

بازآرایی شبکه توزیع به منظور بهبود فروافتادگی ولتاژ با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات گسسته

میلاد رحیمی پور بهبهانی^۱ محمدعلی امینی^۲ علیرضا جلیلیان^۳

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران،

milad_rahimi@elec.iust.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

Mo_Amini@elec.iust.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

jalilian@iust.ac.ir

چکیده: امروزه با توجه به افزایش حضور بارهای حساس، کیفیت توان الکتریکی در شبکه‌های برق اهمیتی بیش‌ازپیش یافته است. علاوه بر این، شبکه‌های توزیع به دلیل وسعت و نسبت R/X بالا، تلفات بالایی دارند. بازآرایی به‌عنوان روشی که می‌تواند علاوه بر تلفات، کیفیت توان شبکه را تغییر دهد مطرح می‌شود. در این مقاله، اثر بازآرایی بر بهبود فروافتادگی ولتاژ شین‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور مدل‌سازی فروافتادگی ولتاژ از خطای تک فاز به زمین استفاده شده است. شبکه مورد مطالعه، شبکه ۶۹ شینه استاندارد IEEE می‌باشد و از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌منظور یافتن آرایش بهینه بهره برده شده است. نتایج نشان دهنده این است که بازآرایی علاوه بر بهبود تلفات می‌تواند فروافتادگی ولتاژ شین‌ها، را نیز به‌طور هم‌زمان بهبود دهد و باعث شود که احتمال خاموشی تجهیزات حساس در هنگام خطا به کمترین مقدار خود برسد. علاوه بر این آنالیز حساسیت آرایش نهایی به بارهای حساس شبکه با در نظر گرفتن هزینه کلیدزنی و تلفات انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: بازآرایی شبکه توزیع، فروافتادگی ولتاژ، تلفات، الگوریتم ازدحام ذرات، کیفیت توان

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.201

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا جلیلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - نارمک - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده برق

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت روزافزون صنعت برق، کیفیت توان در سمت تولید و مصرف اهمیت ویژه‌ای یافته است. یکی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت توان شبکه، فروافتادگی ولتاژ می‌باشد [۱]. فروافتادگی‌های ولتاژ بر اثر وقوع انواع خطا در شبکه، راه‌اندازی موتورها و ... در شبکه قدرت به وجود می‌آیند که علاوه بر ایجاد اختلال در عملکرد تجهیزات کنترلی و حفاظتی، موجب آسیب به تجهیزات حساس که عملکرد منظمی دارند (همانند صنایع نساجی) می‌شود.

در کنار کیفیت برق، کمیت توان تولیدی نیز همواره مورد بحث بوده است. از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کمیت توان تولیدی که موجب افزایش هزینه‌های شرکت برق می‌شود، تلفات است. بیشترین میزان تلفات در شبکه برق، به دلیل ولتاژ پایین (و متعاقب آن، جریان بالا) و مقاومت بالای خطوط، مرتبط با شبکه‌های توزیع می‌باشد. در بین روش‌های مختلف کاهش تلفات شبکه توزیع بازآرایی به‌عنوان روشی ارزان و مؤثر شناخته می‌شود [۲-۴].

در شبکه‌های توزیع در ایران و سایر کشورها کلیدهایی برای بازیابی شبکه در هنگام خطا، که در حالت عادی باز (Tie Switch) (TS) می‌باشند تعبیه شده‌اند. بازآرایی به مفهوم تغییر آرایش شبکه با استفاده از بسته یا باز نمودن تعدادی از کلیدهای TS و تعدادی از کلیدهای عادی بسته شبکه (Sectionalizing Switch) به‌منظور رسیدن به هدفی خاص (به‌طورمعمول کاهش تلفات فرکانس پایه) می‌باشد، تعریف می‌گردد [۵، ۶].

