

بازآرایی سیستم توزیع در محیط بازار برق با حضور منابع تولید پراکنده

بهداد آرندیان، رحمت‌الله هوشمند و اسکندر قلی‌پور

بررسی می‌شوند. این روش‌ها دارای سرعت پایین‌تری هستند ولی قادرند به جواب بهینه دست یابند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش شکل‌دادن [۱] و [۲]، روش کاهش‌دادن [۳] و [۴] و روش تغییر شاخه [۵] و [۶] اشاره نمود. روش‌های هوشمند که عموماً بر اساس قوانین و پدیده‌های موجود در طبیعت ارائه شده‌اند، سرعت اجرای بازآرایی را با محدود نمودن فضای جستجو افزایش می‌دهند. محدود نمودن فضای جستجو ممکن است باعث عدم دستیابی به مناسب‌ترین پاسخ گردد. مهم‌ترین این روش‌ها شامل الگوریتم ژنتیک (GA) [۷] و [۸]، الگوریتم اجتماع پرندگان (PSO) [۹] و [۱۰]، الگوریتم کلونی مورچه‌ها (ACO) [۱۱] و [۱۲] و الگوریتم فازی [۱۰] و [۱۲] می‌باشند. قدرت الگوریتم انتخاب‌شده، تعیین‌کننده انتخاب الگوریتم‌های مختلف است. قدرت این الگوریتم‌ها شامل سرعت رسیدن به جواب با تکرار کمتر و دستیابی به پاسخ بهینه کلی مسأله می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی ارائه‌شده جهت بازآرایی سیستم توزیع، دارای قدرت بیشتری نسبت به روش‌های متداول می‌باشد که تاکنون جهت حل مسأله بازآرایی استفاده نگردیده است.

از طرف دیگر مسأله بازآرایی در محیط بازار برق نسبت به محیط‌های سنتی، کمی متفاوت است و علت این موضوع، اهمیت یافتن مقدار هزینه‌ها در محیط بازار برق نسبت به محیط‌های سنتی است. بنابراین تعیین تابع هدف در این محیط نیز متفاوت خواهد بود که عمدتاً کاهش هزینه‌ها یا افزایش سود حاصل از شرکت در بازار به عنوان تابع هدف استفاده می‌گردد. در [۱۳] هدف متولی تأمین انرژی برای مشترکین کوچک‌تر یعنی DISCO افزایش سود حاصل از فعالیت خود با شرکت در بازارهای انرژی و رزرو می‌باشد. بدین منظور این شرکت با در اختیار داشتن چندین واحد تولید پراکنده و مقداری بار قابل حذف، با کاهش هزینه‌های خود که ناشی از قطع بار مشترکین، هزینه تلفات و هزینه نگهداری منابع تولید پراکنده می‌باشد، سعی در افزایش سود خود دارد. همچنین تغییرات بار در این محیط نیز باید مد نظر قرار گیرد [۱۴]. مرجع [۱۵] با تقسیم بار یک شبانه‌روز به چندین سطح بار و در نظر گرفتن قیمت ثابت برای هر سطح بار، بازآرایی سیستم را انجام داده است. همچنین [۱۶] با کاهش هزینه‌های پرداختی خود جهت تلفات اکتیو و راکتیو، سود حاصل از شرکت در بازار را افزایش می‌دهد. اتصال منابع تولید پراکنده به سیستم‌های توزیع می‌تواند تأثیر مثبت یا منفی بر روی عملکرد شبکه بگذارد که یکی از تأثیرات مثبت اتصال تولیدات پراکنده به شبکه، کاهش تلفات سیستم توزیع است. حضور منابع تولید پراکنده در مسأله بازآرایی باعث به وجود آمدن تغییراتی در نحوه پخش بار و تعیین تابع هدف خواهد شد که عموماً تابع هدف با حضور منابع تولید پراکنده به صورت تابع هزینه در نظر گرفته می‌شود. تابع هزینه برای هر یک از منابع تولید پراکنده به صورت ضریبی از توان تولیدی توسط آن در نظر گرفته شده است. استفاده از تابع درجه دوم جهت محاسبه هزینه تولید توان توسط واحدهای تولید پراکنده مناسب‌تر است زیرا مقدار هزینه محاسبه‌شده جهت تولید توان به واقعیت بسیار نزدیک‌تر خواهد بود [۱۷].

در این مقاله با توجه به قدرت و سرعت الگوریتم جهش قورباغه (SFLA)، الگوریتم جدیدی جهت بازآرایی سیستم با هدف کاهش

چکیده: شرکت‌های توزیع خصوصی (DISCO) سعی دارند با کاهش تلفات شبکه‌های خود، هزینه کمتری بابت خرید انرژی از بازار صرف نمایند و بازآرایی بهینه یکی از ارزان‌ترین روش‌ها جهت رسیدن به این هدف می‌باشد. در این مقاله، روش جدیدی در کاهش هزینه فعالیت یک DISCO از طریق کاهش میزان تلفات شبکه و کنترل توان تولیدی منابع تولید پراکنده ارائه می‌گردد. به دلیل فعال بودن بازار، قیمت‌ها مقدار ثابتی ندارند لذا این مسأله در سطوح مختلف بارگذاری شبکه با قیمت‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل وجود پارامترهای مختلف، بهینه‌سازی مذکور از مسائل پیچیده بهینه‌سازی محسوب می‌گردد و بنابراین روشی بر مبنای الگوریتم جهش قورباغه بهبود یافته که تاکنون جهت مسائل گسسته بهینه‌سازی به ویژه بازآرایی استفاده نگردیده است، پیشنهاد شده تا مسأله بهینه‌سازی به نحو مطلوبی صورت گیرد. همچنین اثرات حضور منابع تولید پراکنده بر نحوه پخش بار و مدل‌سازی تابع هدف مسأله در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی روش ارائه‌شده بر روی شبکه‌های استاندارد ۳۳ شینه IEEE و ۶۹ شینه IEEE، قابلیت روش پیشنهادی را در کاهش هزینه‌های فعالیت DISCO در محیط بازار برق و کاهش تلفات نشان می‌دهد. همچنین توانایی روش پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌ها نیز نشان داده شده است.

کلید واژه: بازآرایی، تجدید ساختار، منابع تولید پراکنده.

۱- مقدمه

با توجه به آن که تلفات در شبکه‌های توزیع در مقایسه با شبکه‌های انتقال دارای مقدار بزرگ‌تری هستند، لذا کاهش آن از اهمیت بالایی برخوردار است. بسیاری از روش‌ها نیازمند نصب و راه‌اندازی وسایل و تجهیزات جدید در سیستم می‌باشند. این تجهیزات اضافه علاوه بر این که بار مالی برای شرکت‌ها دارند، ممکن است باعث خطاهای جدیدی در شبکه شوند که سرویس‌دهی به مشتریان را مختل گرداند.

در سیستم‌های توزیع کلیدهایی قرار داده می‌شود تا امکان تغذیه شین‌ها از مسیرهای متفاوت ممکن شود. بازآرایی سیستم به مفهوم تغییر در حالت این کلیدها به گونه‌ای است که هدف مورد نظر بهره‌بردار حاصل گردد. به دلیل وجود ساختارهای متعدد برای شبکه و همچنین قیود فنی و اقتصادی جهت بهره‌برداری از شبکه، مسأله بازآرایی یک مسأله پیچیده بهینه‌سازی می‌باشد که نیاز به ارائه روش‌های سریع و کارآمد جهت حل آن احساس می‌گردد. به طور کلی می‌توان الگوریتم‌های حل مسأله بازآرایی را به دو گروه الگوریتم‌های ابتکاری و الگوریتم‌های هوشمند تقسیم‌بندی نمود. در روش‌های ابتکاری، کلیه حالت‌ها با قوانین خاصی

این مقاله در تاریخ ۱۱ دی ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۱ تیر ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

بهداد آرندیان، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: b.arandian@yahoo.com)

رحمت‌الله هوشمند، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: hooshmand_r@eng.ui.ac.ir)

اسکندر قلی‌پور، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: e.gholipour@eng.ui.ac.ir)

مختلف وجود دارد. همچنین هنگام این تغییر آرایش شرایط و قیدهای زیر باید برآورده شوند:

- شعاعی بودن شبکه جدید حفظ گردد.
 - شبکه جدید همه شین‌ها را در بر بگیرد.
 - میزان بارها از میزان تولید و ظرفیت شبکه بیشتر نشود.
 - ولتاژ شین‌ها و تجهیزات شبکه در محدوده مجاز باشند.
 - جریان خطوط و تجهیزات شبکه در محدوده مجاز باشند.
- بنابراین مسأله بازآرایی یک مسأله پیچیده بهینه‌سازی می‌باشد و نیازمند ارائه راهکاری سریع و با دقت کافی برای حل آن احساس می‌شود. به دلیل گسسته‌بودن دامنه متغیرها، استفاده از روش‌های تحلیلی و بیان شرایط Kaurush-Kuhn Tucker در حل این مسأله که به شرایط KKT معروف است، غیر ممکن می‌باشد. همچنین گستردگی دامنه جواب‌ها باعث می‌گردد استفاده از روش‌های عددی بهینه‌سازی زمان‌بر باشد، لذا در محیط‌های فعالی مثل محیط بازار به روش‌هایی سریع و با قدرت همگرایی بالا نیاز است که عموماً روش‌های کاوشی و فراکاوشی دارای این ویژگی هستند.

