیع، این قسمت از سیستم قدرت، در مقایسه با سایر قسمت‌ها نظیر تولید و انتقال بیشترین سهم را در تلفات کلی شبکه به خود اختصاص داده است. تلفات، علاوه بر تحمیل هزینه به جهت هدر دان انرژی تولیدی در نیروگاه‌ها، هزینه‌های دیگری نظیر اشغال ظرفیت خطوط و ترانس‌ها و ایجاد نیاز به سرمایه‌گذاری‌های جدید در توسعه شبکه را نیز به دنبال دارد. به همین جهت در این مقاله کاهش تلفات به عنوان یکی از اهداف در مسئله بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. برای هر پیکربندی در فرآیند بهینه‌سازی تلفات از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^{nl} r_k \times I_k^2 \quad (10)$$

که در آن، r_k و I_k به ترتیب مقاومت و جریان عبوری از خط k -ام و n_l تعداد کل خطوط موجود در شبکه است.

ب) کاهش هزینه کلی تولید توان: کمینه‌سازی هزینه کلی تولید توان یا به عبارتی کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از دیگر اهدافی است که

$$P_r \{g_j(x, \xi) \leq 0, j = 1, 2, \dots, k\} \geq \alpha \quad (23)$$

که در آن $x \in R^n$ بردار متغیر تصمیم‌گیری، ξ بردار تصادفی با چگالی احتمال معین $\phi(\xi)$ است. $f(x, \xi)$ تابع هدف و $g_j(x, \xi)$ قیدهای مسئله هستند. $P_r\{0\}$ احتمال رخداد پیشامد $\{0\}$ بوده، α و β به ترتیب سطح‌های اطمینان تعیین شده برای تابع هدف و قیدهاست.

تکنیک‌های قبلی برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی مقید به شانس فوق مبتنی بر تبدیل قیود تصادفی به معادله‌های قطعی متناظر با آن بر طبق سطح اطمینان از پیش تعیین شده است. متأسفانه این تکنیک‌ها برای حل مسائل پیچیده‌ای مانند مسئله‌ی بازاریابی این مقاله، مناسب نیست. به همین دلیل در این مقاله مشابه برخی از تحقیقات [۱۶-۱۷]، از روشی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. برای هر بردار تصمیم‌گیری X روند استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای چک کردن قیدها در ادامه توضیح داده شده است. برای این کار، باید N بردار تصادفی مستقل $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ از تابع چگالی احتمال $\phi(\xi)$ تولید شود. فرض کنید تعداد حالت‌هایی که قید را رعایت کرده است برابر \bar{N} باشد، در این صورت، درصد نسبی حالت‌هایی که محدودیت قید را رعایت کرده، به‌طور تقریبی برابر \bar{N}/N است. این یعنی قید تصادفی موجود در رابطه‌ی (۲۳) برقرار بوده، اگر و تنها اگر $\bar{N}/N \geq \alpha$ باشد. به‌طور مشابه برای یک بردار داده‌شده‌ی X می‌توان شبیه‌سازی مونت کارلو را برای محاسبه بیشترین مقدار \bar{N} که رابطه‌ی مربوطه تابع هدف موجود در معادله (۲۲) را برقرار می‌کند، به‌کار برد. از N بردار تصادفی مستقل تولیدشده $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ می‌توان یک دسته پاسخ تابع هدف (f_1, f_2, \dots, f_N) که در آن‌ها $f_i = f(x, \xi_i)$ است، را به‌دست آورد. در صورتی که \bar{N} مقدار قدرمطلق $(1-\beta)N$ باشد، با استفاده از تعاریف ابتدای احتمالات این‌طور می‌توان نتیجه گرفت که \bar{N} -امین مقدار موجود در دسته‌ی (f_1, f_2, \dots, f_N) می‌تواند تقریب خوبی برای \bar{f} باشد که شرایط موجود در معادله (۲۲) را نیز برآورده کند.

