

ارائه یک روش جدید بهینه‌سازی آرایش خطوط شبکه توزیع توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبود یافته در حضور منابع تولید پراکنده

رضا اسلامی^۱ سید امیر حسینی^۲

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

eslami@sut.ac.ir

۲- استادیار- گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران

s.hosseini@iut.ac.ir

چکیده: یکی از موثرترین راهکارها برای کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه‌های توزیع، بازآرایی یا همان تجدیدآرایش خطوط شبکه می‌باشد. بازآرایی در حقیقت باز کردن برخی از خطوط بسته و بستن برخی خطوط باز به منظور رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده از قبیل کاهش تلفات می‌باشد. براین اساس، در این مقاله مدل ریاضی جدیدی برای بازآرایی شبکه توزیع به منظور بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه در حضور تولیدات پراکنده، ارائه شده است. نوآوری این مقاله بهینه‌سازی همزمان برای کاهش انحراف ولتاژ نقاط مختلف شبکه و انرژی اتلافی شبکه با در نظرگیری قیود بخش بار شبکه، محدودیت دامنه ولتاژ باس‌ها، محدودیت توان عبوری خطوط، روابط حاکم بر تولیدات پراکنده و محدودیت توان ارسالی از شبکه بالادست می‌باشد. همچنین از دیگر نوآوری‌های مقاله حاضر، نرمالیزه کردن بخش‌های مختلف تابع چند هدفه می‌باشد که با این کار تمامی موارد به صورت درصد بوده و تابع مذکور از حالت چند هدفه به صورت تک هدفه درآمده و بنابراین نیازی به تعریف وزن برای هر بخش تابع هدف برای یکسان سازی واحد محاسباتی نیست. همچنین از آنجا که مسئله بازآرایی مدنظر مقاله حاضر، به صورت غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح می‌باشد، لذا بمنظور کاهش زمان حل مسئله، استفاده از الگوریتم تکاملی رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید، پیشنهاد می‌شود. روش جدید پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه توزیع ۶۹ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان از موفقیت این روش در دستیابی به اهداف پیش‌بینی شده دارد. براین اساس تلفات شبکه به میزان ۵۷ درصد کاهش یافته است و پروفیل ولتاژ شبکه در چارچوب مجاز قرار گرفته است بطوریکه مینیمم مقدار ولتاژ پس از اجرای روش پیشنهادی ۰.۹۵ پریونیت بوده است. مقایسه با مطالعات گذشته نشان می‌دهد که نتایج حاصل شده از روش پیشنهادی در بهبود اهداف مدنظر بسیار موفق‌تر بوده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع، تجدید آرایش، کاهش تلفات، پارامترهای کیفیت توان، بهینه‌سازی

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.227

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول: رضا اسلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تبریز- دانشگاه صنعتی سهند تبریز- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

یافته، ارائه شده است. در مرجع [۱۲] یک روش باز کردن کلید بصورت متوالی بر اساس پخش بار شاخه با هدف مینیمم نمودن تلفات فیدر، پیشنهاد شده است. مرجع [۱۳] نیز برای کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع، از ترکیب خازن‌گذاری و تجدید آرایش استفاده کرده است.

علاوه بر کاهش تلفات، اهداف دیگری نیز در مطالعات تجدید آرایش، مدنظر قرار گرفته‌اند. براین اساس در آرنو و آراین‌دبابو در [۱۴] یک الگوریتم جدید بازآرایی را ارائه داده‌اند که پایداری ولتاژ را افزایش می‌دهد و پروفیل ولتاژ را بهبود می‌بخشد. در [۱۵] مطالعه تجدید آرایش با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ استفاده شده است. در مطالعات [۱۶، ۱۷] کاهش هزینه‌های عملکردی سیستم با اجرای تواما برنامه تجدید آرایش و پاسخگویی بار، مدنظر قرار گرفته است. در [۱۶] حضور منابع تولید پراکنده بادی در شبکه مدنظر قرار گرفته است. بنابراین برای حل مسئله بهینه‌سازی مدنظر این مطالعه با حضور این منابع، یک مدل مارکوف پیشنهاد شده است. با استفاده از این مدل مارکوف، تجدید آرایش مدنظر مطالعه [۱۶] می‌تواند نسبت به عدم قطعیت موجود در میزان تولید منابع بادی در ساعات مختلف، پاسخگو باشد. همچنین در روش ارائه شده در [۱۷]، محدودیت هماهنگی حفاظتی نیز در برنامه تجدید آرایش وارد شده است. لازم به ذکر است، از آنجا که بازآرایی شبکه توزیع یک مسئله چند هدفه می‌باشد، لذا بهینه کردن دو یا چند هدف به طور همزمان، می‌تواند نتیجه بهتری را برای شبکه توزیع به ارمغان بیاورد [۱۰، ۱۵].

علاوه بر توابع هدف، آنچه مطالعات تجدید آرایش را از یکدیگر متمایز می‌سازد، نحوه حل مسئله می‌باشد. براین اساس بسیاری از مطالعات از الگوریتم‌های ابتکاری برای حل جواب‌های بهینه استفاده نموده‌اند. بدین منظور در [۱۸-۲۰] بازآرایی فیدر با استفاده از الگوریتم‌های اکتشافی مورد توجه قرار گرفته است. گونزالس و همکاران در [۲۱] مسئله بازآرایی در شبکه‌های توزیع مقیاس بزرگ ولتاژ متوسط را با یک استراتژی اکتشافی، حل نموده‌اند. الگوریتم اکتشافی برای بازآرایی بر مبنای مسیر پخش بارهای شاخه در [۲۲] ارائه شده است. اما علاوه بر تکنیک‌های ابتکاری، الگوریتم‌های هوشمندی نیز جهت یافتن آرایش بهینه مورد استفاده قرار گرفتند که از آن جمله می‌توان به الگوریتم ژنتیک (در [۲۳])، الگوریتم تکامل تفاضلی (در [۲۴])، الگوریتم غذایی باکتری (در [۲۵])، الگوریتم کلونی مورچگان (در [۲۶])، الگوریتم اجتماع ذرات (در [۱۹])، شبکه عصبی (در [۲۷]) و الگوریتم اجتماع ذرات باینری (در [۲۸]) اشاره کرد. ضمن آنکه در برخی مطالعات (مانند [۱۵]) ترکیب این الگوریتم‌ها نیز برای بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی، مدنظر قرار گرفته است.

با توجه به مطالب بیان شده، مشخص است که بازآرایی شبکه‌های توزیع فرآیندی مثبت در راستای بهبود پارامترهای فنی این شبکه‌ها است. براین اساس در این مقاله به بازآرایی شبکه‌های توزیع با هدف بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات پرداخته می‌شود. بنابراین مسئله مدنظر مقاله حاضر یک مسئله چند هدفه است که توسط الگوریتم

به دلیل گستردگی سیستم‌های توزیع و بالا بودن جریان خطوط توزیع بخش قابل توجهی از تلفات سیستم قدرت مربوط به شبکه‌های توزیع است. از سوی دیگر ارتباط بلافاصله شبکه‌های توزیع با مصرف کننده‌ی نهایی باعث قابل توجه‌تر شدن مساله سطح ولتاژ آن شده است [۱]. براین اساس، روش‌های متعددی برای بهبود کارایی شبکه‌های توزیع ارائه شده است. یکی از اساسی‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها برای افزایش ظرفیت عملکرد شبکه توزیع، مسئله بازآرایی شبکه توزیع می‌باشد [۲، ۳]. با استفاده از این مسئله، نحوه بهره‌برداری از خطوط شبکه توزیع (باز یا بسته بودن آن‌ها) طراحی می‌شوند. بطور کلی، در فیدرهای توزیع دو نوع کلید وجود دارد که یکی از آن‌ها در شرایط کار عادی بسته و دیگری در شرایط کار عادی باز می‌باشد. همانطور که ذکر شد، وضعیت باز یا بسته بودن این کلیدها به وسیله بازآرایی شبکه توزیع، جهت دستیابی به یک آرایش بهینه جدید بمنظور برآورده شدن هدف‌های مورد نظر از قبیل کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ مشخص می‌شود [۴]. مسئله بازآرایی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی با قیود چندگانه، شناخته می‌شود. در این مسئله غیر خطی، برخی از توپولوژی‌های شبکه به سبب تخطی از قیودی از قبیل شعاعی بودن شبکه و تخطی از قیود بهره‌برداری مانند محدوده مجاز ولتاژ و جریان مجاز به انتخاب نمی‌باشند [۵].