۲-۲ بازآرایی در محیط بازار برق

تابع هدف در محیط بازار برق نسبت به محیط‌های سنتی، کمی متفاوت است. علت این موضوع، اهمیت یافتن مقدار هزینه‌ها در محیط بازار برق نسبت به محیط‌های سنتی است. بنابراین در محیط بازار، تابع هدف به صورت تابع سود بیان می‌گردد. مقدار سود یک شرکت توزیع خصوصی، ناشی از اختلاف درآمدهای حاصل از فروش انرژی به مشتریان و هزینه‌های پرداختی بابت خرید انرژی از بازار انرژی می‌باشد.

با در نظر گرفتن هزینه‌های فعالیت DISCO به عنوان تابع هدف و با فرض فعالیت این شرکت در بازارهای انرژی و خدمات جانبی، انرژی خریداری‌شده توسط این شرکت در یک بازه زمانی ثابت به صورت (۱) و (۲) قابل محاسبه است [۱۶]

$$E_{up}^p = (P_{demand} + P_{loss})T \quad (1)$$

$$E_{up}^q = (Q_{demand} + Q_{loss})T \quad (2)$$

در این روابط E_{up}^p و E_{up}^q به ترتیب مقدار انرژی خریداری‌شده از بازار بر حسب kWh و kVArh، دوره زمانی مورد نظر، P_{demand} و Q_{demand} توان اکتیو و راکتیو تقاضاشده مشتریان در دوره T و P_{loss} و Q_{loss} تلفات اکتیو و راکتیو شبکه در دوره T می‌باشد.

اگر قیمت انرژی در همین دوره به ازای هر kWh با λ_{up}^p و به ازای هر kVArh با λ_{up}^q نشان داده شود، مقدار هزینه‌های پرداختی توسط این شرکت به صورت زیر خواهد بود

$$Cost_{up} = E_{up}^p \lambda_{up}^p + E_{up}^q \lambda_{up}^q \quad (3)$$

ملاحظه می‌گردد که با کاهش تلفات شبکه، هزینه خرید انرژی کاهش می‌یابد. همچنین هزینه کلیدزنی نیز باید در نظر گرفته شود که این هزینه به صورت مقدار ثابت و با توجه به تعداد کلیدزنی در بازه زمانی مورد نظر مطابق (۴) محاسبه می‌گردد

$$Cost_{Rec} = N_{Rec} \lambda_{Rec} \quad (4)$$

که N_{Rec} تعداد بازآرایی انجام‌شده در بازه مورد نظر، λ_{Rec} هزینه کلیدزنی به ازای هر بار بازآرایی و $Cost_{Rec}$ مجموع هزینه ناشی از بازآرایی در بازه مورد نظر می‌باشد. لذا مجموع هزینه‌های ناشی از بازآرایی شبکه توزیع در

هزینه‌های فعالیت DISCO بر مبنای کاربرد این الگوریتم ارائه می‌گردد. شایان ذکر است که کاربرد این الگوریتم، جهت حل مسائل بهینه‌سازی گسسته به ویژه بازآرایی بسیار مؤثر می‌باشد. همچنین با استفاده از روش ارائه‌شده، کارایی این الگوریتم بهبود بخشیده می‌شود. سپس با در نظر گرفتن هزینه‌های فعالیت DISCO به عنوان تابع هدف، چگونگی پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی جهت بازآرایی شبکه توزیع در محیط بازار برق بیان می‌گردد. با توجه به ماهیت بازار، قیمت‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز دارای مقدار یکسانی نبوده و لذا این موضوع باید در روند اجرای حل مسأله مد نظر قرار گیرد. بدین منظور بار شبکه در طول شبانه‌روز به سطوح مختلف بار تقسیم شده و برای هر سطح بار، قیمت‌های انرژی متفاوت در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل وجود منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع مورد نظر، با در نظر گرفتن هزینه تولید توسط این واحدها به صورت تابع درجه دوم از توان، مجموع هزینه‌های فعالیت DISCO با کنترل مقدار تولید منابع DG و بازآرایی شبکه کاهش می‌یابد. در انتها به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، ابتدا با اعمال این الگوریتم بر سیستم نمونه ۳۳ شینه IEEE با هدف کاهش تلفات، سرعت و قدرت همگرایی این الگوریتم با سایر روش‌ها مقایسه می‌گردد. سپس بازآرایی سیستم‌های نمونه ۳۳ شینه IEEE و ۶۹ شینه IEEE با هدف کاهش هزینه‌های فعالیت DISCO در محیط بازار انجام می‌پذیرد.

۲- بازآرایی سیستم توزیع در محیط بازار برق با حضور منابع تولید پراکنده

۱-۲ مسأله بازآرایی

در سیستم‌های توزیع، کلیدهایی جهت مدیریت آرایش شبکه تعبیه شده که این کلیدها به دو دسته حالت عادی باز و حالت عادی بسته تقسیم می‌شوند. با تغییر شرایط شبکه (به طور مثال با تغییر بار) ممکن است آرایش شبکه که در هنگام طراحی به عنوان آرایش بهینه انتخاب شده است، دیگر بهینه نباشد. با بستن تعدادی از کلیدهای حالت عادی باز، و بازکردن همان تعداد کلید حالت عادی بسته، می‌توان مسیر پخش توان در شبکه توزیع را تغییر داد. این تغییر آرایش باعث تغییر در مقدار تلفات، تغییر در مقدار ولتاژ شین‌ها و در نتیجه باعث بهبود و یا تضعیف عملکرد سیستم می‌شود. بنابراین نمی‌توان هر حالت دلخواهی از وضعیت کلیدها را در نظر گرفت و باید با بررسی حالت‌ها، آرایشی انتخاب شود که بهترین عملکرد را نسبت به سایر ساختارهای موجود داشته باشد. عملکرد هر ساختار با توجه به هدف تعیین‌شده متفاوت است. به طور مثال ممکن است ساختاری که دارای کمترین تلفات باشد با ساختاری که بهترین پروفیل ولتاژ را دارد متفاوت باشد. تابع هدف در مسأله بازآرایی عمدتاً شامل کاهش هزینه تلفات شبکه، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش فاکتور تعادل بار فیدرها، افزایش شاخص‌های قابلیت اعتماد، کاهش تعداد کلیدزنی جهت بازآرایی سیستم توزیع، کاهش وقفه‌ها در تأمین انرژی مشتریان و کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم می‌باشد. همچنین می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، از چندین تابع هدف در مسأله به صورت هم‌زمان استفاده کرد. اهمیت هر تابع در این حالت با استفاده از ضرایبی مشخص می‌گردد. بنابراین روش یافتن آرایش بهینه (بازآرایی) مناسب‌ترین و ارزان‌ترین راه در مواجهه با مشکلات شبکه می‌باشد که به دلیل عدم نیاز به هزینه‌های زیاد در تغییر توپولوژی شبکه، بسیار مورد توجه قرار دارد. بررسی تمامی حالت‌ها جهت بازآرایی تقریباً غیر ممکن است زیرا در شبکه‌ای با n کلید ۲ وضعیتی (قطع یا وصل) 2^n حالت