تمامی مواردی که در بالا گفته شد برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار در مسئله‌ی بهینه‌سازی این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. در این- راستا فرض شده است که بار شین i متغیری تصادفی بوده که دارای توزیع نرمال است. اکنون که تابع هدف مسئله هم در شرایط قطعی و هم در شرایط عدم قطعیت بیان شد، نیازمند یک روش برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی هستیم. در این مقاله به‌منظور اجرای فرآیند بهینه‌سازی از یک روش بهینه‌سازی قدرتمند تازه معرفی شده به‌نام رهیافت بهینه‌سازی مبتنی بر رفتار انسان استفاده شده است. در قسمت بعدی این روش به‌طور کامل معرفی می‌گردد.

$$X = [OS_1, OS_2, \dots, OS_i, PG_1, PG_2, \dots, PG_j] \quad (17)$$

که در آن OS_i کلید انتخابی در حلقه‌ی i -ام است که باید باز شود تا فرآیند بازاریابی انجام گیرد. PG_j نیز مقدار ظرفیت تولید توان بهینه برای i -امین واحد تولید پراکنده است.

حال به‌منظور کاهش تلفات مقدار P_{loss} که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، باید کمینه گردد. همچنین برای کاهش هزینه کلی تولید توان و کاهش انتشارات آلاینده‌های زیست‌محیطی مقادیر $Cost_{total}$ و $Emission_{total}$ باید کمینه گردند. بنابراین تابع هدف کلی مسئله به‌صورت زیر خواهد شد:

$$OF = \min \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \times P_{loss} + \\ \lambda_r \times Cost_{total} + \\ \lambda_r \times Emission_{total} \end{array} \right\} \quad (18)$$

که در آن λ_i ها ضرایب وزنی هستند که بر طبق ضریب اهمیت هر یک از اهداف تعیین می‌گردند. کمینه‌سازی تابع هدف فوق یک مسئله بهینه‌سازی است. در این مسئله قید بهینه‌سازی حدود کمینه ولتاژ (V_{min}) و بیشینه ولتاژ (V_{max}) و همچنین حد مجاز جریان عبوری از خطوط (I_{max}) است. به این صورت که در هر شرایطی ولتاژ هر شین (V_i) نباید از مقادیر مشخصی کمتر و یا بیشتر باشد.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (19)$$

$$|I_k| \leq I_{max} \quad (20)$$

۲-۴- برنامه‌ریزی مقید به شانس برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار

در بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی بازاریابی، بار مشترکین و پست‌های توزیع ثابت فرض شده است. در حالی که در واقعیت این بارها دائماً در حال تغییر هستند. عموماً به جهت برنامه‌ریزی، بدترین حالت که همان حداکثر بار است را مدنظر قرار می‌دهند، ولی آرایش به‌دست آمده با این فرضیه، به‌طور حتم آرایش بهینه نیست. در این مقاله به‌منظور پوشش عدم قطعیت‌های مربوطه بار از برنامه‌ریزی مقید به شانس استفاده شده است که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم. برنامه‌ریزی مقید به شانس یکی از مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی است که در آن تابع هدف و قیود یک مسئله بهینه‌سازی با پارامترهای تصادفی همراه می‌شود. این روش به‌دنبال آن است که رهیافت بهینه-سازی را با در نظرگیری قیود عدم قطعیت اجرا کند. نقطه‌ی بهینه‌ی به-دست آمده با این روش محدوده‌ی قیدها که خود شامل پارامترهای تصادفی می‌باشد را رعایت می‌کند. به‌طور معمول یک مسئله برنامه-ریزی مقید به شانس به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min \bar{f} \quad (21)$$

به‌طوری‌که:

$$P_r \{f(x, \xi) \leq \bar{f}\} \geq \beta \quad (22)$$

و همچنین:

۳- رهیافت بهینه‌سازی مبتنی بر رفتار انسان

روش‌های بهینه‌سازی و به‌ویژه الگوریتم‌های فراابتکاری به‌طور گسترده برای حل مسائل مختلفی در مهندسی و علوم کاربردی دیگر به کار رفته است. بهینه‌ساز مبتنی بر رفتار انسان (HBBO) یک رهیافت بهینه‌سازی جدید است که در [۱۸] معرفی شده است و در [۱۹-۲۰] برای مسائل قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. بر خلاف بیشتر الگوریتم‌های فراابتکاری که از طبیعت به عنوان منبع الهام استفاده کرده‌اند، این الگوریتم از رفتار انسان برای توسعه خود بهره گرفته است. در جامعه انسانی هر کس در حال حرکت به سمت اهداف شخصی خود می‌باشد ولی ممکن است هنوز به آن نرسیده باشد. یک فرد موفق به کسی اطلاق می‌شود که به تمامی اهداف خود رسیده باشد. اگر کسی تصمیم دارد فرد موفق باشد باید تلاش کند تا بهترین نسخه خود باشد. از آنجایی که عقاید و طرز فکر افراد با یکدیگر متفاوت است، هر فردی موفقیت را در راه مشخص می‌بیند و تلاش می‌کند به اهداف معینی برای رسیدن به این مهم، دست یابد. برای همین افراد در زمینه‌های مختلفی کار و تحصیل می‌کنند. برای مثال یک فرد ممکن است خوانندگی را به عنوان مسیر موفقیت در نظر بگیرد، در حالیکه فرد دیگری موفقیت در ورزش را برای خود این گونه ترسیم نماید. در بین تمامی افرادی که در زمینه‌ها و دسته‌های مختلفی فعالیت می‌کنند، یک فرد یا گروهی از افراد از بقیه برجسته‌تر بوده و تخصص بیشتری دارند و دیگران سعی در الگو قرار دادن این افراد و آموزش از آن‌ها برای بهتر کردن مهارت‌های فردی خود در آن زمینه و دسته دارند.

جامعه ما از افراد زیادی با عقاید و دیدگاه‌های مختلفی تشکیل شده است که این عقاید و دیدگاه‌ها در طول زندگی آن‌ها ثابت نخواهد بود. علاوه بر این هر فردی در طول زندگی خود با افراد با دیدگاه‌های مختلفی در ارتباط بوده که از ایده‌ها و توصیه‌های آن‌ها برای بهتر کردن زندگی خود استفاده می‌کند. هر کدام از این ارتباطات می‌تواند مانند دیدار با یک مشاور در نظر گرفته شود که هم می‌تواند بر روی فرد تاثیرگذار باشد و هم می‌تواند نباشد. همچنین هر فردی ممکن است با کسی همفکری کند که دیدگاه‌های متفاوتی از او داشته باشد و بتواند عقاید و یا دیدگاه‌های او را دگرگون سازد. در برخی از موارد این فرد ممکن است زمینه‌ی کاری و یا تحصیلی خود را به خاطر صحبت‌های آن فرد مشورت دهنده تغییر داده و برای پیشرفت خود به دنبال موقعیت بهتری در زمینه‌ی کاری یا تحصیلی دیگری باشد.

آنچه در بالا گفته شد تمامی آن رفتاری است که HBBO بر آن استوار است و نشان داده شده است که با مدل‌سازی این رفتارها یک رهیافت بهینه‌سازی قدرتمند برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی ایجاد خواهد شد.

بر طبق آنچه که در بالا گفته شد، در این الگوریتم بعد از تولید جمعیت اولیه، تمامی افراد به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند و در هر دسته تمامی افراد با انجام روند آموزش که در مرحله دوم الگوریتم

توضیح داده خواهد شد در جهت پیشرفت خود تلاش می‌کنند. سپس هر فرد به صورت تصادفی یک فرد را از کل جمعیت برای همفکری انتخاب می‌کند و به صورتی که در مرحله سوم الگوریتم شرح داده خواهد شد شروع به همفکری با او می‌نماید. بعلاوه همان‌طور که در جامعه واقعی ممکن است عقاید و دیدگاه‌های یک فرد در طول زمان تغییر کند و حتی شغل یا رشته تحصیلی خود را تغییر دهد، در این الگوریتم نیز با در نظر گرفتن یک احتمال تغییر دیدگاه در بعضی دسته‌ها، ممکن است یک فرد راه دیگری را مناسب دیده و دسته خود را تغییر دهد. در نهایت شرایط خاتمه بررسی می‌شود و در صورتی که یکی از آن‌ها رخ داده باشد الگوریتم متوقف می‌شود.