نخستین بار مسئله بازآرایی توسط مرلین و بک در سال ۱۹۷۵ جهت کاهش تلفات توان اکتیو با یک روش ابتکاری انجام شد. در این روش برای رسیدن به آرایش بهینه، پس از بسته شدن تمام کلیدها، شروع به باز کردن یک به یک کلیدهایی می‌شود که جریان کمتری را دارا می‌باشند [۶]. پس از آن، تکنیک‌های متنوعی جهت بازآرایی شبکه توزیع ارائه شد که از جمله آن می‌توان به روش ابتکاری بارن و دبلیو یو اشاره کرد [۷]. در این روش نیز ابتدا همه کلیدها بسته در نظر گرفته می‌شوند و سپس با انجام پخش بار، حلقه‌ای که بیشترین تلفات را دارا می‌باشد انتخاب و در آن حلقه، شاخه‌ای که بیشترین تلفات را دارا می‌باشد انتخاب و باز می‌شود. این روند تا باز شدن آخرین کلید از آخرین حلقه موجود ادامه می‌یابد تا به بهترین آرایش منجر شود [۷].

اهداف مدنظر در مطالعات بازآرایی نیز مختلف می‌باشد. با این وجود بسیاری از مطالعات این حوزه، با هدف کاهش تلفات شبکه انجام شده است. براین اساس در [۸]، بازآرایی شبکه با هدف کاهش تلفات با استفاده از یک ساختار درخت پوشا اجرا شده است. بطور مشابه در [۵، ۹، ۱۰] تجدید آرایش با هدف کاهش تلفات شبکه توزیع انجام شده است. با توجه به محدودیت تعداد کلیدزنی، روش پیشنهادی در [۹] علاوه بر تعیین آرایش بهینه شبکه، زمان بهینه اجرای تجدید آرایش را نیز پیشنهاد می‌دهد و از این طریق تعداد دفعات کلیدزنی کاهش می‌یابد. در [۱۱] بمنظور حداقل نمودن تلفات توان اکتیو در سیستم‌های ولتاژ متوسط متعادل، یک برنامه خطی آمیخته به عدد صحیح بهبود

$$V^{\min} \leq V_{i,t} \leq V^{\max} \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$\sqrt{(PL_{i,j,t})^2 + (QL_{i,j,t})^2} \leq SL_{i,j}^{\max} \quad \forall i, j, t \quad (8)$$

$$\sqrt{(PG_{i,t})^2 + (QG_{i,t})^2} \leq SG_i^{\max} \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$PDG_{i,t} \leq SDG_i^{\max} \quad \forall i, t \quad (10)$$

$$N_L = N_{br} - N_{bus} + 1 \quad (11)$$

در این روابط، $V_{i,t}$ ولتاژ باس شماره i در زمان t ، V_{ref} مقدار مطلوب ولتاژ، P_{base} توان پایه، $PG_{i,t}$ توان اکتیو تولیدی توسط شبکه بالادست، $PDG_{i,t}$ توان اکتیو تولیدی توسط منابع تولید پراکنده، $PD_{i,t}$ توان اکتیو مصرفی بارهای شبکه، $PL_{i,j,t}$ توان اکتیو مصرفی بار j ، $A_{i,j}$ ضریب وزنی توان مصرفی بار j ، $QL_{i,j,t}$ توان راکتیو مصرفی بار j ، $QG_{i,t}$ توان راکتیو تولیدی توسط شبکه بالادست، $QD_{i,t}$ توان راکتیو مصرفی بارهای شبکه، $g_{i,j}$ ضریب وزنی ولتاژ باس‌ها در رابطه با توان اکتیو، $\theta_{i,t}$ زاویه ولتاژ باس i ، $b_{i,j}$ ضریب وزنی ولتاژ باس‌ها در رابطه با توان راکتیو، V^{\min} مینیمم مقدار قابل قبول ولتاژ باس‌ها، V^{\max} ماکزیمم مقدار قابل قبول ولتاژ باس‌ها،

$SL_{i,j}^{\max}$ ماکزیمم توان ظاهری مصرفی بار j ، SG_i^{\max} ماکزیمم توان ظاهری تولیدی توسط شبکه بالادست، SDG_i^{\max} ماکزیمم توان ظاهری تولیدی توسط منابع تولید پراکنده، N_L تعداد خطوط شبکه، N_{br} تعداد شاخه‌های شبکه و N_{bus} تعداد باس‌های شبکه می‌باشند.

تابع هدف مسأله پیشنهادی در رابطه (۱) دارای دو بخش است. بخش اول مربوط به کمینه‌سازی انحراف ولتاژ از مقدار مطلوب است که در آن، عبارت V_{ref} بیان‌گر مقدار مطلوب ولتاژ است. بخش دوم این تابع هدف نیز بیان‌گر تلفات انرژی شبکه توزیع است. لازم به ذکر است که تمامی بخش‌های تابع هدف نرمالیزه شده‌اند و تمامی موارد به صورت درصد می‌باشند. از این‌رو نیازی به تعریف وزن برای هر بخش تابع هدف برای یکسان‌سازی واحد محاسباتی نیست.

همانطور که در روابط (۱۱)–(۲) مشخص است، تابع هدف پیشنهادی در این مطالعه می‌بایست تحت قیود ارائه شده در این روابط بهینه شود. براین‌اساس، قیود مدنظر برای پخش توان AC در روابط (۲) الی (۶) ذکر شده‌اند که شامل تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس (به ترتیب روابط (۲) و (۳))، توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط (به ترتیب روابط (۴) و (۵))، و میزان زاویه ولتاژ در باس مرجع (رابطه (۶))، می‌شوند. شایان ذکر است که در این روابط ((۶)–(۲)) عبارت-های PG و QG مربوط به توان ارسالی پست به مصرف‌کنندگان می‌باشد که فرض شده است که این پست تنها در باس مرجع وجود دارد، لذا مقادیر PG و QG در باس‌های دیگر برابر صفر هستند.

بهینه‌سازی رقابت استعماری بهینه می‌شود. لازم به ذکر است استفاده از این الگوریتم بهینه‌سازی قبلا در مسئله بازآرایی سابقه داشته است. با این وجود آنچه مقاله حاضر را از مطالعات مشابه متمایز می‌سازد، روند حل مسئله است، به نحوی که از روش‌های منطقه‌ای ممنوعه و حلقه‌ی حذف برای افزایش کارایی الگوریتم رقابت استعماری در حل بهینه‌سازی مدنظر این مقاله، استفاده شده است. همچنین یکی دیگر از جنبه‌های تمایز مقاله حاضر با مطالعات مشابه، وارد نمودن منابع تولید پراکنده در مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع می‌باشد. روش پیشنهادی در این مطالعه بر روی شبکه ۶۹ باسه IEEE در نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شده است. نتایج ایجاد شده نشان از موفقیت این روش در دستیابی به اهداف مدنظر شامل کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ دارد. همچنین این روش با برخی روش‌های پیشنهادی در مطالعات گذشته مقایسه شده است. نتایج حاکی از برتری روش پیشنهادی در مقاله حاضر است.