زیر اصلاح می‌گردند

$$E_{up}^p = (P_{demand} + P_{loss} - P_{DG})T \quad (7)$$

$$E_{up}^q = (Q_{demand} + Q_{loss} - Q_{DG})T \quad (8)$$

که P_{DG} و Q_{DG} مجموع توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی توسط منابع تولید پراکنده در دوره T و سایر پارامترها مشابه قبل می‌باشد. همچنین هزینه تولید هر واحد DG معمولاً به صورت تابع درجه دوم از توان بیان می‌گردد که باید به هزینه‌های فعالیت شرکت توزیع اضافه گردد. این تابع هزینه به صورت زیر خواهد بود

$$Cost_{DG} = \alpha P^x + \beta P + \gamma \quad (9)$$

لذا مجموع هزینه‌های ناشی از بازآرایی شبکه توزیع در محیط بازار برق با حضور منابع تولید پراکنده در یک دوره زمانی ثابت T را می‌توان از (۱۰) محاسبه نمود

$$Cost_{Total} = Cost_{up} + Cost_{Rec} + Cost_{DG} \quad (10)$$

۳- الگوریتم جستجوی جهش قورباغه‌های متحرک

۳-۱ مبنای پایه‌ای الگوریتم

الگوریتم جستجوی جهش قورباغه‌های متحرک، یک الگوریتم جدید در خانواده الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که این الگوریتم از زندگی گروهی قورباغه‌ها زمانی که به دنبال غذا می‌گردند الهام گرفته شده و در سال ۲۰۰۶ به منظور حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی، بدون استفاده از روابط ریاضی ارائه گردید [۱۸]. این الگوریتم ترکیبی از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جمعیت پرندگان را دارد و لذا نسبت به این دو روش از سرعت و دقت بالاتری برخوردار است. در این الگوریتم هر قورباغه بیانگر جوابی از مسأله می‌باشد. در روش مفروض جمعیت اولیه را به چند گروه مجزا تقسیم نموده که تعداد قورباغه‌های موجود در همه گروه‌ها با هم برابر است. بر اساس این تقسیم‌بندی دو نوع تکنیک جستجو در این الگوریتم وجود دارد، تکنیک اول تکنیک جستجوی محلی است و بر اساس آن قورباغه‌ها در هر گروه با تبادل اطلاعات، موقعیت خود را نسبت به غذا (بهترین جواب) بهبود می‌دهند و تکنیک دوم مربوط به تبادل اطلاعات بین گروه‌ها می‌باشد که بر اساس آن، بعد از هر جستجوی محلی در گروه‌ها، اطلاعات به دست آمده بین گروه‌ها با هم مقایسه می‌شود. جهت اجرای این الگوریتم، ابتدا پارامترهای اولیه الگوریتم مقداردهی می‌شوند و سپس جمعیت اولیه‌ای با P عضو به صورت تصادفی تولید می‌شود. شایستگی هر عضو محاسبه گردیده و پس از مرتب‌نمودن جمعیت به صورت نزولی، کل جمعیت به m گروه تقسیم می‌شوند که هر کدام از این گروه‌ها شامل n عضو هستند. این تقسیم‌بندی باید به گونه‌ای باشد که عضوهای با شایستگی بیشتر، در همه گروه‌ها قرار داشته باشند. سپس جستجوی محلی برای جهش قورباغه‌های با بدترین شایستگی به سمت قورباغه‌های با بهترین شایستگی صورت می‌پذیرد. این جهش مطابق (۱۱) و (۱۲) می‌باشد

$$D = r(X_b - X_w) \quad (11)$$

$$X_w(new) = X_w + D \quad (12)$$

$$|D| < D_{max}$$

که در رابطه فوق X_w و X_b به ترتیب قورباغه‌های با بدترین و بهترین جواب، D مقدار جهش ضعیف‌ترین قورباغه به سمت بهترین عضو

محیط بازار برق در یک دوره زمانی ثابت T را می‌توان از مجموع (۳) و (۴) محاسبه نمود

$$Cost_{Total} = Cost_{up} + Cost_{Rec} \quad (5)$$

از طرف دیگر مقدار تقاضای توان در تمامی بازه‌های زمانی در محیط بازار برق، ثابت نیست. لذا در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای بارهای شبکه جهت محاسبه تابع هدف ارائه‌شده در بخش قبل صحیح نمی‌باشد. بنابراین جهت تعیین تابع هدف فوق به منحنی بار شبکه در بازه مورد نظر جهت بازآرایی نیاز است. منحنی‌های بار شبکه معمولاً به صورت ساعت پیش توسط واحدهای مربوطه پیش‌بینی می‌شوند. جهت پیش‌بینی بار شبکه، مشتریان به گروه‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند و سهم هر یک از این گروه‌ها در بازه مورد نظر مشخص می‌گردد. سپس بار کل شبکه در آن بازه محاسبه می‌گردد. با مشخص‌بودن منحنی بار شبکه در طول یک شبانه‌روز، می‌توان به ازای هر دوره ثابت از این منحنی (هر ساعت) بار هر یک از گروه‌های شبکه را محاسبه نمود. مقدار بار گروه k ام شبکه را در دوره j می‌توان به صورت زیر تعیین نمود [۱۴]

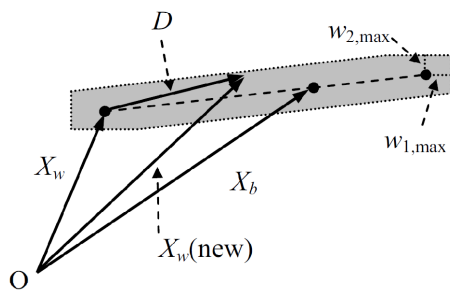
$$L_{k,j} = \sum_{TL=1}^T L_{k,max} M_{TL,k} C_{TL,j} \quad (6)$$

در این رابطه TL نوع بار، $L_{k,max}$ حداکثر بار گروه k ام، $M_{TL,k}$ نسبت بار نوع TL در گروه k ام و $C_{TL,j}$ نسبت بار نوع TL در زمان j می‌باشد. این ضرایب با توجه به منحنی بار شبکه و ضرایب حضور بارها در هر گروه مشخص می‌گردد. با مشخص‌شدن بار هر گروه در هر ساعت، می‌توان بار مورد تقاضا در کل شبکه را محاسبه نمود.

۳-۲ تأثیر منابع تولید پراکنده در بازآرایی

با افزایش نفوذ تولید پراکنده، شبکه توزیع از یک شبکه انفعالی (که فقط بارها به آن متصل هستند) به یک شبکه فعال (که شامل بارها و تولیدکنندگان می‌باشد) تغییر ماهیت می‌دهد. این امر نیازمند این است که در استراتژی تحلیل و توزیع تغییراتی حاصل شود. در حضور منابع تولید پراکنده، روش‌های متداول پخش بار برای سیستم توزیع دیگر کارایی مطلوب را ندارد بنابراین لازم است در این روش‌ها تغییراتی حاصل شود تا DGها که عموماً به صورت گروه‌های PV یا PQ مدل می‌شوند، بتوانند در محاسبات پخش بار وارد شوند. بر این اساس، واحدهای تولید پراکنده‌ای که به صورت شین PQ کنترل می‌شوند به صورت بارهایی با امپدانس منفی در پخش بار وارد می‌گردند. در این حالت، پخش بار مورد استفاده که عموماً از نوع پخش بار پیشرو-پسرو می‌باشد، پیچیده نمی‌گردد اما برای واحدهای تولید پراکنده‌ای که به صورت شین PV کنترل می‌شوند، باید مقدار صحیح تزریق توان راکتیو تولیدشده توسط واحد نیز تعیین گردد [۱۳]. بدین منظور ابتدا یک حدس اولیه جهت میزان توان راکتیو تزریقی در نظر گرفته می‌شود و پخش بار شبکه، مشابه حالت قبل صورت می‌گیرد. سپس با مقایسه ولتاژ شین مربوطه با مقدار مورد نظر، اختلاف ولتاژها محاسبه شده و میزان توان راکتیو تزریقی یا دریافتی برای تأمین ولتاژ مطلوب محاسبه می‌شود. سپس با مقدار جدید توان راکتیو محاسبه شده، پخش بار مجدداً انجام شده و اختلاف ولتاژ شین PV محاسبه می‌گردد و این روند تا دستیابی به ولتاژ ثابت مطلوب ادامه می‌یابد.

همچنین حضور منابع تولید پراکنده باعث ایجاد تغییراتی در محاسبه تابع هدف می‌گردد. اول آن که با تولید انرژی توسط منابع تولید پراکنده، میزان خرید انرژی توسط شرکت از بازار کاهش می‌یابد. این کاهش در مقدار توان باید در تابع هدف نمایان گردد. بنابراین (۱) و (۲) به صورت



شکل ۲: جهش قورباغه به سمت بهترین عضو گروه در الگوریتم بهبودیافته.