تمامی آنچه که در بالا گفته شد در پنج مرحله بهینه‌ساز مبتنی بر رفتار انسان قرار می‌گیرد. این پنج مرحله به شرح زیر است [۱۸]:

(۱) شروع به کار و مقداردهی اولیه: که در این مرحله جمعیت اولیه تولید در بین دسته‌ها توزیع می‌شود.

(۲) آموزش: در این مرحله، هر فرد سعی در آموزش و ارتقا خود از طریق حرکت اطراف بهترین فرد دسته خود که فرد نخبه نام دارد، می‌کند. حرکت اطراف فرد نخبه برای یک مسئله‌ی سه بعدی با تغییر مختصات نقطه در دستگاه کروی اجرا می‌گردد.

(۳) همفکری: در این مرحله، تمامی افراد به جز بهترین فرد جامعه، یک فرد برای مشورت از بین تمامی اعضای جامعه انتخاب کرده و شروع به همفکری با او می‌نماید. در روند همفکری، فرد مشورت دهنده تعدادی از مولفه‌های فرد را تغییر می‌دهد. حال در صورتی که مجموعه‌ی مولفه‌های جدید این فرد، مقدار تابع هدف بهتری پیدا کند، این به معنی نتیجه بخش بودن همفکری آنان می‌باشد. (بهتر شدن تابع هدف برای یک مسئله‌ی کمینه‌سازی به معنای کمتر شدن مقدار آن و برای یک مسئله‌ی بیشینه‌سازی به معنای بیشتر شدن آن است). در این صورت مولفه‌های آن فرد با مجموعه‌ی مولفه‌های جدید بدست آمده جایگزین می‌شود، ولی در صورتی که همفکری نتیجه بخش نباشد هیچ تغییری در مولفه‌های فرد ایجاد نمی‌شود. از آنجایی که ارزیابی مقدار تابع هدف برای مجموعه‌ی مولفه‌های جدید در بعضی موارد به دلیل فراخوانی و اجرای تابع هدف ممکن است زمان بر باشد و یا هزینه‌های دیگری داشته باشد دو حالت کاری در این الگوریتم در نظر گرفته شده است. حالت پیشرفته، که درست همانند روندی است که در بالا نیز توضیح داده شد و حالت ساده که مجموعه مولفه‌های جدید را بدون ارزیابی و بررسی بهتر شدن با مجموعه مولفه‌های قبلی جایگزین می‌نماید.

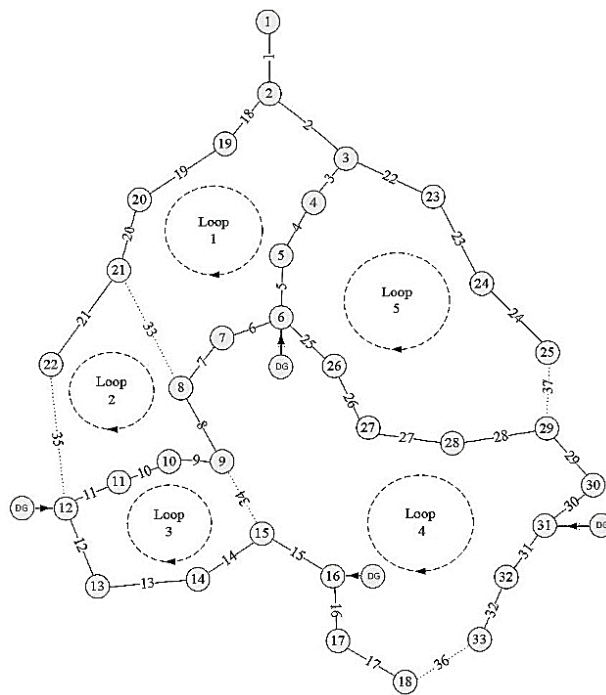
(۴) احتمال تغییر دیدگاه: همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در هر تکرار، در بعضی از دسته‌ها یک فرد ممکن است دسته خود را تغییر دهد. احتمال این تغییر برای هر دسته با استفاده از یک روش تخصیص احتمال بر مبنای رتبه محاسبه می‌شود.