سایر بخش‌های این مقاله بدین شرح است. در بخش دوم، مدل‌سازی مسأله پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش سوم، روش حل این مسأله بیان می‌گردد. در بخش چهارم شبکه توزیع مورد مطالعه جهت پیاده‌سازی روش پیشنهادی در این مقاله، معرفی می‌شود. در نهایت در بخش پنجم، نتایج پیاده‌سازی این روش بر روی شبکه نمونه ارائه و تحلیل شده است.

۲- مدل مسأله پیشنهادی

مسأله پیشنهادی شامل اهداف زیر می‌باشد که عبارتند از:

- بهبود پروفایل ولتاژ شبکه توزیع در حضور تولیدات پراکنده
- کاهش تلفات انرژی مصرفی مصرف‌کنندگان

با توجه به موارد گفته شده، مدل ریاضی مسأله پیشنهادی به‌صورت زیر خواهد بود که تابع هدف در رابطه (۱) بیان شده است و قیود مسأله در روابط (۲) الی (۱۱) ارائه شده است.

$$\min \sum_{i \in \phi_i} \sum_{t \in \phi_t} \frac{|V_{i,t} - V_{ref}|}{V_{ref}} + \frac{1}{P_{base}} \sum_{i \in \phi_i} \sum_{t \in \phi_t} \begin{pmatrix} PG_{i,t} \\ +PDG_{i,t} \\ -PD_{i,t} \end{pmatrix} \quad (1)$$

شرطی که:

$$PG_{i,t} + PDG_{i,t} - PD_{i,t} = \sum_{j \in \phi_j} A_{i,j} PL_{i,j,t} \quad \forall i, t \quad (2)$$

$$QG_{i,t} - QD_{i,t} = \sum_{j \in \phi_j} A_{i,j} QL_{i,j,t} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$PL_{i,j,t} = g_{i,j} (V_{i,t})^2 - V_{i,t} V_{j,t} \{g_{i,j} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) + b_{i,j} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})\} \quad \forall i, j, t \quad (4)$$

$$QL_{i,j,t} = -b_{i,j} (V_{i,t})^2 + V_{i,t} V_{j,t} \{b_{i,j} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) - g_{i,j} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})\} \quad \forall i, j, t \quad (5)$$

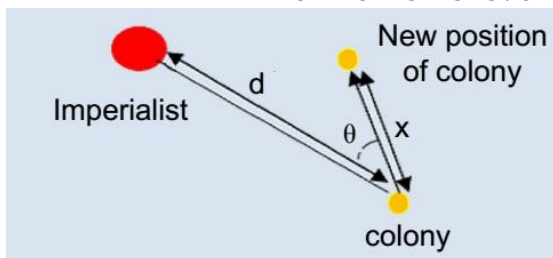
$$\theta_{i,t} = 0 \quad \forall i = ref, t \quad (6)$$

است. سپس موقعیت جدید هر مستعمره با روابط (۱۳) و (۱۴) تعریف می‌شود. در این روابط، θ و x دو متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت هستند [۱۵].

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (13)$$

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad (14)$$

در اینجا، x ، اندازه بردار، θ زاویه انحراف از مسیر حرکت از کلونی به امپریالیست، β یک عدد بزرگتر از یک، d فاصله بین کلونی و امپریالیست و γ یک پارامتر که انحراف را از مسیر اصلی تنظیم می‌کند. این پارامترها در شکل (۱) ارائه شده است [۱۵].



شکل (۱): حرکت مستعمرات به سمت امپریالیست مربوطه

۳-۲- رقابت امپراتوری‌ها

این رقابت به تدریج قدرت امپراتوری‌های ضعیف را کاهش می‌دهد و قدرت قدرتمندی را افزایش می‌دهد. این رویداد را می‌توان با انتخاب برخی از ضعیف‌ترین مستعمرات از ضعیف‌ترین امپراتوری و ایجاد رقابت بین همه امپراتوری‌ها برای داشتن این مستعمرات مدل‌سازی شده است. در این بخش، لازم است مشخص شود که امپریالیست‌ها می‌توانند این کلونی را داشته باشند. این مستعمره توسط قدرتمندترین امپراتوری‌ها نمانده است، اما ما می‌خواهیم فرصتی برای همه امپراتوری‌ها بر پایه قدرت کامل خود داشته باشیم. قدرت کل هر یک از امپراطوری توسط رابطه (۱۵) مدل‌سازی شده است [۱۵].

$$TC_n = \text{Cost}(\text{imperialist}_n) + \zeta \times \text{mean}\{\text{Cost}(\text{colonies of empires}_n)\} \quad (15)$$

که TC_n کل هزینه امپراتوری n ام و n یک عدد مثبت است که کمتر از ۱ است. n می‌تواند نسبت امپریالیسم و مستعمره‌ها را در کل قدرت امپراطوری تعیین کند. همچنین مقادیر نزدیک به صفر می‌تواند نقش امپریالیستی را برای تعیین قدرت کل امپراتوری‌ها برای مقادیر نزدیک به یک افزایش دهد و بالعکس. پس از محاسبه هزینه تمام امپراتوری‌ها، همه آنها به صورت رابطه (۱۶) نرمالیزه می‌شوند.

$$NTC_n = TC_n - \max\{TC_i\} \quad (16)$$

که NTC_n و TC_n به ترتیب هزینه کل و هزینه کل نرمالیزه شده از امپراتوری n ام می‌باشد. با داشتن هزینه کلی نرمالیزه شده، احتمال تسلط هر امپراطوری از رابطه (۱۷) به دست می‌آید [۱۵].

محدودیت مدنظر قرار گرفته در این مقاله برای شاخص‌های شبکه در روابط (۷)-(۹) معرفی شده‌اند که به ترتیب بیان‌گر محدودیت دامنه ولتاژ باس‌ها، محدودیت توان عبوری خطوط و محدودیت توان ارسالی پست شبکه توزیع می‌شوند.

لازم به ذکر است که قید ارائه شده در رابطه (۱۰)، معرف محدودیت تولیدات پراکنده است. براساس این قید، میزان تولیدات پراکنده شبکه باید کمتر از توان نامی آن‌ها باشد. شایان ذکر است که در این مقاله ساختار شبکه به صورت شعاعی فرض شده است که این امر توسط حلقه‌های بسته اصلی سیستم قابل بررسی است. این حلقه‌های اصلی شامل کلیدهای رابط و مقسم در هر حلقه است. بنابراین تعداد حلقه‌های اصلی براساس رابطه (۱۱) محاسبه می‌شوند.

مسئله پیشنهادی مقاله حاضر، دارای متغیرهای تصمیم‌گیری هستند که متغیرها شامل موارد زیر است:

الف- متغیرهای حالت‌های روشن/ خاموش کلیدهای رابط و مقسم که از راه دور کنترل می‌شوند و این متغیرها با عبارات‌های $SW_{k,t}$ و $Tie_{k,t}$ نمایان می‌شوند. همچنین این متغیرها به صورت باینری و یا دودویی هستند که دارای دو مقدار صفر و یک می‌باشند.

ب- متغیرهای توان اکتیو تولیدات پراکنده که با عبارات‌های PDG نمایش داده می‌شود که این متغیر به صورت پیوسته است. بنابراین بردار متغیرهای تصمیم‌گیری (X) متناسب با توضیحات بالا به صورت رابطه (۱۲) می‌باشد. لازم به ذکر است، متغیر تصمیم‌گیری همان متغیر مستقل است که مقدار آن وضعیت متغیرهای دیگر و یا متغیرهای وابسته را تعیین می‌کند.