تلفات هدف نخستین و قدیمی بازآرایی بوده است. مرلین نخستین بار در سال ۱۹۷۵، بازآرایی را به‌عنوان یک روش جهت کاهش تلفات مطرح کرد [۷]. در این مرجع، ابتدا همه کلیدهای شبکه بسته می‌شوند تا یک آرایش حلقوی ایجاد شود، سپس این کلیدها هم‌زمان به‌گونه‌ای باز می‌شدند تا آرایشی شعاعی با کمترین تلفات را نتیجه دهند. بعدها روش به‌کاررفته در این مقاله به روش شاخه و مرز نام‌گذاری شد [۸]. مزیت این روش شامل عدم وابستگی آرایش نهایی به آرایش اولیه و عیب این روش استفاده از پخش بار DC و تقریبی بودن محاسبات آن است. در [۹] بازآرایی با استفاده از الگوریتم جدیدی به منظور بهبود تلفات انجام شده است. در این الگوریتم، با استفاده از نظریه گراف و با بستن همه کلیدها، وزنهایی از نظر تلفات به هر شاخه نسبت داده می‌شود و بازآرایی با استفاده از این وزنها و باز کردن تعداد لازم شاخه‌ها انجام می‌گیرد. الگوریتم پیشنهادی الگوریتم سریعی است که کارآیی مناسبی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها را از خود نشان می‌دهد. در مرجعی دیگر یک روش فازی‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک جهت بازآرایی استفاده شده است [۱۰]. هدف از این مقاله، حداکثر کردن پایداری ولتاژ شبکه برای مجموعه‌ای خاص از بارها می‌باشد. نحوه کدنویسی الگوریتم ژنتیک در این مقاله، به‌گونه‌ای هست که خاصیت شعاعی بودن شبکه حفظ شود و همچنین عملکرد

جهش در الگوریتم ژنتیک به‌گونه‌ای کنترل می‌شود که جست‌وجوی مؤثرتری در فضای شبکه ایجاد گردد. روش به‌کاررفته در این مقاله، بر روی شبکه‌های توزیع ۳۳ و ۶۹ باس استاندارد IEEE مورداستفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بازآرایی، با بهبود پایداری ولتاژ، تلفات شبکه را نیز کاهش می‌دهد.

روش‌های زیادی جهت بهبود کیفیت توان در شبکه توزیع وجود دارد [۱۱]. اخیراً گستره استفاده از بازآرایی نیز افزایش چشمگیری داشته و اهداف کیفیت توانی و اهداف نوین‌تری را دربرگرفته است [۱۲، ۱۳]. اثر بارهای هارمونیکی در مسئله بازآرایی با در نظر گرفتن تلفات کل که شامل تلفات اصلی و هارمونیکی می‌باشد، در [۱۴] بررسی شده است. در این مرجع سه روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات گسسته، رقابت استعماری و جهش قورباغه از نظر سرعت و میزان همگرایی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تلفات هارمونیکی می‌تواند آرایش بهینه در بازآرایی را تغییر دهد. بهبود کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از الگوریتم کرم شبتاب در [۱۵] بررسی شده است. در این مرجع، علاوه بر در نظر گرفتن تلفات، افزایش ولتاژ شین‌های حساس هنگام خطا به‌عنوان یک شاخص کیفیت توانی و کاهش قطعی‌های کوتاه‌مدت مصرف‌کنندگان به‌عنوان یک تابع هدف قابلیت اطمینانی در نظر گرفته شده است. نتایج این مقاله سودمندی اثر بازآرایی را در بهبود قابلیت اطمینان و همچنین کم‌کردن فروافتادگی ولتاژ ایجادشده در هنگام خطا را اثبات می‌کند. در [۱۶] بازآرایی به‌منظور بهبود تلفات و اعوجاج هارمونیکی شین‌ها انجام شده است. در این مرجع، اثر جایابی خازن به‌طور هم‌زمان با بازآرایی مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شده است که بازآرایی و جایابی خازن به‌طور هم‌زمان اثر بیشتری در بهبود اهداف موردبررسی در مقایسه با زمانی که بازآرایی و خازن‌گذاری به‌طور جداگانه به‌عنوان هدف تعیین شوند، دارند. الگوریتم مورداستفاده در این مقاله، الگوریتم ازدحام ذرات است و نتایج این مقاله بر روی شبکه ۳۳ شینه استاندارد و همچنین یک شبکه واقعی موردبررسی قرار گرفته است.