(۵) ارزیابی و بررسی شرایط خاتمه: با اجرای مراحل آموزش و همفکری، مولفه‌های افراد تغییر می‌کند. بنابراین در این مرحله مقدار تابع هدف افراد محاسبه می‌شود و در صورتی که یکی از شرایط خاتمه

هستند و ۵ خطی که به صورت خط چین دیده می‌شوند، کلیدهای در حالت عادی باز هستند. وضعیت شبکه نشان داده شده در شکل (۶) شبکه ابتدایی قبل از اجرای بازآرایی است. ولتاژ و توان مبنا در این شبکه به ترتیب ۱۲٫۶۶ کیلو ولت و ۱۰۰ کیلو ولت آپر است. اطلاعات مربوط به خطوط و بارهای متصل به شین‌های شبکه مورد مطالعه در [۲۲] آمده است. در این مقاله فرض شده است که تمامی خطوط دارای کلید باشند، لذا تعداد ۳۷ کلید در مجموع در مسئله وجود دارند. این فرض، مسئله بازآرایی را با چالش بیشتری روبه‌رو می‌سازد و کار بهینه‌سازی را پیچیده‌تر می‌کند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در مدل‌سازی‌ها تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده نیز وجود دارد. در شکل (۶) مکان حضور تولیدات پراکنده نیز مشاهده می‌شود. تولیدات پراکنده مورد استفاده در این مقاله از سه نوع پیل سوختی (نصب شده در شین ۶)، میکروتوربین (نصب شده در شین ۱۲) و توربین‌گازی (نصب شده در شین‌های ۱۶ و ۳۱) است. اطلاعات مربوط به آلاینده‌های زیست‌محیطی هر یک از این منابع تولید پراکنده و نیز شبکه در جدول (۱) آمده است [۲۳]. برای حل مسئله بازآرایی در این مقاله از دو الگوریتم ژنتیک (GA) و HBBO استفاده شده است. برای GA جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب استفاده شده است و مقدار جمعیت اولیه ۱۵۰ و تعداد نسل ۳۰ تنظیم شده است. دیگر پارامترها بدون تغییر برابر مقادیر پیش فرض تنظیم شده است. پارامترهای HBBO در جدول (۲) آمده است. از آنجایی که HBBO در حالت پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته است، در هر تکرار به دو ارزیابی تابع هدف نیاز دارد. به همین دلیل برای GA حداکثر تعداد تکرارها ۳۰ و برای HBBO مقدار ۱۵ تنظیم شده است.

با اجرای الگوریتم‌های GA و HBBO نتایج بهینه‌سازی به دست می‌آید. شماره کلیدهایی که باید در شبکه باز شوند، که در واقع بیانگر توپولوژی انتخاب شبکه است، به همراه دیگر شاخص‌های به کار رفته در تابع هدف در جدول (۴) آورده شده است. مقدار تولید توان واحدهای تولید پراکنده در جدول (۳) آمده است. داده‌های موجود در جدول نتایج ارزشمندی را به تصویر می‌کشد. با مقایسه‌ی سناریوی اول (حالت شبکه اصلی بدون بازآرایی) و سناریوی دوم (اجرای همزمان بازآرایی و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده بدون در نظرگیری عدم قطعیت)، مشاهده می‌شود که اجرای همزمان بازآرایی و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده تأثیر زیادی در کاهش تلفات و نیز کاهش هزینه تولید توان و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی دارد. با این مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که بازآرایی شبکه توزیع موثرترین و کم‌هزینه‌ترین روش برای کاهش مشکلات بهره‌برداری شبکه است. تصویر پروفیل ولتاژ شبکه برای الگوریتم HBBO در دو سناریوی اول و دوم در شکل (۷) آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود پروفیل ولتاژ نیز بهبود یافته است. سناریوی سوم اجرای همزمان بازآرایی و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده با در نظرگیری عدم قطعیت را نشان می‌دهد. در این سناریو به دلیل ماهیت پیچیده‌ای که تابع هدف در اثر وجود عدم قطعیت و متغیرهای