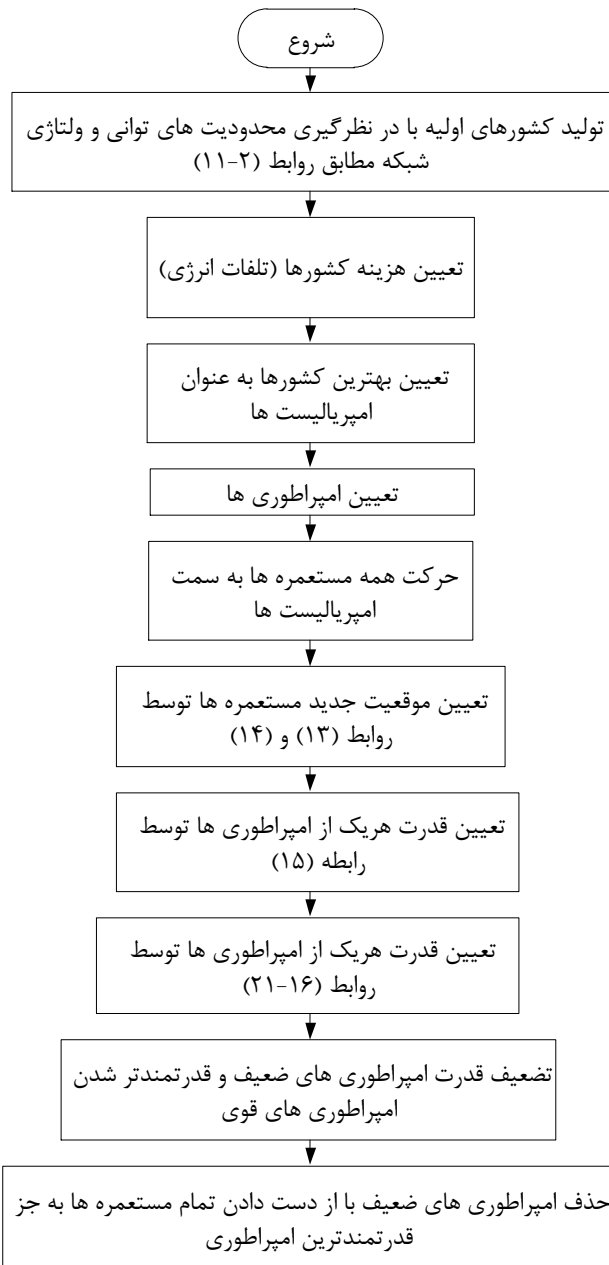
$$X = [SW_{k,t} \quad Tie_{k,t} \quad PDG_{i,t}] \quad (12)$$

۳- روش حل مسئله پیشنهادی

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، در مقاله حاضر بمنظور بهینه‌سازی روش پیشنهادی از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. بدین منظور مراحل مختلف روش پیشنهادی در بین توضیحات مربوط به الگوریتم آورده شده و پارامترهای مختلف روش پیشنهادی با پارامترهای الگوریتم استعماری همسان‌سازی شده است. لازم به ذکر است، الگوریتم استعماری، یک الگوریتم تکاملی جدید است که از تکامل اجتماعی و سیاسی انسان الهام گرفته شده است [۱۵، ۲۹].

۳-۱- جذب (حرکت مستعمره امپراطوری به سمت امپریالیست)

در الگوریتم رقابت استعماری، کشورهای امپریالیست سعی دارند مستعمرات خود را بهبود بخشند. این واقعیت با حرکت همه مستعمرات به سمت امپریالیست‌ها مدل می‌شود. هر مستعمره به واحدهای x به سمت امپریالیست حرکت می‌کند. جهت بردار جنبش بردار از کلونی به امپریالیست است. همچنین، مقدار تصادفی انحراف به جهت حرکت برای جستجوی نقاط مختلف در امپریالیستی اضافه شده



شکل (۲): مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی

۴- معرفی شبکه مورد مطالعه

در این بخش، روش پیشنهادی برای بازآرایی شبکه، بر روی شبکه توزیع شعاعی ۶۹ با سه استاندارد IEEE اجراء می‌شود [۳۰]. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل (۳)، ارائه شده است. این شبکه دارای ولتاژ و توان مبنای ۱۲/۶۶ کیلوولت و یک مگاوات است که حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ مجاز آن برابر ۰/۹ الی ۱/۰۵ پر یونیت می‌باشد. همچنین این شبکه دارای ۶۸ خط اصلی است و همچنین دارای ۵ خط کمکی نیز می‌باشد که این خطوط کمکی، برای بازآرایی شبکه بوده و به صورت خط چین در شکل (۳) مشخص شده‌اند. لازم به ذکر است، شبکه نمونه شکل (۳) دارای ۶۸ نقطه بار است [۳۰]. اگر زمان بار پیک را در ۲۰:۰۰ در نظر بگیریم، میزان بار در ساعات دیگر از

$$P_{Pn} = \frac{NTC_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_i} \quad (17)$$

بنابراین، یک بردار که شامل احتمالات تسلط تمامی امپراطوری‌ها است، می‌تواند بصورت رابطه (۱۸) بیان شود.

$$P = [p_{p1}, p_{p2}, \dots, p_{pn_{imp}}], \quad (18)$$

لازم است یک بردار مانند R با اندازه‌ی مشابه بردار P ایجاد شود که در آن عناصر عددی تصادفی به صورت یکنواخت توزیع شوند. بنابراین، بردار R می‌تواند به صورت رابطه (۱۹) بیان شود.

$$R = [r_1, r_2, \dots, r_{N_{imp}}], \quad (19)$$

در حالی که:

$$r_1, r_2, \dots, r_{N_{imp}} \sim U(0,1) \quad (20)$$

حاصل تفریق R از P ، بردار D به صورت رابطه (۲۱) نشان داده شده است.

$$D = P - R = [D_1, D_2, \dots, D_{N_{imp}}] \\ = [p_{p1} - r_1, p_{p2} - r_2, \dots, p_{pn_{imp}} - r_{n_{imp}}] \quad (21)$$

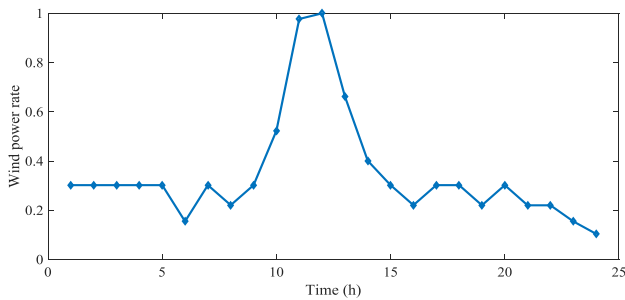
با اشاره به بردار D ، مستعمرات ذکر شده به یک امپراطوری اختصاص داده شده است که دارای حداکثر شاخص مربوطه در D است.

۳-۳- از بین بردن امپراتوری‌های ضعیف و همگرایی

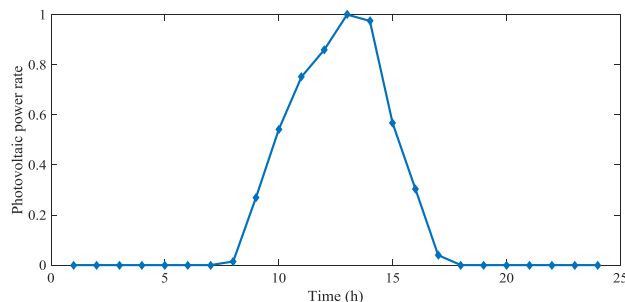
در این رقابت، امپراتوری‌های ضعیف به تدریج مستعمرات خود را از دست خواهند داد. یک امپراطوری در نهایت سقوط می‌کند زمانی که همه مستعمرات خود را از دست می‌دهد.

بعد از مدتی تمام امپراطورها به جز قدرتمندترین قدرت سقوط خواهند کرد و تمام مستعمرات تحت کنترل این امپراتوری خواهند بود. در نهایت توجه شود که در این مقاله از الگوریتم رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید برای حل مسأله پیشنهادی استفاده می‌شود که این الگوریتم بر پایه الگوریتم رقابت استعماری است که در آن مراحل تطبیق، منطقه ممنوعه متناسب با ساختار شعاعی شبکه توزیع و بهبود یافتگی به روابط گذشته، اضافه می‌گردد.