تمرکز جبران‌سازی فروافتادگی ولتاژ، عمدتاً بر روش‌های هوشمند نظیر ادوات الکترونیک قدرت است. در مرجع [۱۷، ۱۸] از بازیاب دینامیکی ولتاژ^۱ بمنظور حذف فروافتادگی ولتاژ استفاده شده است. بازیاب دینامیکی ولتاژ در صورت تشخیص فروافتادگی ولتاژ، با استفاده از تزریق سری ولتاژ در محل نصب، باعث بهبود ولتاژ نهایی می‌شود. همچنین در مرجع [۱۹] از جبران‌ساز ساکن^۲ بمنظور مقابله با فروافتادگی ولتاژ استفاده شده است. در این روش با استفاده از تزریق جریان موازی در شرایط فروافتادگی ولتاژ، تأثیر این پدیده بر سایر نقاط شبکه محدود شده است. در مرجع [۲۰] جبران‌سازی فروافتادگی ولتاژ با استفاده از ادوات فکتس نظیر بازیاب دینامیکی ولتاژ، جبران‌ساز ساکن و جبران‌ساز ساکن راکتیو انجام گرفته و نتایج عملکرد آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. در مرجع [۲۱] از ذخیره‌ساز انرژی چرخ گردان^۳ جهت مقابله با فروافتادگی ولتاژ استفاده شده است. در این

بخش چهارم نتایج شبیه سازی بر روی شبکه ۶۹ باسه مورد ارزیابی قرار می گیرد. در بخش های پنجم و ششم به ترتیب ارزیابی تاثیر انتخاب باس های حساس در نتیجه مطالعه و ارزیابی اقتصادی الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان در بخش هفتم نتیجه گیری کلی از مقاله انجام می گردد.

۲- تعریف مساله

۲-۱- مدل سازی فروافتادگی ولتاژ

عوامل متعددی از جمله انواع مختلف خطا، راه اندازی موتورهای القایی و ... می تواند موجب ایجاد فروافتادگی ولتاژ در شین ها شود. در این مقاله عامل اصلی ایجاد فروافتادگی ولتاژ یعنی خطا در شبکه مدل سازی شده است. خطا در شبکه می تواند به دلیل خطا در خطوط یا شین ها ایجاد شود. اگرچه خطا در شین ها بیشترین میزان افت ولتاژ را در شبکه ایجاد می کند اما به دلیل وسعت خطوط در شبکه توزیع احتمال اتفاق افتادن خطا در خطوط بیشتر است. به همین منظور برای نزدیک کردن مدل سازی به واقعیت خطا در خطوط به عنوان عامل ایجاد خطا در شبکه در نظر گرفته شده است. در این مقاله، با توجه به متعادل بودن شبکه مورد مطالعه، خطا به صورت خطای سه فاز به زمین در خطوط مدل شده است. علاوه بر این، با توجه به تصادفی بودن محل وقوع خطا، فرض شده است که خطای سه فاز به زمین، در وسط خط اتفاق می افتد.

۲-۱- تابع هدف

در این مقاله فرض شده است که ۵ شین حساس در شبکه وجود دارد که افت ولتاژ بیش از حد هر کدام از این شین ها می تواند موجب قطع برق یا آسیب به این تجهیزات و عدم عملکرد درست این تجهیزات حساس شود.