اتفاق بیفتد الگوریتم متوقف می‌شود و در غیر این صورت الگوریتم به مرحله دوم می‌رود. شرایط خاتمه در این الگوریتم به صورت زیر است: (الف) تعداد تکرارها به حداکثر مقدار تعیین برسد. (ب) تعداد ارزیابی‌های تابع هدف به حداکثر مقدار تعیین شده برسد. (ج) میانگین تغییر نسبی در مقدار تابع هدف در طول تعداد تکرار مشخصی کمتر از مقدار آستانه تعیین شده گردد.



شکل (۶): شبکه نمونه مورد بررسی در مطالعات به همراه مکان حضور تولیدات پراکنده

جدول (۱): اطلاعات مربوط به آلاینده‌های واحدهای تولید پراکنده و شبکه [۱۶]

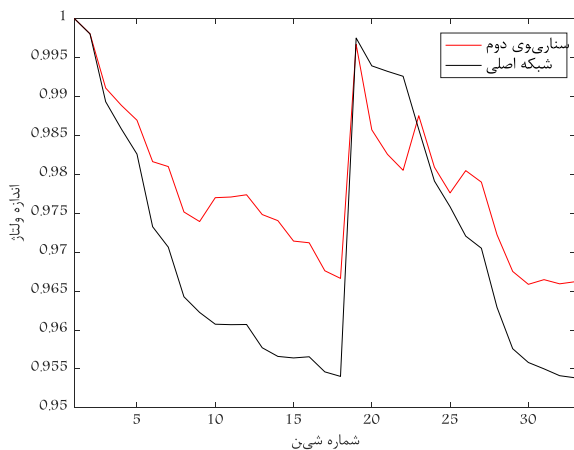
نوع آلاینده	پیل سوختی	میکروتوربین	توربین گازی	واحد تولید کننده توان
CO_2	۱۱۰۸	۱۵۹۶	۱۰۷۸	۲۰۳۱
NO_x	۱/۱۵	۰/۴۴	۰/۰۳	۵/۰۶
SO_2	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۷/۹

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم HBBO

پارامتر	N_{pop}	N_{field}	k_1	k_2	σ	حالت کاری الگوریتم
مقدار	۱۵۰	۳۰	۰	۲/۵	۰/۲	پیشرفته

۴- پیاده‌سازی و ارائه نتایج

به منظور پیاده‌سازی و اجرای روش پیشنهادی در فصل گذشته و ارزیابی آن، این روش بر روی یک شبکه‌ی ۳۳ شینه IEEE پیاده شده است. شبکه ۳۳ شینه مورد استفاده در این مقاله، به‌طور معمول در اکثر مراجع مربوط به بازآرایی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳-۲۷]. شکل (۶) تصویر این شبکه را نشان می‌دهد. در این شکل ۳۲ خطی که به صورت خط پرنگ دیده می‌شوند کلیدهای در حالت عادی بسته



شکل (۷): پروفیل ولتاژ شبکه

۵- نتیجه

در این مقاله چارچوبی چندهدفه و تصادفی برای بهینه‌سازی هم‌زمان بازآرایی شبکه‌های توزیع و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده ارائه شد. در این چارچوب هم وضعیت مناسب کلیدها و هم ظرفیت تولیدی واحدهای تولید پراکنده مشخص شده است. وجه تمایز و برتری پیکربندی‌ها و ظرفیت‌های مختلف تولیدات پراکنده در میزان دستیابی آن‌ها به اهداف از پیش تعیین‌شده بهره‌برداری عنوان شد. اهداف موردنظر در مدل‌سازی‌ها کاهش تلفات، کاهش هزینه کلی تولید توان و کاهش آلاینده‌های منتشرشده توسط واحدهای تولید پراکنده در نظر گرفته شد که در مورد هر یک به‌طور جداگانه توضیحاتی ارائه شد. عدم قطعیت بار به‌عنوان مهم‌ترین عامل در تبدیل مسئله به فرم برنامه‌ریزی تصادفی و به‌چالش کشاندن برنامه‌ریزی‌های بهره‌برداری در مدل‌سازی‌ها عنوان شد و برای مدل‌سازی آن راه‌حلی در نظر گرفته شد. برای حل مسئله بهینه‌سازی از یک الگوریتم فراابتکاری جدید و قدرتمند به نام HBBO استفاده شد. سپس همین چارچوب ارائه‌شده بر روی یک شبکه توزیع استاندارد پیاده‌سازی شد. نتایج به‌دست آمده از مطالعات نشان داد که چارچوب ارائه‌شده رهیافتی مناسب برای حل مشکلات بهره‌برداری شبکه‌های توزیع از جمله کاهش تلفات، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی است.