بر اساس مطالب ارائه شده، شکل (۲) مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی در مقاله حاضر را نشان می‌دهد.



شکل (۵): منحنی روزانه نسبت توان واحد بادی



شکل (۶): منحنی روزانه نسبت توان واحد خورشیدی

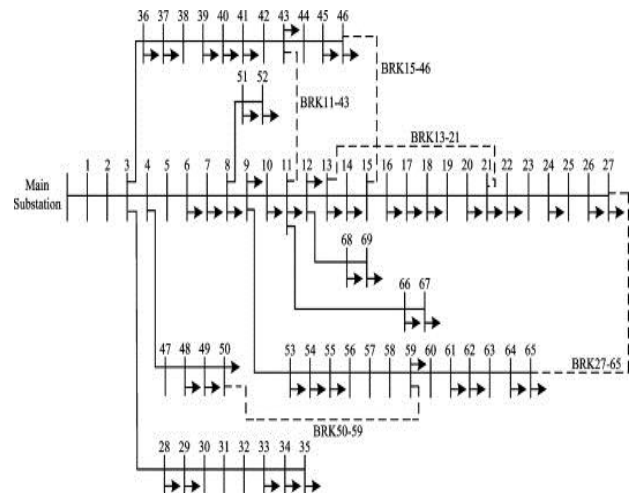
لازم به ذکر است بمنظور حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی، تعداد جمعیت و ماکزیمم تکرار به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

۵- تحلیل نتایج

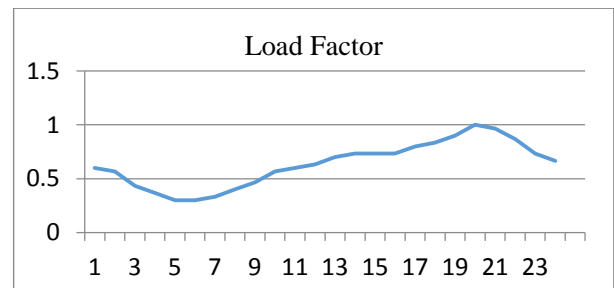
مسئله مدنظر مقاله حاضر، یک مسئله بهینه‌سازی است که به صورت مسئله غیرخطی عدد صحیح در مدل پایه مدل‌سازی می‌شود. اما این مقاله به منظور افزایش سرعت حل، الگوریتم رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید را پیشنهاد نمود. لذا در این مقاله موارد در محیط نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده‌اند. علاوه بر این، در مسئله پیشنهادی، معادلات پخش توان استفاده شده است و از آنجا که شبکه مورد تست یک شبکه توزیع شعاعی است، لذا از روش حل رفت - برگشتی برای حل مسئله پخش توان استفاده شده است. مراحل حل پخش بار رفت - برگشتی به صورت زیر است:

- محاسبه جریان مصرفی بارها؛ جریان مصرفی بارها برابر نسبت توان ظاهری به ولتاژ باس‌ها است. برای شروع کار، مقدار اولیه دامنه و زاویه ولتاژ به ترتیب برابر ۱ پریونیت و صفر درجه هستند.
- محاسبه جریان خطوط؛ چون شبکه شعاعی است، لذا ابتدا جریان خطوط انتهایی فیدرها از قانون KCL محاسبه می‌شود و سپس جریان خطوط ابتدای فیدرها براساس جریان خطوط و جریان مصرفی جلوی خود محاسبه می‌شوند.
- افت ولتاژ هر خط محاسبه می‌شود که برابر ضرب امپدانس خط و جریان خط متناظر می‌باشد.

ضرب بار ساعت پیک و منحنی ضریب بار محاسبه می‌شود که این منحنی به صورت شکل (۴) فرض شده است.



شکل (۳): مدار تک خطی شبکه توزیع شعاعی ۶۹ باسه IEEE



شکل (۴): منحنی روزانه ضریب بار

در این مقاله دو نوع تولید پراکنده بادی و خورشیدی استفاده شده است. همانطور که می‌دانیم، خروجی تولیدی واحد بادی و خورشیدی به ترتیب وابسته به سرعت باد و تابش خورشید است. لذا منحنی تولید خروجی این واحدها متناسب با زمان تغییر خواهد کرد. این مسئله به این خاطر است که سرعت باد و تابش خورشید متغیر با زمان هستند. بنابراین عبارت‌های ظرفیت بیشینه این تولیدات پراکنده، متغیر با زمان است. از اینرو منحنی‌های نسبت توان روزانه تولید این منابع تولید پراکنده به ترتیب همانند شکل‌های (۵) و (۶) فرض می‌شود و ظرفیت بیشینه آن‌ها از ضرب این منحنی‌ها در ظرفیت نامی این نوع تولیدات پراکنده محاسبه خواهد شد. همچنین فرض شده است که این منابع در کنترل توان راکتیو مشارکت ندارند و تنها به منظور تولید انرژی استفاده شده‌اند.

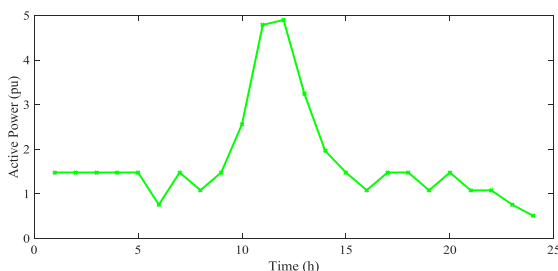
مجموع ظرفیت منابع تولید پراکنده بادی و خورشیدی در مقاله حاضر ۷۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است که سیستم‌های بادی در باس‌های ۱۵، ۲۰، ۲۳، ۲۷، ۵۴، ۶۰ و ۶۵ قرار دارند و سیستم‌های خورشیدی در باس‌های ۳۴، ۳۸، ۴۲، ۴۴ و ۴۶ قرار دارند.

جدول (۱): کلیدهای باز در هر ساعت

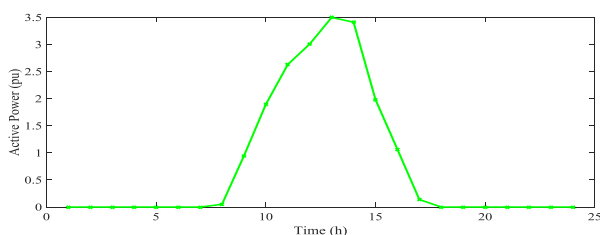
| ساعت | کلیدهای باز | ساعت | کلیدهای باز |
|------|---------------------|------|---------------------|
| ۱ | ۵۷ و ۴۸، ۲۰، ۱۹، ۱۴ | ۱۳ | ۵۱، ۳۸، ۳۵، ۱۹ و ۶۳ |
| ۲ | ۶۱ و ۶۰، ۵۰، ۱۲، ۹ | ۱۴ | ۶۷، ۲۷، ۲۲، ۱۹ و ۷۰ |
| ۳ | ۴۸ و ۴۳، ۴۰، ۱۷، ۱۳ | ۱۵ | ۳۰، ۲۴، ۱۸، ۱۷ و ۳۷ |
| ۴ | ۶۸ و ۵۹، ۵۸، ۱۴، ۱۰ | ۱۶ | ۴۰، ۳۰، ۲۲، ۱۶ و ۷۰ |
| ۵ | ۷۰ و ۶۷، ۶۴، ۴۲، ۲۵ | ۱۷ | ۳۳، ۲۷، ۲۳، ۱۶ و ۶۳ |
| ۶ | ۵۴ و ۳۲، ۲۶، ۲۳، ۱۰ | ۱۸ | ۶۳، ۳۷، ۲۴، ۱۵ و ۶۷ |
| ۷ | ۶۴ و ۵۹، ۴۱، ۱۸، ۱۴ | ۱۹ | ۳۰ و ۲۶، ۱۷، ۱۴، ۳ |
| ۸ | ۶۹ و ۶۲، ۵۴، ۲۹، ۲۳ | ۲۰ | ۵۰ و ۴۶، ۲۵، ۱۷، ۱۲ |
| ۹ | ۶۰ و ۵۷، ۴۲، ۲۲، ۱۸ | ۲۱ | ۵۴ و ۴۰، ۲۸، ۱۹، ۱۵ |
| ۱۰ | ۵۴ و ۵۰، ۴۳، ۳۹، ۱۲ | ۲۲ | ۵۹ و ۵۷، ۴۴، ۳۲، ۵ |
| ۱۱ | ۶۰ و ۴۰، ۳۸، ۲۳، ۷ | ۲۳ | ۶۸ و ۶۲، ۳۰، ۱۲، ۶ |
| ۱۲ | ۶۳ و ۶۰، ۴۵، ۴۰، ۱۹ | ۲۴ | ۶۰ و ۴۵، ۴۰، ۳۱، ۱۳ |