قورباغه‌هایی با شایستگی کمتر، ضرایب کوچک‌تر و به قورباغه‌هایی با شایستگی بیشتر، ضرایب بزرگ‌تری تخصیص داده می‌شود. لذا می‌توان جهت تعیین ضرایب از توزیع احتمال مثلثی مطابق (۱۶) استفاده نمود

$$P_k = \frac{2(n+1-k)}{n(n+1)}, \quad k = 1, \dots, n \quad (16)$$

طبق این توزیع، قورباغه با ضعیف‌ترین شایستگی دارای کمترین احتمال و قورباغه با قوی‌ترین شایستگی دارای بیشترین احتمال خواهد بود.

۴- پیاده‌سازی الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته جهت بازآرایی سیستم توزیع

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی جهش قورباغه متحرک جهت بازآرایی سیستم توزیع، هر ساختار شبکه به عنوان یک عضو از قورباغه‌ها انتخاب می‌شود. با در نظر گرفتن قید شعاعی بودن ساختار شبکه، همواره باید (۱۷) برقرار باشد

$$M = N_L - N_g \quad (17)$$

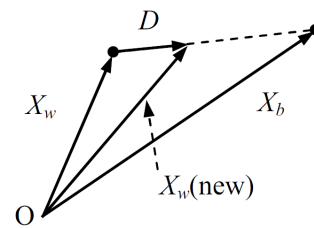
که M تعداد شاخه‌ها، N_L تعداد شین‌ها و N_g تعداد شین‌های تولیدکننده توان است. بنابراین با استفاده از این رابطه، تعداد شاخه‌هایی که پس از انجام بازآرایی باید قطع باشند، مشخص گردیده و به عنوان متغیر در الگوریتم استفاده می‌شود. بر این اساس هر عضو جمعیت اولیه یک ساختار شعاعی شبکه است و نیاز به الگوریتمی برای بررسی شعاعی بودن شبکه وجود ندارد و در نتیجه سرعت اجرای الگوریتم افزایش می‌یابد. همچنین حضور یا عدم حضور منابع تولید پراکنده به صورت اعداد باینری صفر و یک در هر عضو در نظر گرفته می‌گردد. عدد یک، نشان‌دهنده حضور و عدد صفر، نشان‌دهنده عدم حضور DG می‌باشد و بنابراین هر عضو جمعیت قورباغه‌ها به صورت برداری از اعداد خواهد بود

$$X = [SW \setminus \dots \setminus SWT \setminus DG \setminus \dots \setminus DGk] \quad (18)$$

که T تعداد کلیدهای ارتباط‌دهنده و k تعداد منابع تولید پراکنده خواهد بود و سپس مقدار شایستگی هر عضو از جمعیت با محاسبه تابع هدف محاسبه می‌گردد. در این مقاله کاهش هزینه‌های فعالیت DISCO به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است که این تابع با استفاده از (۱۰) در یک بازه زمانی ثابت محاسبه می‌گردد. در این مقاله، بار روزانه شبکه به سه سطح بار (کم‌باری، بار عادی و پرباری) تقسیم شده و قیمت‌های متفاوتی برای هر سطح بار در نظر گرفته شده است. بنابراین تابع هزینه به صورت (۱۹) محاسبه می‌شود

$$Cost_{Total} = \sum_l Cost_{Total,l}, \quad l = light, normal, heavy \quad (19)$$

که در آن $Cost_{Total,l}$ هزینه کل در هر یک از سطوح بار l (کم‌باری، بار عادی و پرباری) می‌باشد که توسط (۱۰) محاسبه می‌گردد. سپس قیود



شکل ۱: جهش ضعیف‌ترین قورباغه به سمت بهترین عضو گروه.

گروه، D_{max} بیشترین حد مجاز برای جهش قورباغه و r عددی تصادفی در بازه $[0, 1]$ می‌باشد. شکل ۱ جهت حرکت ضعیف‌ترین قورباغه به سمت بهترین قورباغه را با استفاده از روابط فوق نشان می‌دهد. پس از اعمال تغییرات فوق در صورتی که قورباغه جدید دارای پاسخ بهتری نسبت به بدترین قورباغه گروه داشته باشد، جایگزین آن می‌گردد و در غیر این صورت همین اعمال با جایگزینی X_g با X_b تکرار می‌گردد. اگر با اعمال تغییر فوق پاسخ مناسب‌تری یافت نگردید، یک جواب به صورت تصادفی تولید کرده و آن را جایگزین بدترین عضو گروه می‌نماییم. این روند برای تعداد تکرار مشخص شده ادامه می‌یابد تا در نهایت شرایط اتمام الگوریتم حاصل گردد.

۳-۲ بهبود در الگوریتم جهش قورباغه‌های متحرک

بهبود در الگوریتم جهش قورباغه در ۲ بخش ارائه می‌شود. بخش اول با تغییر در رابطه جهش، باعث بهبود سرعت الگوریتم می‌شود و بخش دوم با تعریف زیرگروه‌ها، امکان توقف الگوریتم در بهینه‌های محلی را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، موقعیت بدترین قورباغه در هر گروه با توجه به موقعیت بهترین قورباغه در آن گروه و یا بهترین قورباغه در کل جمعیت قورباغه‌ها با استفاده از (۱۱) و (۱۲) بهبود می‌یابد. با استفاده از این روابط موقعیت جدید بدترین قورباغه در امتداد خطی که بین X_w و X_b قرار دارد، قرار می‌گیرد و موقعیت جدید بدترین قورباغه نمی‌تواند در اطراف این خط باشد. وجود این محدودیت می‌تواند باعث کاهش سرعت همگرایی الگوریتم و یا همگراشدن الگوریتم به جواب‌های غلط شود. برای رفع محدودیت فوق می‌توان از (۱۳) تا (۱۵) استفاده نمود که امکان جهش قورباغه در فضای وسیع‌تری را فراهم می‌نماید. شکل ۲ بیانگر این تغییر در الگوریتم می‌باشد

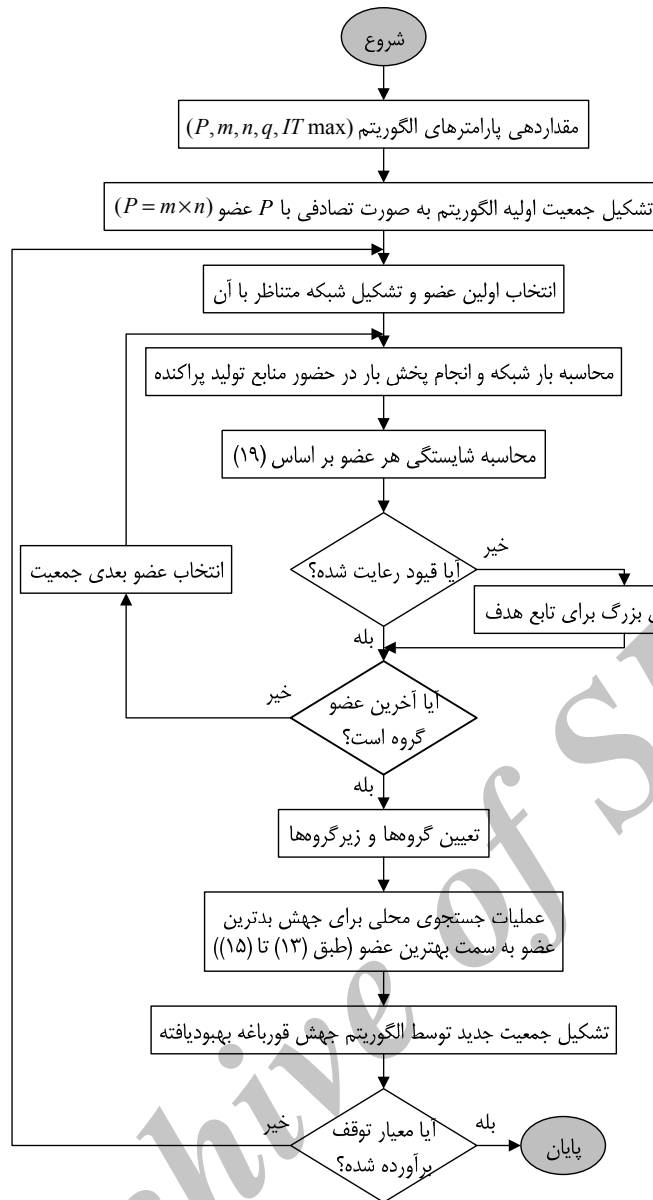
$$D = r.C.(X_b - X_w) + W \quad (13)$$

$$W = ri.W_{max} \quad (14)$$

$$X_{wnew} = \begin{cases} X_w + D & \text{if } |D| < D_{max} \\ X_w + \frac{D}{\sqrt{D^T D}} D_{max} & \text{if } |D| > D_{max} \end{cases} \quad (15)$$

که در رابطه فوق r عددی تصادفی در بازه $[0, 1]$ ، C عددی ثابت در بازه $[1, 2]$ ، ri عددی تصادفی در بازه $[-1, 1]$ ، W_{max} ماکسیمم محدوده‌ای که هر قورباغه می‌بیند و D_{max} بیشترین حد مجاز برای جهش قورباغه می‌باشد.