از این رو در این مقاله، تابع هدف در نظر گرفته شده، مطابق معادله (۱) فقط شامل ولتاژ شین های حساس شبکه پس از رخ دادن خطا می باشد. به منظور اینکه در الگوریتم های بهینه سازی، هدف از بهینه سازی باید حداقل سازی تابع هدف باشد، از معکوس کردن در معادله (۱) استفاده شده است. بنابراین، حداقل شدن OF (Objective Function) و متعاقباً حداکثر شدن $Index$ نشان دهنده شرایط مطلوب تر برای شبکه مورد مطالعه می باشد.

سیستم که از کوپلینگ چرخ گردان با ماشین القایی استفاده می شود، تزریق ولتاژ در شرایط فروافتادگی ولتاژ منجر به بهبود آن می گردد. علاوه بر ادوات فکتس تشریح شده فوق که در مقابله با فروافتادگی ولتاژ استفاده می شوند، ادوات فکتس پیشرفته تر با عملکرد ترکیبی (جبران سازی همزمان ولتاژ و جریان) نیز معرفی شده اند. در [۲۲] به بررسی عملکرد جبران ساز یکپارچه کیفیت توان باز در مقابله با فروافتادگی پرداخته شده است. این جبران ساز با استفاده از تزریق سری توسط واحد سری منجر به بهبود ولتاژ در شرایط فروافتادگی ولتاژ می گردد. همچنین در این مرجع، عملکرد جبران ساز در مقابله با فروافتادگی ولتاژ با مشارکت واحدهای موازی بهبود داشته شده است. در [۲۳] از ترکیب جبران ساز دینامیکی ولتاژ و محدود ساز جریان خطا به عنوان یک روش جدید برای مرتبط کردن این دو تجهیز استفاده شده است. تجهیز پیشنهادی قابلیت محدود کردن جریان خطا و همچنین بهبود فروافتادگی ولتاژ شبکه را دارد. در این مقاله روشی نیز برای کنترل ناحیه عملکردی در چهار ناحیه متفاوت پیشنهاد شده است.

در بین اهداف کیفیت توانی بازآرایی، اکثر مراجع به دو هدف اعوجاج هارمونیک شین ها و تلفات هارمونیک پرداخته اند. همچنین، تعداد محدودی به بررسی کارایی بازآرایی در بهبود سایر پدیده های کیفیت توان نیز پرداخته اند [۲۴، ۲۵]. در این بین فروافتادگی ولتاژ شین ها به عنوان یک شاخص کیفیت توانی که بازآرایی می تواند آن را بهبود دهد مغفول مانده است. با توجه به کارایی بسیار زیاد بازآرایی در بهبود پدیده های کیفیت توان، از این رو در این مقاله بازآرایی باهدف بهبود فروافتادگی ولتاژ شین ها و با مدل سازی خطای تکفاز به زمین به عنوان عامل ایجاد فروافتادگی ولتاژ شین ها انجام شده است. همچنین، موضوع قابل توجه در ارزیابی روش های مقابله با پدیده فروافتادگی ولتاژ، هزینه جبران سازی است. در عموم روش های بررسی شده فوق، جبران سازی با استفاده از نصب و بکارگیری ادوات مبتنی بر الکترونیک قدرت است که در مقایسه با روش بازآرایی بسیار پرهزینه تر می باشند. هزینه پیاده سازی بازآرایی صرفاً هزینه کلیدزنی یا به عبارتی تغییر آرایش است که بسیار کمتر از نصب و بهره برداری از ادوات فکتس می باشد. بر این اساس، نوآوری های مقاله را می توان به طور مختصر بصورت زیر بیان نمود:

- ارائه روش جدید، کم هزینه و کاربردی جهت مقابله با پدیده فروافتادگی ولتاژ در شبکه های توزیع
- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در شبکه های استاندارد IEEE 69 باس
- بهبود دقت مطالعه با فراهم نمودن امکان تقسیم باس ها به دو دسته حساس و غیر حساس