۵-۲- ارزیابی منحنی روزانه توان تولیدات پراکنده

در این بخش منحنی روزانه توان هر کدام از تولیدات پراکنده ارائه می‌شود. نتایج این بخش در شکل‌های (۷) و (۸) نمایش داده شده است که به ترتیب بیانگر منحنی روزانه مجموع توان اکتیو سیستم‌های بادی و منحنی روزانه مجموع توان اکتیو سیستم‌های خورشیدی هستند. براساس این شکل‌ها مشاهده می‌شود که تغییرات توان اکتیو سیستم‌های بادی و خورشیدی متناسب با سرعت باد و یا تابش خورشید است. همچنین دیده می‌شود که در برخی ساعات، توان اکتیو سیستم‌های خورشیدی برابر صفر است که این امر به دلیل صفر بودن میزان تابش خورشید است. علاوه بر این موضوع، توجه شود که توان تولیدی واحدهای بادی و خورشیدی در سناریوهای دوم و سوم برابر است. این بدین دلیل است که هزینه بهره‌برداری این سیستم‌های بسیار پایین و حتی برابر صفر است. لذا شبکه تمایل به استفاده از آنها در شبکه دارد.



شکل (۷): منحنی روزانه مجموع توان بادی



شکل (۸): منحنی روزانه مجموع توان خورشیدی

ولتاژ باس‌های مختلف محاسبه می‌شود. از آنجایی که دامنه و زاویه ولتاژ باس مرجع مشخص است، شروع محاسبه از باس مرجع است. از طرفی چون افت ولتاژ تمامی خطوط نیز معلوم است، لذا با داشتن ولتاژ باس مرجع، می‌توان ولتاژ تمامی باس‌ها را محاسبه کرد.

روش حل مذکور مبتنی بر تکرار است، لذا مسأله زمانی همگرا و متوقف خواهد شد که اختلاف مابین ولتاژ باس‌ها در دو مرحله آخر بسیار کم باشد. در مسأله پیشنهادی، این تلورانس برابر ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که میزان تلورانس می‌تواند به میزان کمتری از مقدار ارائه شده نیز تنظیم گردد. علاوه بر این موضوع توجه شود که روند حل مسأله پیشنهادی به این‌گونه است که ابتدا الگوریتم رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید مقدراری تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری استخراج می‌کند، سپس با استفاده از مقادیر مختلف متغیرهای تصمیم‌گیری، توان خروجی تولیدات پراکنده و حالت کلیدها محاسبه شده و سپس این خروجی‌ها وارد برنامه پخش بار رفت-برگشتی خواهند شد. در آن بخش ولتاژ، تابع هدف و پارامترهای مختلف محاسبه می‌شوند و محدودیت آن‌ها نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها، نتایج خروجی برنامه پخش بار رفت-برگشتی وارد برنامه الگوریتم رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید شده و مقادیر جدید متغیرهای تصمیم‌گیری براساس روند این الگوریتم بروزرسانی می‌شوند. توجه شود که حل مسأله بین دو برنامه پخش بار رفت-برگشتی و الگوریتم رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید در گردش است، تا زمانی که تعداد تکرار تعریف شده برای الگوریتم پیشنهادی به اتمام برسد.

بمنظور ارزیابی روش پیشنهادی، کلیه حالات شبیه‌سازی تحت سه سناریوی مختلف به شرح ذیل، تحلیل می‌شوند:

- سناریوی اول: انجام مطالعات پخش بار (شبکه بدون تولیدات پراکنده و بازآرایی)
- سناریوی دوم: انجام مطالعات پخش بار بهینه در حضور تولیدات پراکنده
- سناریوی سوم: بازآرایی شبکه توزیع در حضور تولیدات پراکنده

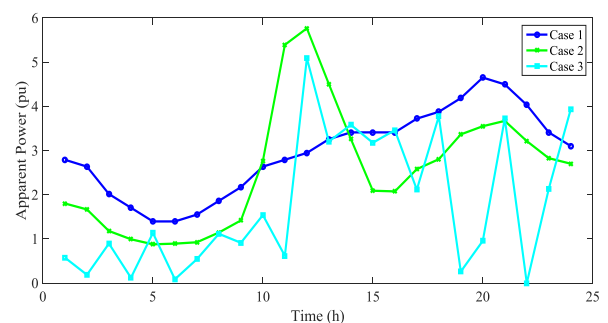
۵-۱- ارزیابی بازآرایی شبکه توزیع

نتایج حاصل از بازآرایی شبکه توزیع ۶۹ باسه در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول کلیدهای باز شبکه، مشخص هستند. براساس این جدول می‌توان گفت که در هر ساعت عملکرد هر کلید تغییر خواهد کرد. این امر به دلیل کمینه‌سازی تلفات شبکه و انحراف ولتاژ است. به عبارتی دیگر، به منظور کمینه‌سازی تلفات انرژی روزانه و انحراف ولتاژ شبکه نیاز است که عملکرد کلیدها براساس جدول (۱) تغییر کند. از اینرو انتظار می‌رود شاخص‌های شبکه نیز بهبود یابند.

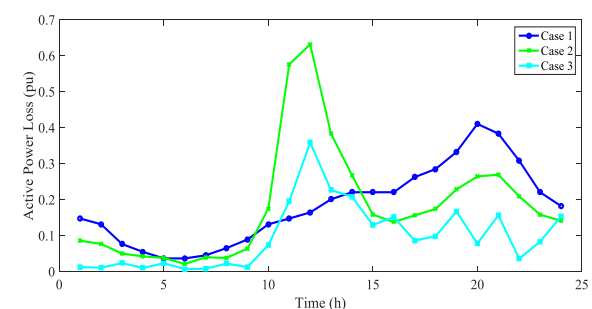
۳-۵- ارزیابی شاخص‌های شبکه

شاخص‌های شبکه در شکل‌های (۹) الی (۱۱) نمایش داده شده است که به ترتیب بیانگر منحنی روزانه توان ظاهری پست توزیع (واقع در باس مرجع و یا باس ۱)، منحنی روزانه تلفات شبکه و پروفیل ولتاژ شبکه توزیع ۶۹ باسه در ساعت پیک بار یا ساعت ۲۰:۰۰ است. براساس شکل (۹) مشاهده می‌شود که توان ظاهری پست توزیع در بازه‌های زمانی ۱:۰۰ الی ۹:۰۰ و ۱۵:۰۰ الی ۲۴:۰۰ برای سناریوی دوم کمتر از توان ظاهری در سناریوی اول است. دلیل این مسئله آن است که در این بازه‌های زمانی، میزان تولیدات سیستم‌های بادی و خورشیدی بسیار کم و حتی در برخی ساعات برابر صفر است. اما از سوی دیگر، در بازه زمانی ۱:۰۰ الی ۱۴:۰۰ توان ظاهری در سناریوی دوم بیشتر از سناریوی اول است که این موضوع به دلیل تریبک توان اکتیو توسط سیستم‌های بادی و خورشیدی متناسب با شکل (۶) و (۷) به شبکه است. اما همانطور که از شکل (۱۰) مشخص است، در سناریوی سوم توان ظاهری پست توزیع در بیشتر ساعات کمتر از توان ظاهری در سناریوهای اول و دوم است که این امر مزیتی بر بازآرایی شبکه توزیع است.