با توجه به انتخاب بهترین عضو گروه در روند اجرای الگوریتم، ممکن است تمایل قورباغه‌ها حول قورباغه خاصی متمرکز گردد که این پاسخ، یک بهینه محلی باشد، بنابراین همواره استفاده از بهترین قورباغه گروه مطلوب نیست. بدین منظور مجموعه‌ای از گروه به عنوان زیرگروه در نظر گرفته می‌شود. استراتژی انتخاب این زیرگروه‌ها به این صورت است که به



شکل ۳: روندنمای حل مسأله بازآرایی با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته در محیط بازار برق با حضور DG.

می‌شود تا شرط توقف الگوریتم که حداکثر تعداد تکرار آن است، ارضا گردد. با توجه به این که تنها اعداد صحیح در بازه تعداد شین‌ها قابل قبول می‌باشد، در هر تکرار باید جواب‌ها در محدوده مورد نظر گرد شوند. روندنمای الگوریتم بازآرایی با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته در شکل ۳ نشان داده شده است.

۵- شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های آزمون

۵-۱ شبکه آزمون اول

در این بخش ابتدا با اعمال الگوریتم جستجوی جهش قورباغه بهبودیافته بر یک سیستم توزیع نمونه با هدف کاهش تلفات، مؤثر بودن روش پیشنهادی جهت بازآرایی سیستم توزیع با مقایسه با سایر روش‌ها نشان داده می‌شود. این شبکه دارای ۳۲ شین توزیع و یک شین فوق توزیع مطابق شکل ۴ است و مقدار بارهای اکتیو و راکتیو برای این سیستم به ترتیب ۲۳۰۰ kW و ۱۸۰۰ kVAI می‌باشد. مقدار امپدانس هر شاخه و بارهای هر شین در [۵] آورده شده و فرض شده که در هر یک از خطوط شبکه، کلیدیایی جهت مانور وجود داشته باشد. در حالت عادی با

مسأله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این قیود شامل محدوده مجاز ولتاژ شین‌ها و حداکثر جریان مجاز شاخه‌ها و تعادل بین تولید و مصرف می‌باشند که در روابط زیر ارائه گردیده‌اند

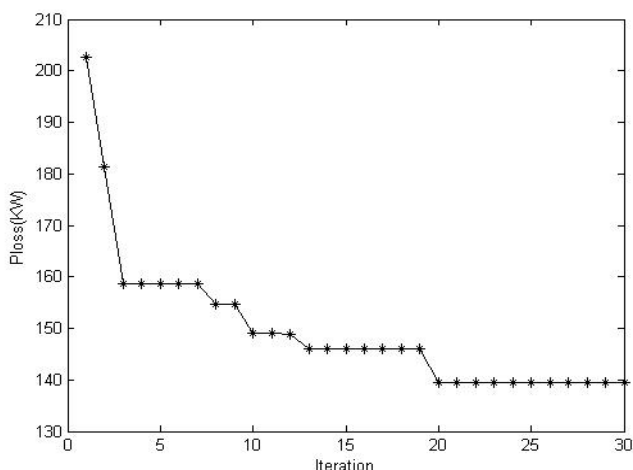
$$V_{\min} \leq V_n \leq V_{\max} \quad , \quad n = 1, 2, \dots, N_{bus} \quad (20)$$

$$|I_b| \leq I_{\max} \quad , \quad b = 1, 2, \dots, N_{branch} \quad (21)$$

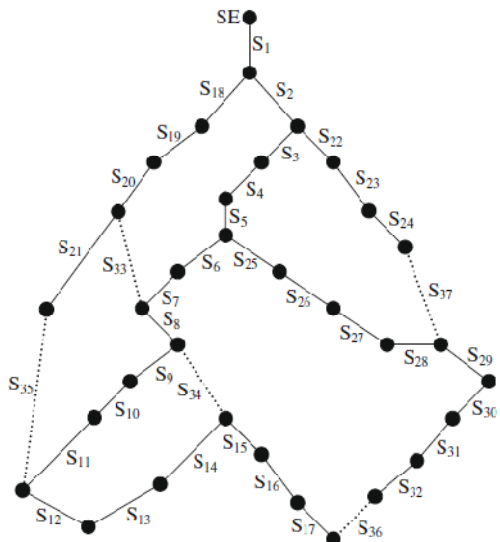
$$\sum_i P_{DG_i} + P_{up} = P_{loss} + \sum_k P_{load,k} \quad (22)$$

$$\sum_i Q_{DG_i} + Q_{up} = Q_{loss} + \sum_k Q_{load,k} \quad (23)$$

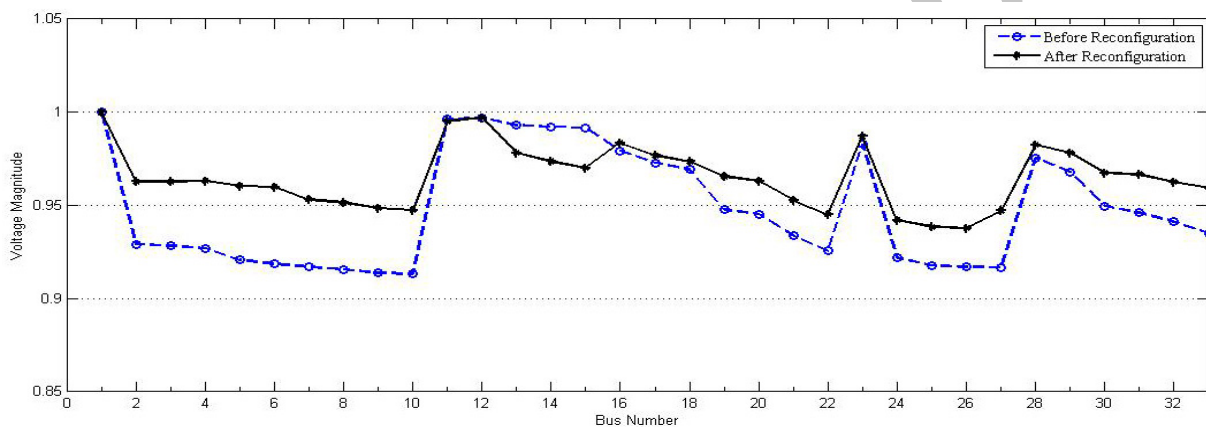
که در روابط فوق N_{bus} و N_{branch} به ترتیب تعداد شین‌ها و شاخه‌های شبکه، k تعداد شین‌های شبکه و i تعداد منابع تولید پراکنده است. در صورتی که قیود رعایت نشده باشد، مقدار تابع هدف با یک عدد بزرگ جایگزین شده تا ساختار مربوطه دارای هزینه بزرگ‌تر و ارزش کمتری شود. پس از محاسبه تابع هدف برای هر عضو، مجموعه بر اساس میزان شایستگی هر عضو مرتب شده و به تعداد مشخصی گروه تقسیم‌بندی می‌شود. سپس عملیات جستجوی محلی بر اساس (۱۳) تا (۱۵) انجام



شکل ۵: همگرایی الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته به پاسخ بهینه.



شکل ۴: سیستم نمونه ۳۳ شینه مورد مطالعه.



شکل ۶: پروفیل ولتاژ شین‌ها قبل و پس از بازآرایی.