مقاله حاضر شامل هفت بخش می باشد. در بخش دوم به بررسی مدل سازی فروافتادگی ولتاژ، تابع هدف و قیود مساله پرداخته می شود. در بخش سوم الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات شرح داده می شود و در

شاخه i به گره j متصل نباشد a_{ij} برابر صفر و اگر شاخه i از گره j خارج شود a_{ij} برابر ۱ و در غیر این صورت a_{ij} برابر ۰ می‌شود. پس از انتخاب شین موجود یک گره به‌عنوان گره مرجع انتخاب و ستون متناظر با گره مرجع حذف‌شده و ماتریس تلاقی A نامیده می‌شود. اکنون اگر درمیان A برابر با ۱ یا ۰ باشد؛ شبکه موردبررسی شعاعی می‌باشد.

۲-۲-۴- قید تغذیه شدن همه شین‌ها

در آرایش حاصله لازم است که همه شین‌ها تغذیه شوند یا به‌عبارت‌دیگر ولتاژ هیچ شینی در شرایط عادی کاری صفر نشود. این قید را می‌توان به‌صورت رابطه (۴) مدل کرد.

$$V_i \neq 0 \quad i \in N \quad (4)$$

که در رابطه فوق N نشان‌دهنده تعداد شین‌ها می‌باشد.

۳- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت می‌باشد که در آن در ابتدا جمعیتی تصادفی تولیدشده و الگوریتم، مکان‌های بهینه را با تغییر این مقادیر تصادفی تولید می‌کند [۲۶]. این روش اولین بار توسط کندی و ابرهات با الگو گرفتن از حرکت پرندگان پیشنهاد شد [۲۷]. الگوریتم ازدحام ذرات شامل گروهی از ذرات می‌باشد که هرکدام از ذرات، در فضایی چندبعدی با استفاده از یک سرعت مشخص قرار می‌گیرند. سرعت ذرات، با استفاده از موقعیت بهترین ذره در کل و همچنین بهترین موقعیت همان ذره در تکرارهای قبل، به‌روز می‌شود [۲۶].

مزایای اصلی ازدحام ذرات در مقایسه با سایر روش‌ها را می‌توان به شرح زیر ذکر نمود:

۱- الگوریتم ساده‌تر است

۲- ازدحام ذرات برای تنظیم نیاز به پارامترهای کمتری دارد.

۳- الگوریتم قدرتمند است و ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی سیستم ترکیبی بسیار سریع‌تر و بسیار کارآمد است [۲۸، ۲۹].

در یک فضای n بعدی، موقعیت و سرعت i مین ذره به ترتیب با استفاده از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید [۲۶].

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (5)$$

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}) \quad (6)$$

بهترین موقعیت هر ذره در ماتریسی به نام $Pbest_i$ به‌صورت رابطه (۷) ذخیره می‌شود؛ و بهترین موقعیت هر ذره در کل در ماتریسی به نام $Gbest_i$ در رابطه (۸) ذخیره می‌شود.

$$Pbest_i = (Pbest_{i1}, Pbest_{i2}, \dots, Pbest_{in}) \quad (7)$$

$$Gbest_i = (Gbest_{i1}, Gbest_{i2}, \dots, Gbest_{in}) \quad (8)$$

$$OF = \left(\frac{1}{Index} \right) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{PCC}} V_i} \right) =$$

$$\left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{PCC}} \left(\frac{Z_{ij} + Z_f}{Z_s + Z_{ij} + Z_f} \right)} \right)$$

در رابطه (۱) V_i ولتاژ شین حساس i و N_{PCC} تعداد شین‌های حساس شبکه که در اینجا ۵ شین ۲۲ و ۴۰ و ۴۵ و ۵۷ و ۶۴ فرض شده است. همچنین در رابطه (۱)، Z_{ij} امپدانس بین شین i و محل خطای j ، Z_f نشان‌دهنده امپدانس خطا و Z_s نشان‌دهنده امپدانس منبع در شین i است. درواقع پیرانتز کوچک‌تر در رابطه (۱) ولتاژ شین i در محل خطای j را نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- قیود

علاوه بر هدف بیان‌شده، قیدهایی نیز وجود دارند که در صورت نقض این قیود، آرایش حاصله از بازآرایی مورد تأیید نمی‌باشد. در ادامه این قیود موردبررسی قرار می‌گیرند.