مراجع

- [۱] پرویزی مساعد مهدی، فرمانی فرید، انوری مقدم امجد، رحیمی کیان اشکان، منصف حسن. جایابی و تعیین اندازه بهینه و چند هدفه مولدهای انرژی تجدید پذیر در یک شبکه توزیع با در نظر گرفتن مدل بار. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۴؛ ۱۲ (۱): ۵۹-۶۸.
- [۲] مویدی راد حجت، فلقی حمید، فرشاد محسن. یک الگوریتم ابتکاری برای تجدید آرایش شبکه‌های توزیع به منظور کاهش

تصادفی پیدا می‌کند، بهینه‌سازی با چالش زیادی مواجه می‌شود. همان‌طور که در نتایج دیده می‌شود، الگوریتم HBBO عملکرد بهتری از GA به‌خصوص در این سناریو که پیچیده‌ترین سناریو می‌باشد، دارد.

جدول (۴): نتایج مطالعات در سناریوهای مختلف

کلیدهای باز	سناریوی اول شبکه اصلی		سناریوی دوم		سناریوی سوم	
	GA	HBBO	GA	HBBO	GA	HBBO
تلفات (kW)	۲۰۲/۶۷	۷۱/۰۳	۶۸/۴۱	۶۸/۴۱	۱۴۰/۶۰	۱۰۹/۱۶
هزینه تولیدتوان (×۱۰۶)	۳/۴۳۹۲	۲/۳۸۵۹	۲/۳۷۶۰	۲/۳۷۶۰	۳/۰۲۸۳	۲/۵۸۰۳
میزان انتشارات (×۱۰۷)	۷/۰۲۹۵	۵/۵۸۶۸	۵/۵۷۰۴	۵/۵۷۰۴	۶/۵۱۸۵	۵/۹۸۶۶

نتایج به‌دست آمده از مطالعات موردی انجام‌شده، نشان می‌دهد که اجرای هم‌زمان بازآرایی شبکه توزیع و تعیین ظرفیت تولیدات پراکنده روشی موثر و کم‌هزینه برای دستیابی به اهداف اصلی بهره‌برداری شبکه است. کاهش تلفات، بهبود شاخص‌های قابلیت‌اطمینان، کاهش هزینه‌های تولید توان و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی از مهمترین نتایج این عملیات است.

جدول (۳): میزان تولید توان واحدهای تولید پراکنده

مقدار تولید توان (kW)	سناریوی دوم		سناریوی سوم	
	GA	HBBO	GA	HBBO
واحد متصل به شین ۶	۴۹۲/۵۷	۴۹۹/۸۹	۴۳۵/۰۵	۴۹۹/۰۱
واحد متصل به شین ۱۲	۲۹۷/۰۵	۲۹۹/۷۵	۲۰/۲۸	۲۹۸/۸۸
واحد متصل به شین ۱۶	۲۹۷/۴۴	۲۹۹/۸۸	۲۷۳/۷۳	۲۹۹/۴۷
واحد متصل به شین ۳۱	۴۹۷/۳۲	۴۹۸/۸۰	۴۰۷/۰۶	۴۹۹/۹۵