جدول ۲: مقایسه روش‌های مختلف جهت بازآرایی سیستم ۳۳ شینه.

| شماره مرجع | خطوط باز شده در بهترین جواب | تلفات شبکه بر حسب کیلووات |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| آرایش اولیه | ۳۳-۳۴-۳۵-۳۶-۳۷ | ۲۰۲٫۷ |
| GA [۹] | ۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷ | ۱۳۹٫۵۳ |
| NM [۱۰] | ۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷ | ۱۳۹٫۵۳ |
| DPSO [۱۰] | ۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷ | ۱۳۹٫۵۳ |
| PSO-NM [۱۰] | ۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷ | ۱۳۹٫۵۳ |
| ACO [۱۱] | ۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷ | ۱۳۹٫۵۳ |
| [۱۹] | ۶-۹-۱۴-۳۶-۳۷ | ۱۴۳٫۶۹ |
| [۲۰] | ۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷ | ۱۳۹٫۵۳ |
| [۲۱] | ۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷ | ۱۳۹٫۵۳ |
| روش ارائه شده (ISFLA) | ۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷ | ۱۳۹٫۵۳ |

جدول ۱: مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی.

| مقدار | مفهوم | نماد |
|-------|------------------------------------|------------|
| ۱۲ | تعداد عضوهای هر گروه | N |
| ۲۰ | تعداد گروه‌ها | M |
| ۷ | تعداد عضوهای زیرگروه‌ها | Q |
| ۶ | حداکثر مجاز جهش | D_{max} |
| ۰٫۸۵ | حداکثر دید جهش | W_{max} |
| ۳۰ | حداکثر تعداد تکرار | IT_{max} |
| ۰٫۹ | حداقل ولتاژ مجاز (پریونیت) | V_{min} |
| ۱٫۰۵ | حداکثر ولتاژ مجاز (پریونیت) | V_{max} |
| ۲۵۵ | حداکثر جریان حرارتی شاخه‌ها (آمپر) | I_{max} |

شکل ۵ که تابع همگرایی تلفات در الگوریتم است، قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مقادیر ولتاژ شین‌های شبکه قبل و پس از بازآرایی در شکل ۶ نشان داده شده و ملاحظه می‌گردد که ولتاژ تمامی شین‌ها در محدوده مجاز بوده و شبکه از پروفیل ولتاژ مناسب‌تری نسبت به آرایش اولیه برخوردار است.

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، الگوریتم ارائه شده با سایر الگوریتم‌های هوشمند و ابتکاری در جدول ۲ مقایسه شده است. سطر اول

قراردادن کلیدهای S_{33} تا S_{37} در حالت قطع، یک ساختار شعاعی برای شبکه حاصل می‌شود. واضح است که آرایش‌های بسیاری می‌توان نوشت که همگی به صورت شعاعی باشند. جهت شبیه‌سازی قیود جزیره‌ای نبودن شبکه، شعاعی بودن شبکه، حداکثر و حداقل ولتاژ شین‌ها و حداکثر جریان حرارتی شاخه‌ها در نظر گرفته شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

پس از شبیه‌سازی الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته جهت بازآرایی، کلیدهای S_7 ، S_9 ، S_{14} ، S_{32} و S_{37} در حالت قطع قرار گرفته و تلفات شبکه از 202.7 kW به 139.53 kW کاهش می‌یابد. این موضوع در

جدول ۳: مشخصات منابع تولید پراکنده شبکه آزمون اول.

| شماره شین | ظرفیت (kVA) | ضریب توان | α | β | γ |
|-----------|-------------|-----------|----------|---------|----------|
| ۴ | ۵۰ | ۰.۸ | ۰.۰۰۰۹ | ۰.۰۰۰۶ | ۰ |
| ۷ | ۱۰۰ | ۰.۹ | ۰.۰۰۰۸ | ۰.۰۰۰۴ | ۰ |
| ۲۵ | ۲۰۰ | ۰.۹ | ۰.۰۰۰۴ | ۰.۰۰۰۴ | ۰ |
| ۳۰ | ۱۰۰ | ۱ | ۰.۰۰۰۵ | ۰.۰۰۰۱ | ۰ |

جدول ۴: پارامترهای مربوط به هزینه‌های شرکت در بازار.

| پارامتر | مقدار در زمان کم‌باری | مقدار در زمان بار عادی شبکه | مقدار در زمان پرباری |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|
| λ_{up}^p | ۰.۰۴ (\$/kWh) | ۰.۰۶ (\$/kWh) | ۰.۰۹ (\$/kWh) |
| λ_{up}^q | (\$/kVArh) ۰.۰۱ | (\$/kVArh) ۰.۰۲ | (\$/kVArh) ۰.۰۳ |
| λ_{Rec} | ۲.۰ (\$/Rec.) | ۲.۰ (\$/Rec.) | ۲.۰ (\$/Rec.) |

جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی عملکرد DISCO در محیط بازار برق در شبکه آزمون اول.

| حالت | نوع سطح بار | تعداد بازآرایی | | هزینه فعالیت شرکت در یک شبانه‌روز (\$) |
|------------|--------------|----------------|----------------|--|
| | | کم‌باری | پرباری | |
| حالت اول | آرایش شبکه | ۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳ | ۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳ | ۱۰۶۷۹,۰۷۷۶ |
| | هزینه (\$/h) | ۸۸,۸۴۶۸ | ۵۴۶,۹۷۱۶ | ۰ |
| حالت دوم | آرایش شبکه | ۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳ | ۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳ | ۱۰۴۶۳,۹۶۱۴ |
| | هزینه (\$/h) | ۸۴,۱۴۲۲ | ۵۳۸,۵۴۵۵ | ۰ |
| حالت سوم | آرایش شبکه | ۳۷-۳۲-۱۴-۹-۷ | ۳۷-۳۲-۱۴-۹-۷ | ۱۰۶۳۹,۳۵۳۲ |
| | هزینه (\$/h) | ۸۸,۸۱۰۶ | ۵۴۵,۵۸۲۶ | ۱ |
| حالت چهارم | آرایش شبکه | ۲۸-۱۷-۱۴-۱۰-۶ | ۲۸-۱۷-۱۴-۱۰-۶ | ۱۰۴۵۵,۷۸۴۶ |
| | هزینه (\$/h) | ۸۴,۱۷۱۳ | ۵۳۷,۵۹۲۹ | ۱ |
| حالت پنجم | آرایش شبکه | ۳۳-۲۷-۱۸-۱۳-۸ | ۲۸-۱۷-۱۴-۱۰-۶ | ۱۰۴۶۱,۳۱۴۲ |
| | هزینه (\$/h) | ۸۴,۱۳۲۱ | ۵۳۷,۵۹۲۹ | ۴ |

(۲) محاسبه هزینه فعالیت DISCO در محیط بازار با حضور منابع تولید پراکنده و با آرایش اولیه شبکه.

(۳) محاسبه هزینه فعالیت DISCO در محیط بازار بدون حضور منابع تولید پراکنده و با انجام یک بازآرایی در ابتدای روز.

(۴) محاسبه هزینه فعالیت DISCO در محیط بازار با حضور منابع تولید پراکنده و با انجام یک بازآرایی در ابتدای روز.

(۵) محاسبه هزینه فعالیت DISCO در محیط بازار با حضور منابع تولید پراکنده و با انجام بازآرایی با توجه به سطوح بار.

با مقایسه حالات مختلف شبیه‌سازی از جدول ۵ ملاحظه می‌گردد که بهترین نوع عملکرد DISCO در حالت چهارم می‌باشد که هزینه‌های شرکت در بازار کمترین مقدار ممکن است. با توجه به این حالت می‌توان هزینه‌های DISCO را به میزان ۲۲۳/۳ دلار در هر روز کاهش داد. کاهش هزینه‌های فعالیت یک شرکت خصوصی در بازار به معنای افزایش سود خالص دریافتی می‌باشد و با توجه به آن که معمولاً برق به عنوان یک کالای غیر الاستیک در نظر گرفته می‌شود و تغییرات در میزان مصرف آن ناچیز است، لذا در این روش می‌توان بار شبکه را ثابت فرض نمود. بنابراین یک شرکت خصوصی قادر خواهد بود سود خالص سالیانه‌ای به میزان ۸۱۵۰۲ دلار بابت اعمال بازآرایی در شبکه توزیع و کنترل منابع تولید پراکنده داشته باشد، لذا رفاه اجتماعی افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه هزینه‌های ناشی از حالت پنجم با حالت چهارم، مشاهده می‌گردد که افزایش تعداد بازآرایی، باعث افزایش هزینه‌ها به میزان ۵/۶ دلار در روز خواهد شد. بنابراین مشاهده می‌گردد که همواره افزایش تعداد بازآرایی شبکه افزایش سود را در پی نخواهد داشت.

لازم به ذکر است که حل این گونه مسائل به صورت off-line صورت می‌گیرد ولی با این حال، مدت زمان شبیه‌سازی توسط یک رایانه ۲/۴ GHz با ۲ GB RAM در حدود ۱۷ ثانیه بوده است.

که آرایش اولیه شبکه را نشان می‌دهد، دارای تلفاتی برابر با ۲۰۲۷ kW می‌باشد و مقدار تلفات شبکه در هر حالت در ستون سوم قابل مشاهده است. با مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها جهت بازآرایی سیستم توزیع، قدرت این الگوریتم قابل مشاهده است.