۲-۲-۱- محدوده مجاز ولتاژ سیستم

ولتاژ شبکه در حالت عملکرد نرمال لازم است که در محدوده مجاز ۰/۹ تا ۱/۱ پیرونیت قرار گیرد. رابطه (۲) نشان‌دهنده این قید برای تمام شین‌های شبکه می‌باشد.

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad i \in N \quad (2)$$

در رابطه فوق، N نشان‌دهنده تعداد گره‌ها و V_i نشان‌دهنده ولتاژ شین i در حالت بهره‌برداری عادی شبکه می‌باشد.

۲-۲-۲- محدوده مجاز جریان عبوری از خطوط

جریان عبوری از خطوط شبکه مورد مطالعه نباید از حد مجاز جریان عبوری کابل‌های خطوط شبکه توزیع بیشتر شود. به‌منظور لحاظ نمودن این قید از رابطه (۳) بهره گرفته‌شده است.

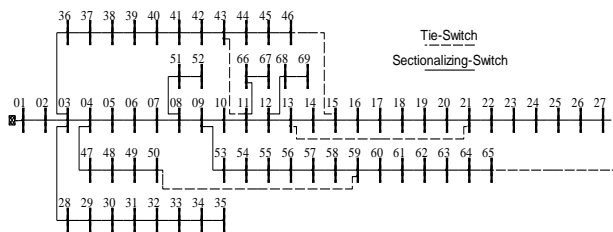
$$|I_l| \leq I_{lmax} \quad l \in NL \quad (3)$$

در رابطه (۳)، NL نشان‌دهنده تعداد شاخه‌های شبکه می‌باشد و $|I_l|$ جریان هر خط و I_{lmax} حد مجاز جریان عبوری از خط l می‌باشد.

۲-۲-۳- قید شعاعی بودن آرایش

به‌منظور بررسی شعاعی بودن، ابتدا ماتریسی که تعداد سطرهای آن برابر تعداد شاخه‌ها و تعداد ستون‌های آن برابر تعداد گره‌ها می‌باشد؛ تشکیل می‌شود. شرایط تشکیل این ماتریس بدین صورت است که اگر

کیلووات و توان راکتیو ۲۶۹۵ کیلووار می‌باشد [۳۰]. بلوک دیاگرام شبکه مورد استفاده مطابق شکل (۱) می‌باشد [۳۱، ۳۲]. جدول (۱)، آرایش ابتدایی و بهینه شبکه باهدف مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، با انجام بازآرایی ولتاژ شین‌های حساس هنگام وقوع خطا، بهبود چشم‌گیری پیدا می‌کند. این امر می‌تواند مانع از خاموشی برخی تجهیزات حساس هنگام خطا شود. البته لازم به ذکر است که این آرایش ایمن در شرایط عادی شبکه تعیین شده و بعد از خطا آرایش ثابت باقی می‌ماند و بنابراین بحث سنکرونیزم و هماهنگی حفاظتی بعد از خطا پیش نمی‌آید.



شکل (۱): بلوک دیاگرام شبکه ۶۹ شینه استاندارد مورد استفاده [۳۱]

شین‌های حساس (۲۲ و ۴۵ و ۷۴ و ۵۶)

همان‌طور که از جدول مشخص است، با انجام بازآرایی علاوه بر بهبود وضعیت شبکه بعد از خطا، تلفات پایه شبکه نیز در شرایط عادی کاهش یافته است. این امر خود نیز می‌تواند باعث کاهش هزینه برق مصرفی توسط بهره‌بردار شود. بعد از خطا نیز، از آنجاکه آرایش پیشنهادی وضعیت بهتری در ولتاژ شین‌های حساس دارد؛ احتمال خاموشی تجهیزات حساس کاهش یافته و در نتیجه امکان آسیب به این تجهیزات به حداقل مقدار خود می‌رسد.