- [15] M. Andervazh, J. Olamaei and M. Haghifam, "Adaptive multi-objective distribution network reconfiguration using multi-objective discrete particles swarm optimisation algorithm and graph theory," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 12, pp. 1367-1382, December 2013.
- [16] B. Odetayo, J. MacCormack, W. Rosehart, and H. Zareipour, "A chance constrained programming approach to integrated planning of distributed power generation and natural gas network," *Electric Power Systems Research*, vol. 151, pp. 197-207, 2017.
- [17] N. Yang, C. Yu, F. Wen, and C. Chung, "An investigation of reactive power planning based on chance constrained programming," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, no. 9, pp. 650-656, 2007.
- [18] SA. Ahmadi, "Human behavior-based optimization: a novel metaheuristic approach to solve complex optimization problems," *Neural Computing and Applications*, pp. 1-12, 2016.
- [19] SA Ahmadi, H. Karami, and B. Gharehpetian. "Comprehensive coordination of combined directional overcurrent and distance relays considering miscoordination reduction." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 92 (2017): 42-52.
- [20] SA. Ahmadi, et al. "Application of hyper-spherical search algorithm for optimal coordination of overcurrent relays considering different relay characteristics." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 83 (2016): 443-449.
- [21] Y. Lin and Z. Bie, "Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding," *Applied Energy*, 2017.
- [22] H. Wang, W. Zhang, and Y. Liu, "A Robust Measurement Placement Method for Active Distribution System State Estimation Considering Network Reconfiguration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016.
- [23] T. Niknam, E. A. Farsani, M. Nayeripour, and B. Bahmani Firouzi, "A new tribe modified shuffled frog leaping algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering distributed generator units," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 308-333, 2012.
- [24] H. Arasteh, et al. "Stochastic System of Systems Architecture for Adaptive Expansion of Smart Distribution Grids." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* (2018).
- [25] H. Arasteh, et al. "SoS-based multiobjective distribution system expansion planning." *Electric Power Systems Research* 141 (2016): 392-406.
- تلفات اهمی مبتنی بر نظریه ی گراف. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۳؛ ۱۱ (۱): ۵۹-۷۲.
- [3] B. Amanulla, S. Chakrabarti and S. N. Singh, "Reconfiguration of Power Distribution Systems Considering Reliability and Power Loss," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 918-926, April 2012.
- [4] C.-T. Su and C.-S. Lee, "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 1022-1027, 2003.
- [5] J.-P. Chiou and F.-S. Wang, "A hybrid method of differential evolution with application to optimal control problems of a bioprocess system," in *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, 1998, pp. 627-632: IEEE.
- [6] Y.-Y. Hsu, J.-H. Yi, S. Liu, Y. Chen, H. Feng, and Y. Lee, "Transformer and feeder load balancing using a heuristic search approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 184-190, 1993.
- [7] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Ishihara, "Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration," *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 7, no. 3, pp. 1044-1051, 1992.
- [8] D. Bernardona, V. Garcia, A. Ferreira, and L. Canha, "Electric distribution network reconfiguration based on a fuzzy multi-criteria decision making algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 1400-1407, 2009.
- [9] J. Chakravorty, "Network reconfiguration of distribution system using fuzzy controlled evolutionary programming," *International journal of engineering science and advanced technology*, vol. 2, pp. 176-182, 2012.
- [10] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Reconfiguration of distribution network with DG using fuzzy multi-objective method," in *Innovation Management and Technology Research (ICIMTR), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 316-321.
- [11] J.-H. Choi and J.-C. Kim, "Network reconfiguration at the power distribution system with dispersed generations for loss reduction," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, 2000*, vol. 4, pp. 2363-2367: IEEE.
- [12] J.-H. Choi, J.-C. Kim, and S.-I. Moon, "Integration operation of dispersed generations to automated distribution networks for network reconfiguration," in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, 2003, vol. 2, p. 5 pp. Vol. 2: IEEE.
- [13] T. Niknam, A. Kavousi Fard, and A. Baziar, "Multi-objective stochastic distribution feeder reconfiguration problem considering hydrogen and thermal energy production by fuel cell power plants," *Energy*, vol. 42, pp. 563-573, 2012.
- [14] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. V. L. Narasimham, "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 317-325, 2013.