جهت بازآرایی شبکه آزمون اول در محیط بازار، چهار منبع تولید پراکنده مطابق جدول ۳ در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله فرض شده که منابع تولید پراکنده موجود در شبکه با توجه به ماهیت خود، توانایی شرکت در بازارهای انرژی و خدمات جانبی برای تأمین توان راکتیو مورد نیاز را دارا بوده و با توجه به سیاست‌های اقتصادی DISCO در بازارها شرکت نمایند.

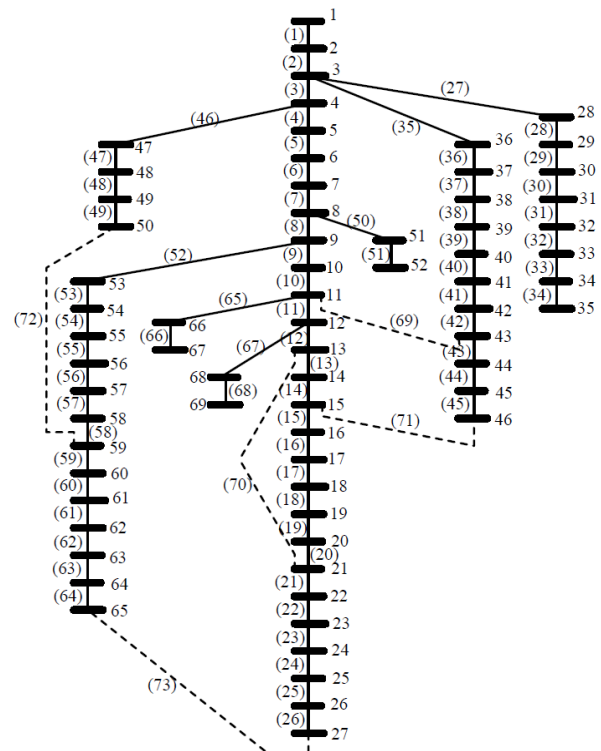
مقدار بار شبکه با توجه به پروفیل بار ارائه شده در [۱۳] در هر ساعت محاسبه و به ۳ سطح بار، تقسیم می‌شود. با توجه به پروفیل بار شبکه در یک شبانه‌روز، ۱۲ ساعت در سطح کم‌باری، ۱۰ ساعت در سطح بار عادی و ۲ ساعت در حالت پرباری قرار دارد. همچنین پارامترهای مربوط به هزینه فعالیت در بازار به ازای سطوح مختلف بار به صورت جدول ۴ در نظر گرفته شده است. در محیط بازار با افزایش مقدار تقاضا، هزینه تأمین انرژی نیز افزایش می‌یابد و بنابراین در ساعات پرباری شبکه، قیمت انرژی در بازار انرژی و قیمت توان راکتیو در بازار خدمات جانبی نسبت به ساعات مربوط به بار عادی شبکه بیشتر می‌باشد. این در حالی است که در ساعات کاهش میزان تقاضا، قیمت‌های انرژی در بازارهای انرژی و خدمات جانبی افت نموده و کمتر از حالت عادی شبکه می‌گردد. این موارد در جدول ۴ قابل مشاهده است.

مقدار تابع هزینه شرکت توزیع خصوصی در محیط بازار برق در ۵ حالت بررسی می‌گردد:

(۱) محاسبه هزینه فعالیت DISCO در محیط بازار بدون حضور منابع تولید پراکنده و با آرایش اولیه شبکه.

جدول ۶: مشخصات منابع تولید پراکنده شبکه آزمون دوم.

| شماره شین | ظرفیت (kVA) | ضریب توان | α | β | γ |
|-----------|-------------|-----------|----------|---------|----------|
| ۸ | ۷۰ | ۰٫۹ | ۰٫۰۰۰۸ | ۰٫۰۰۶ | ۰ |
| ۱۱ | ۱۰۰ | ۰٫۸۵ | ۰٫۰۰۰۷ | ۰٫۰۰۴ | ۱ |
| ۲۱ | ۱۰۰ | ۰٫۹ | ۰٫۰۰۰۴ | ۰٫۰۰۷ | ۱ |
| ۴۵ | ۴۰ | ۰٫۸ | ۰٫۰۰۱۰ | ۰٫۰۰۹ | ۲ |
| ۵۰ | ۲۰۰ | ۰٫۹ | ۰٫۰۰۰۳ | ۰٫۰۰۴ | ۰ |
| ۶۱ | ۳۰۰ | ۰٫۹ | ۰٫۰۰۰۲۵ | ۰٫۰۰۱ | ۳ |



شکل ۷: سیستم نمونه ۶۹ شینه مورد مطالعه.

جدول ۷: نتایج شبیه‌سازی عملکرد DISCO در محیط بازار برق در شبکه آزمون دوم.

| حالت | نوع سطح بار | تعداد بازآرایی | | | هزینه فعالیت شرکت در یک شبانه‌روز (\$) |
|------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--|
| | | کم‌باری | بار عادی | پرباری | |
| حالت اول | آرایش شبکه | ۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹ | ۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹ | ۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹ | ۵۹۰۳/۵۳۶ |
| | هزینه (\$/h) | ۱۵۰/۷۶۴۴ | ۳۹۹/۹۷۵۷ | ۵۴۷/۳۰۳۱ | |
| حالت دوم | آرایش شبکه | ۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹ | ۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹ | ۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹ | ۵۱۵۵/۳۹۴۲ |
| | هزینه (\$/h) | ۱۳۰/۴۸۷۳ | ۲۶۲/۱۷۵۱ | ۴۸۳/۸۹۷۸ | |
| حالت سوم | آرایش شبکه | ۷۰-۶۹-۶۱-۵۵-۱۴ | ۷۰-۶۹-۶۱-۵۵-۱۴ | ۷۰-۶۹-۶۱-۵۵-۱۴ | ۵۶۶۲/۱۳۴۸ |
| | هزینه (\$/h) | ۱۴۵/۷۵۴۹ | ۲۸۷/۳۹۸۶ | ۵۱۸/۵۴۵۰ | |
| حالت چهارم | آرایش شبکه | ۷۳-۷۰-۶۹-۲۱-۵ | ۷۳-۷۰-۶۹-۲۱-۵ | ۷۳-۷۰-۶۹-۲۱-۵ | ۴۹۱۶/۵۵۴ |
| | هزینه (\$/h) | ۱۲۵/۲۴۶۷ | ۲۴۹/۷۸۳۵ | ۴۵۶/۸۷۹۳ | |
| حالت پنجم | آرایش شبکه | ۷۳-۷۰-۶۹-۲۱-۵ | ۷۱-۷۰-۶۹-۲۱-۱۳ | ۷۱-۷۰-۶۹-۲۱-۱۳ | ۴۶۸۵/۳۷۰۶ |
| | هزینه (\$/h) | ۱۲۵/۲۴۶۷ | ۲۳۲/۴۱۳۰ | ۴۲۵/۱۴۰۱ | |

۵-۲ شبکه آزمون دوم

شبکه آزمون اول تقسیم‌بندی گردیده و مقدار تابع هزینه شرکت خصوصی در محیط بازار برق در ۵ حالت ذکر شده بررسی می‌گردد. مدت زمان شبیه‌سازی توسط یک رایانه ۲/۴ GHz با ۲ GB RAM، حدود ۲۹ ثانیه بوده است. جدول ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با مقایسه حالات مختلف شبیه‌سازی از جدول ۷ نتایج زیر حاصل می‌گردد:

(۱) هزینه‌های شرکت در حالت دوم نسبت به حالت اول، به میزان ۷۴۸/۲ دلار در هر روز کاهش می‌یابد، بنابراین کنترل منابع تولید پراکنده باعث کاهش هزینه‌های عملکرد شرکت توزیع خصوصی خواهد شد.