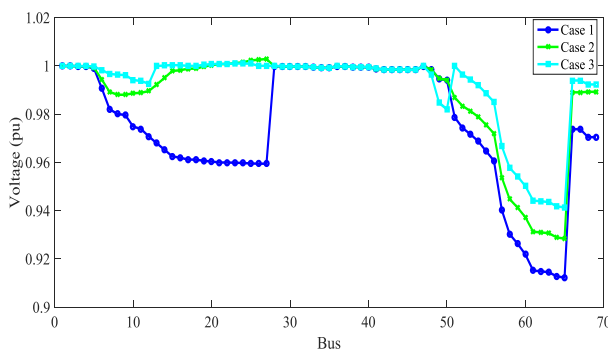
براساس شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که تلفات شبکه در بازه‌های زمانی ۱:۰۰ الی ۹:۰۰ و ۱۵:۰۰ الی ۲۴:۰۰ برای سناریوی دوم کمتر از تلفات شبکه در سناریوی اول است. اما از سوی دیگر، در بازه زمانی ۱:۰۰ الی ۱۴:۰۰ تلفات شبکه در سناریوی دوم بیشتر از سناریوی اول است که این به دلیل تریبک توان اکتیو بالای سیستم‌های بادی و خورشیدی متناسب با شکل (۵) و (۶) به شبکه است. اما در سناریوی سوم مشخص می‌شود که تلفات شبکه در بیشتر ساعات کمتر از تلفات شبکه در سناریوی اول است که این امر مزیتی بر بازآرایی شبکه توزیع است.



شکل (۹): منحنی روزانه توان ظاهری پست توزیع در باس ۱



شکل (۱۰): منحنی روزانه مجموع تلفات اکتیو شبکه



شکل (۱۱): پروفیل ولتاژ در ساعت پیک بار (۲۰:۰۰)

شکل (۱۱) پروفیل ولتاژ در ساعت پیک بار و یا ساعت ۲۰:۰۰ را نشان می‌دهد. براساس این شکل مشاهده می‌شود که پروفیل ولتاژ در سناریوی سوم نسبت به دو سناریوی دیگر تخت‌تر و صاف‌تر است. این امر نشان دهنده این موضوع است که افت ولتاژ شبکه در این سناریوی بسیار پایین است. بنابراین یکی دیگر از مزیت‌های بازآرایی شبکه توزیع ارائه شده در مقاله حاضر، در صاف‌تر بودن پروفیل ولتاژ شبکه، می‌باشد.

۴-۵- ارزیابی تابع هدف

مقادیر مختلف تابع هدف برای سناریوهای مختلف در جدول (۲) ارائه شده است. براساس این جدول مشاهده می‌شود که تلفات انرژی روزانه در سناریوی اول بیشترین مقدار را دارد، ولی بازآرایی شبکه توزیع پیشنهادی در مقاله حاضر در حضور تولیدات پراکنده موجب کاهش شدید تلفات انرژی روزانه از ۴/۳۸۳۳ پریونیت به ۲/۳۴۱ پریونیت شده است. همچنین مشاهده می‌شود که انحراف ولتاژ در سناریوی اول بیشترین مقدار را دارد، ولی بازآرایی پیشنهادی شبکه توزیع در مقاله حاضر در حضور تولیدات پراکنده موجب کاهش شدید انحراف ولتاژ از ۲۶/۸۱۳ پریونیت به ۱۱/۳۲ پریونیت شده است.

جدول (۲): میزان تابع هدف در سناریوهای مختلف

| مورد مطالعاتی | تلفات انرژی روزانه (پریونیت) | انحراف ولتاژ (پریونیت) | تابع هدف (پریونیت) |
|---------------|------------------------------|------------------------|--------------------|
| ۱ | ۴/۳۸۳۳ | ۲۶/۸۱۳ | ۳۱/۱۹۶ |
| ۲ | ۳/۴۹۶۹ | ۲۰/۲۰۶ | ۲۴/۶۰۳ |
| ۳ | ۲/۳۴۱ | ۱۱/۳۲ | ۱۳/۶۶۱ |

۵-۵- ارزیابی قابلیت الگوریتم حل پیشنهادی

شکل (۱۲) روند همگرایی الگوریتم رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید را نشان می‌دهد. براساس این شکل مشاهده می‌شود که الگوریتم رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید توانسته است که در کمتر از ۱۰۰ تکرار مسأله پیشنهادی را حل کند. توجه شود که کل زمان حل مسأله پیشنهادی برای ۱۰۰۰ تکرار در حوالی ۵۰۰۰ ثانیه

می‌باشد. براساس نتایج ارائه شده در این جدول، در روش پیشنهادی کلیه فاکتورهای فنی مدنظر مقاله حاضر، نسبت به دو روش دیگر بهبود بیشتری داشته‌اند.

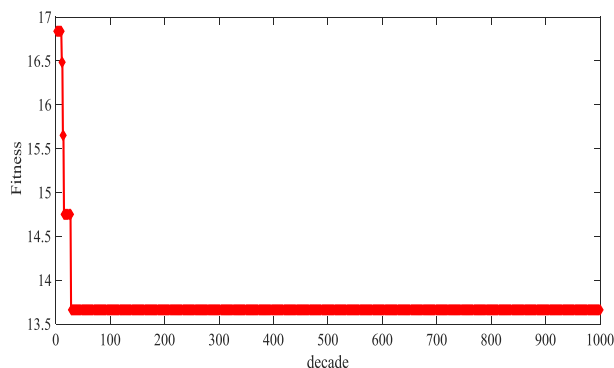
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله بازآرایی شبکه توزیع به منظور بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه در حضور تولیدات پراکنده ارائه گردید. بدین منظور تابع هدفی متشکل از اهداف اشاره شده ایجاد گردید که براساس محدودیت شاخص‌های شبکه مانند ولتاژ باس‌ها و توان عبوری خطوط، روابط حاکم بر تولیدات پراکنده و موارد متناظر بهینه می‌شود. از آنجا که مسئله بازآرایی مدنظر مقاله حاضر، به صورت غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح می‌باشد، لذا بمنظور کاهش زمان حل مسئله، استفاده از الگوریتم تکاملی رقابت استعماری تطبیقی بهبود یافته جدید، پیشنهاد گردید. روش جدید پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه توزیع ۶۹ باسه IEEE اعمال گردید. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات پیشنهاد شده برای نحوه عملکرد کلیدهای موجود در این شبکه، موجب کمینه‌سازی تلفات انرژی، انحراف ولتاژ از مقدار مطلوب و افت ولتاژ شبکه شده است. همچنین با بازآرایی انجام شده در این شبکه در حضور سیستم‌های بادی و سیستم‌های خورشیدی، تلفات انرژی کاهش داشته است.

مراجع

- [1] S.A. Hosseini, R. Eslami, B. Vahidi, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and K. Mohseni, "Installing distributed generation units and capacitors simultaneously in a distribution system considering economic issues," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 1-16, 2014.
- [2] S. Gu, S. Xu, L. Han, S. Cheng, R. Zhang, and B. Fang, "A Reconfiguration Strategy for Active Distribution Network Based on Classification and Regression Tree," *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 1-5, 2018.
- [3] H. Moayedirad, H. Falaghi, and M. Farshad, "Heuristic Algorithm for Distribution Networks Reconfiguration for Loss Reduction Based on Graph Theory," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 11, pp. 59-72, 2014.
- [4] F. G. Calhau and J. S. B. Martins, "A Electric Network Reconfiguration Strategy with Case-Based Reasoning for the Smart Grid," *8th Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS)*, pp. 633-638, 2019.
- [5] H. F. Zhai, M. Yang, B. Chen, and N. Kang, "Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 1-10, 2018.
- [6] A. Merlin, "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration for an Urban Power Distribution System," *Proc. of 5th PSCC*, vol. 1, pp. 1-18, 1975.