شکل (۲) پروفیل ولتاژ شبکه را قبل از رخ دادن هرگونه خطا برای شرایط کار عادی شبکه نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل نیز مشخص است، پروفیل ولتاژ شبکه با انجام بازآرایی باهدف کاهش احتمال خاموشی مورد تحقیق در این مقاله، نیز به‌طور نسبی بهبود داشته است. البته لازم به ذکر است که به دلیل اینکه تابع هدف مورد مطالعه بهبود ولتاژ شین‌های حساس شبکه بعد از خطا می‌باشد؛ لزومی به بهبود ولتاژ همه‌ی شین‌ها در حالت عادی کاری شبکه بعد از بازآرایی نمی‌باشد و ممکن است بعضی شین‌ها ولتاژ بدتری بعد از بازآرایی را در حالت عادی تجربه کنند اما در هنگام خطا ولتاژ مناسبی داشته باشند. شکل (۳) نشان‌دهنده وضعیت ولتاژ تمام شین‌های شبکه، پس از رخ دادن خطا در خطوط ۲ تا ۷۰ در آرایش پایه شبکه می‌باشد. این شکل درواقع آنالیز کاملی را از وضعیت شبکه پس از رخ داده خطا نشان می‌دهد، به‌عنوان مثال در صورتی که لازم باشد، وضعیت ولتاژ شین ۳۰ پس از رخ دادن خطا در ۵۰ درصد خط ۶۰ مطالعه شود؛ لازم است مربع مربوط به ۶۰ عمودی و ۳۰ افقی انتخاب و با توجه به رنگ آن، محدوده ولتاژ شین ۳۰ پس از رخ دادن خطا مشخص گردد. با دقت در شکل (۳) مشخص می‌گردد که وضعیت ولتاژ شین ۳۰ پس از رخ دادن خطا در خط ۶۰، وضعیت عادی بالاتر از ۹/۱ پریونیت می‌باشد. شکل

(۴)

سرعت هر ذره با توجه به بهترین موقعیت همان ذره در تکرارهای قبل و بهترین موقعیت در بین همه ذرات با استفاده از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$V_i^{k+1} = W(V_i^k) + C_1 \text{rand}_1 \times (Pbest_i^k - X_i^k) + C_2 \text{rand}_2 \times (Gbest^k - X_i^k) \quad (9)$$

عدد C_1 و C_2 ضرایبی می‌باشند که با استفاده از سعی و خطا تعیین می‌شوند. در این مقاله مقادیر C_1 و C_2 به ترتیب در ۲/۱ و ۱/۹ تنظیم شده‌اند. این ضرایب سرعت ذرات را به سمت بهترین مقدار آن ذره و بهترین مقدار کل ذرات سوق می‌دهند. همچنین V_i^k بردار سرعت ذره i در تکرار k و rand_1 و rand_2 اعداد تصادفی بین صفر و یک می‌باشند؛ وجود این دو تابع باعث می‌شود که الگوریتم باوجود اینکه بر طبق قوانین موجود، به دنبال بهینه محلی باشد، مقداری هم عملکرد تصادفی یابد تا سایر بهینه‌های موجود در تابع هدف را هم بتواند مورد ارزیابی قرار دهد. همچنین در رابطه (۹)، W از (۱۰) به دست می‌آید [۲۶].

$$W = W_{\max} - \left(\frac{W_{\max} - W_{\min}}{It_{\max}} \right) \times It \quad (10)$$

در (۱۰) W_{\max} برابر با ۱، W_{\min} برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است. It_{\max} حداکثر تکرارهای تعیین شده و It برابر با تکراری است که در آن W محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که W در هر تکرار باید محاسبه و به‌روزرسانی شود. این به‌روزرسانی به‌گونه‌ای هست که در تکرارهای آخر مقدار W نزدیک به ۰/۵ گردد. موقعیت ذره جدید، با استفاده از موقعیت قبلی و سرعت به‌دست‌آمده برای آن ذره مطابق معادله (۱۱) به دست می‌آید.