(۲) با انجام بازآرایی در ابتدای روز، هزینه‌های شرکت در حالت سوم نسبت به حالت اول به میزان ۲۴۱/۴ دلار در هر روز کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه حالت چهارم نسبت به حالت دوم، هزینه فعالیت شرکت به میزان ۲۳۸/۸ دلار در هر روز کاهش می‌یابد. بنابراین

شبکه آزمون دوم شبکه توزیع ۶۹ شینه IEEE می‌باشد که شمای تک‌خطی این شبکه در شکل ۷ نشان داده شده است [۱۶]. فرض شده که در هر یک از خطوط شبکه، کلیدهایی جهت مانور وجود داشته باشد. در حالت عادی شبکه با قراردادن کلیدهای ۶۹، ۷۰، ۷۱، ۷۲ و ۷۳ در حالت قطع، یک ساختار شعاعی برای شبکه حاصل می‌گردد. این کلیدها با خط‌چین در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. این شبکه در ولتاژ ۱۲/۶۶ کیلوولت، با توان مبنای ۱۰ مگاوات آمپر کار می‌کند. حداکثر جریان مجاز سیستم ۲۵۰ آمپر و حداکثر افت ولتاژ برای شین‌ها ۵٪ در نظر گرفته می‌شود. مقدار بارهای اکتیو و راکتیو برای این سیستم به ترتیب ۳۸۰۱۹ kW و ۲۶۹۴/۱ kVar می‌باشد.

همچنین ۶ منبع تولید پراکنده به همراه خصوصیات آنها مطابق جدول ۶ در شبکه وجود دارد. بار شبکه نیز به سه سطح بار با زمان مشابه

- IEEE Trans. on Power Sys.*, vol. 26, no. 3, pp. 1591-1599, Aug. 2011.
- [10] T. Niknam, E. Azadfarani, and M. Jabbari, "A new hybrid evolutionary algorithm based on new fuzzy adaptive PSO and NM algorithms for distribution feeder reconfiguration," *Energy Conversion and Management*, vol. 54, no. 1, pp. 7-16, Feb. 2012.
- [11] A. Swarnkar, N. Gupta, and K. R. Niazi, "Adapted ant colony optimization for efficient reconfiguration of balanced and unbalanced distribution systems for loss minimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 129-137, Sep. 2011.
- [12] A. Saffar, R. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "A new fuzzy optimal reconfiguration of distribution systems for loss reduction and load balancing using ant colony search-based algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 5, pp. 4021-4028, Jul. 2011.
- [13] M. Mashhour, M. A. Golkar, and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Extending market activities for a distribution company in hourly-ahead energy and reserve markets - Part I: problem formulation," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 1, pp. 477-486, Jan. 2011.
- [14] A. Ebrahimi Milani and M. R. Haghifam, "An evolutionary approach for optimal time interval determination in distribution network reconfiguration under variable load," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, nos. 1-2, pp. 68-77, Jan. 2011.
- [15] L. L. Pfitscher, D. P. Bernardon, L. N. Canha, V. F. Montagner, V. J. Garcia, and A. R. Abaide, "Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time," *Electric Power Systems Research*, vol. 97, pp. 84-92, Apr. 2013.
- [16] S. Chandramohan, N. Atturulu, R. P. Kumudini Devi, and B. Venkatesh, "Operating cost minimization of a radial distribution system in a deregulated electricity market through reconfiguration using NSGA method," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 126-132, Feb. 2010.
- [17] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, "Feeder reconfiguration with dispatchable distributed generators in distribution system by tabu search," in *Proc. 44th Int. Universities Power Engineering Conf., UPEC*, 5 pp., 1-4 Sep. 2009.
- [18] M. M. Eusuff, K. Lansey, and F. Pasha, "Shuffled frog-leaping algorithm: a mimetic meta-heuristic for discrete optimization," *Engineering Optimization*, vol. 38, no. 2, pp. 129-154, Mar. 2006.
- [19] S. K. Goswami and S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1484-1491, Jul. 1992.
- [20] F. V. Gomes, S. Carneiro, J. L. Pereira, P. A. N. Garcia, and L. R. Araujo, "A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems," *IEEE Trans. on Power Sys.*, vol. 20, no. 3, pp. 1373-1378, Aug. 2005.
- [21] T. Niknam, J. Olamaie, and R. Khorshidi, "A hybrid fuzzy algorithm for multiobjective distribution feeder reconfiguration," *World Applied Sciences J.*, vol. 4, no. 2, pp. 308-315, 2008.

بهداد آرندیان متولد سال ۱۳۶۷، تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ در دانشگاه‌های کاشان و اصفهان به پایان رسانده است و از مهرماه ۱۳۹۱ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهینه‌سازی انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر و بازار برق

رحمت الله هوشمند تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۰ از دانشگاه فردوسی مشهد و دانشگاه تهران و در مقطع دکتری مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه تربیت مدرس تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت و شبکه‌های توزیع، کاربرد سیستم‌های هوشمند در مسائل بهینه‌سازی، و سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته.

اسکندر قلی پور تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۷۰ از دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه تهران و در مقطع دکتری مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه نانسی فرانسه به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد. نام‌برده قبل از پیوستنش به دانشگاه اصفهان در سال‌های ۱۳۸۲ الی ۱۳۹۰ استادیار مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق (وابسته به وزارت نیرو و دانشگاه جامع) بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کنترل و پایداری سیستم‌های قدرت، سیستم‌های توزیع و کاربرد ادوات FACTS در سیستم‌های انتقال و توزیع.

انجام بازآرایی باعث کاهش تلفات و در نتیجه کاهش هزینه‌ها خواهد شد.

۳) بهترین نوع عملکرد DISCO در حالت پنجم است که هزینه‌های شرکت در بازار کمترین مقدار ممکن می‌باشد. با توجه به این حالت می‌توان هزینه‌های DISCO را به میزان ۱۲۱۸/۲ دلار در هر روز کاهش داد. لذا یک شرکت خصوصی قادر خواهد بود سود خالص سالانه‌ای به میزان ۴۴۴۳۰ دلار بابت اعمال بازآرایی در شبکه توزیع و کنترل منابع تولید پراکنده داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم ترکیبی جهش قورباغه، روش جدیدی در حل مسأله بازآرایی در سیستم‌های توزیع ارائه شد. این بهینه‌سازی در محیط بازار برق با وجود منابع تولید پراکنده بیان گردید. شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه آزمون، سرعت و دقت بالاتر این روش را نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های آزمون نشان می‌دهد که حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع باعث کاهش هزینه‌های فعالیت شرکت توزیع خصوصی می‌گردد. همچنین با انجام بازآرایی در حضور منابع تولید پراکنده و کنترل تولید منابع، سود ناشی از فعالیت شرکت توزیع خصوصی افزایش می‌یابد. آرایش بهینه شبکه در هر یک از سطوح بار می‌تواند با دیگری متفاوت باشد، به علاوه ساختار نهایی شبکه در حضور منابع تولید پراکنده نسبت به زمانی که منابع در شبکه وجود ندارند، متفاوت است. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی ملاحظه می‌شود هرچه شبکه بزرگ‌تر بوده و تعداد کلیدهای مانور افزایش یابد، فضای حل مسأله بزرگ‌تر شده و زمان بیشتری جهت یافتن آرایش بهینه شبکه مورد نیاز است. با این حال با توجه به مدت زمان حل مسأله، می‌توان از این روش در محیط بازار که به روشی آنلاین و سریع نیاز است، استفاده نمود.

مراجع

- [1] A. C. Gallardo, L. G. Santander, and J. E. Pezao, "Greedy reconfiguration algorithms for medium voltage distribution networks," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 328-337, Jan. 2009.
- [2] J. S. Savier and D. Das, "Loss allocation to consumers before and after reconfiguration of radial distribution networks," *Electric Power and Energy Sys.*, vol. 33, no. 3, pp. 540-549, Mar. 2011.
- [3] L. W. de Oloveria, et al., "Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy losses minimization," *Electric Power and Energy Sys.*, vol. 32, no. 8, pp. 840-848, Oct. 2010.
- [4] S. P. Singh, G. S. Raju, and G. K. Roa, "A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks," *Electric Power and Energy Systems*, vol. 31, nos. 7-8, pp. 309-314, Sep. 2009.
- [5] J. Zhua, et al., "A rule based comprehensive approach for reconfiguration of electrical distribution network," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 2, pp. 311-315, Feb. 2009.
- [6] G. K. V. Raju and P. R. Bijwe, "An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics," *IEEE Trans. on Power Sys.*, vol. 23, no. 3, pp. 1280-1287, Aug. 2008.
- [7] H. Braz and B. Souza, "Distribution network reconfiguration using genetic algorithms with sequential encoding: subtractive and additive approaches," *IEEE Trans. on Power Sys.*, vol. 26, no. 2, pp. 582-593, May 2011.
- [8] N. Gupta, A. Swarnkar, K. R. Niazi, and R. C. Bansal, "Multi objective reconfiguration of distribution systems using adaptive genetic algorithm in fuzzy framework," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. 12, pp. 1288-1298, Dec. 2010.
- [9] W. Wu and M. Tsai, "Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration,"