است. پس برای ۱۰۰ تکرار زمانی برابر ۵۰۰ ثانیه نیاز است که این امر نشان دهنده پاسخ‌گویی سریع این الگوریتم است.



شکل (۱۲): روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی

۵-۶- اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی از طریق مقایسه نتایج آن با کارهای مشابه قبلی

بمنظور اعتبارسنجی روش ارائه شده در این مقاله، روش پیشنهادی مقاله حاضر بدون حضور تولیدات پراکنده، با روش‌های ارائه شده در مطالعات [۱۳]، [۱۵] و [۳۰] بر روی شبکه معرفی شده در شکل (۳)، مقایسه گردیده و نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است مطالعه [۱۳] از روش تک حلقه برای تجدید آرایش استفاده کرده است. براین اساس ابتدا کلیه کلیدهای شبکه، بسته شده و حلقه‌هایی در شبکه توزیع ایجاد می‌گردد. سپس در هر حلقه با باز کردن شاخه‌ای که بیشترین کاهش تلفات را دارد، عملیات تجدید آرایش بر روی کل شبکه انجام می‌شود. در [۱۵] با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری به تجدید آرایش شبکه با اهداف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ پرداخته می‌شود. الگوریتم رقابت استعماری در مطالعه [۱۵] با استفاده از یک روش ابتکاری حل شد است. لازم به ذکر است بر خلاف محدودیت‌های در نظر گرفته شده در مقاله حاضر برای تولیدات پراکنده، در مطالعه [۱۵] برای این تولیدات محدودیتی در نظر گرفته نشده است. در [۳۰] با بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم قورباغه، به پیاده‌سازی روش تجدید آرایش در شبکه توزیع پرداخته شده است. هدف از اجرای روش پیشنهادی در [۳۰]، کاهش تلفات شبکه و حفظ ساختار شعاعی شبکه توزیع بوده است.

جدول (۳): مقایسه روش‌های ارائه شده در مطالعات مختلف

| مورد مطالعاتی | تلفات توان (پریونیت) | درصد کاهش تلفات (درصد) | مینیمم ولتاژ (پریونیت) |
|-------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| مرجع [۱۳] | ۳/۲۱۸ | ۵۱ | ۰/۹۲۲ |
| مرجع [۱۵] | ۳/۱۹۸ | ۵۶/۹۰ | ۰/۹۴۸ |
| مرجع [۳۰] | ۳/۲۰۳ | ۵۳ | ۰/۹۴۳ |
| روش پیشنهادی مقاله حاضر | ۳/۱۹۶ | ۵۷ | ۰/۹۵۱ |

همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج جدول (۳) تایید کننده برتری روش پیشنهادی مقاله حاضر در مقایسه با دو روش مطالعات [۱۳]، [۳۰]

- scale distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 88, pp. 137-145, 2012.
- [20] A. González, F. M. Echavarren, L. Rouco, T. Gómez, and J. Cabetas, "Reconfiguration of large-scale distribution networks for planning studies," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 37, pp. 86-94, 2012.
- [21] A. J. Gil Mena and J. A. Martín García, "An efficient heuristic algorithm for reconfiguration based on branch power flows direction," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 41, pp. 71-75, 2012.
- [22] S. Pirouzi, J. Aghaei, M. Shafie-khah, G. J. Osório, and J. P. S. Catalão, "Evaluating the security of electrical energy distribution networks in the presence of electric vehicles," in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, pp. 1-6, 2017.
- [23] J. Mendoza, R. Lopez, D. Morales, E. Lopez, P. Dessante, and R. Moraga, "Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real application," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 948-954, 2006.
- [24] S. Jazebi, S. H. Hosseini, and B. Vahidi, "DSTATCOM allocation in distribution networks considering reconfiguration using differential evolution algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 2777-2783, 2011.
- [25] K. Sathish Kumar and T. Jayabarathi, "Power system reconfiguration and loss minimization for an distribution systems using bacterial foraging optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 36, pp. 13-17, 2012.
- [26] A. Y. Abdelaziz, R. A. Osama, and S. M. Elkhodary, "Distribution Systems Reconfiguration Using Ant Colony Optimization and Harmony Search Algorithms," *Electric Power Components and Systems*, vol. 41, pp. 537-554, 2013.
- [27] M. A. Kashem, G. B. Jasmon, A. Mohamed, and M. Moghavvemi, "Artificial neural network approach to network reconfiguration for loss minimization in distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 20, pp. 247-258, 1998.
- [28] R. V. A. Monteiro, J. P. Bonaldo, R. F. da Silva, and A. S. Bretas, "Electric distribution network reconfiguration optimized for PV distributed generation and energy storage," *Electric Power Systems Research*, vol. 184, p. 106319, 2020.
- [29] N. Nikmehr and S. Najafi Ravadanegh, "A heuristic Solution for Probabilistic Power Flow in Microgrids," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 13, pp. 27-36, 2016.
- [30] T. Niknam, E. A. farsani, and M. Nayeripour, "An efficient multi-objective modified shuffled frog leaping algorithm for distribution feeder reconfiguration problem," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, pp. 721-739, 2011.
- [7] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 1492-1498, 1989.
- [8] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, pp. 1217-1223, 1988.
- [9] Y. Takenobu, N. Yasuda, S. Kawano, S. Minato, and Y. Hayashi, "Evaluation of Annual Energy Loss Reduction Based on Reconfiguration Scheduling," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, pp. 1986-1996, 2018.
- [10] H. Askarian Abyaneh, R. Eslami, E. Azad Farsani, and K. Mazlumi, "An Improved Distribution Network Reconfiguration Method for Loss Reduction Considering Stochastic Nature of Wind Turbines and Loads," *Archives Des Sciences*, vol. 65, pp. 55-66, 2012.
- [11] S. P. Singh, G. S. Raju, G. K. Rao, and M. Afsari, "A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, pp. 309-314, 2009.
- [12] M. Arun and P. Aravindhbabu, "A new reconfiguration scheme for voltage stability enhancement of radial distribution systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2148-2151, 2009.
- [13] R. Eslami, B. Eyvazi, M. Soveyzi, S. Hosseini, and S. Aghaei, "A Multi-Objective Approach for Improving Technical Factors of Distribution Networks Considering Uncertainties in Loads and Wind Turbines," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, 2016.
- [14] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Stochastic Reconfiguration and Optimal Coordination of V2G Plug-in Electric Vehicles Considering Correlated Wind Power Generation," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 822-830, 2015.
- [15] S. H. Mirhoseini, S. M. Hosseini, M. Ghanbari, and M. Ahmadi, "A new improved adaptive imperialist competitive algorithm to solve the reconfiguration problem of distribution systems for loss reduction and voltage profile improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 128-143, 2014.
- [16] Z. Li, S. Wang, Y. Zhou, W. Liu, and X. Zheng, "Optimal distribution systems operation in the presence of wind power by coordinating network reconfiguration and demand response," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 119, p. 105911, 2020.
- [17] S. Esmaili, A. Anvari-Moghaddam, S. Jadid, and J. M. Guerrero, "Optimal simultaneous day-ahead scheduling and hourly reconfiguration of distribution systems considering responsive loads," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 537-548, 2019.
- [18] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 1401-1407, 1989.
- [19] F. Llorens-Iborra, J. Riquelme-Santos, and E. Romero-Ramos, "Mixed-integer linear programming model for solving reconfiguration problems in large-