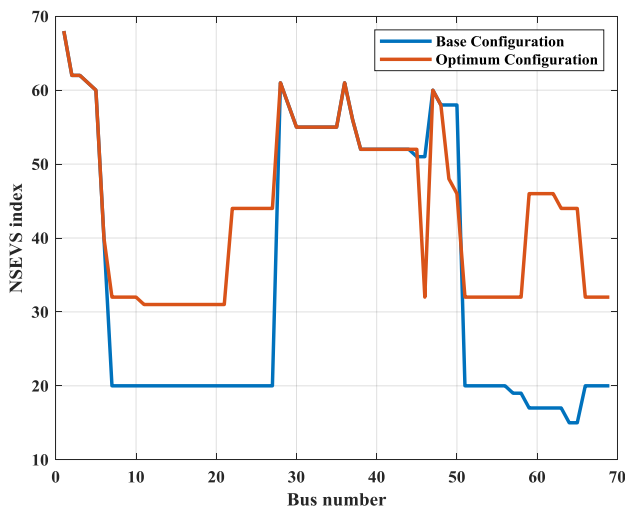
$$X_i^{k+1} = \text{round}(X_i^k + V_i^{k+1}) \quad (11)$$

این روند تا تمام شدن تعداد تکرار تعیین شده ادامه می‌یابد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

شبکه مورد مطالعه در این مقاله شبکه ۶۹ باسه استاندارد توزیع IEEE استفاده شده است. این شبکه دارای سطح ولتاژ ۱۲/۶۶ کیلوولت و دارای ۶۸ کلید عادی بسته و ۵ کلید عادی باز می‌باشد [۲۴]. کلیدهای عادی باز شامل خطوط ۷۰ تا ۷۴ این شبکه می‌باشند. تمامی کلیدها قابلیت تغییر وضعیت را دارا می‌باشند و در مطالعه به عنوان کاندیدای تغییر وضعیت جهت پیاده‌سازی بازآرایی لحاظ گردیده‌اند. با توجه به اینکه بسته شدن تمامی کلیدها منجر به ایجاد پنج حلقه در شبکه توزیع تحت مطالعه می‌شود و از طرفی ضروری است تا آرایش شبکه پس از بازآرایی شعاعی باقی بماند، بنابراین لازمست تا در هر آرایش، پنج کلید (هرکدام از یک حلقه) انتخاب شود تا قید شعاعی بودن شبکه نیز رعایت گردد. در جدول نتایج مطالعه، پنج کلید که معرف آرایش پایه و بهینه می‌باشند، در وضعیت باز و سایر کلیدها در وضعیت بسته قرار خواهند گرفت. شبکه مورد مطالعه دارای توان اکتیو ۳۸۰۲

همچنین، بر اساس شکل‌های ۳ و ۴، نمودار مربوطه که متناظر با عدم حس فروافتادگی ولتاژ در خط‌های مختلف خطوط شبکه است، در شکل (۵) نمایش داده شده است. شکل (۵) تعداد حالات بدون آسیب ولتاژ یک باس خاص^۴ در اثر خطا در کلیه خطوط ممکن را نشان می‌دهد. در شکل فوق، نمودار آبی رنگ متناظر با آرایش پایه شبکه و نمودار قرمز رنگ متناظر با آرایش بهینه شبکه که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حاصل شده است، می‌باشد. بر اساس شکل فوق، تعداد حالات سالم در خط‌های کلیه خطوط شبکه در باس یک، ۶۹ حالت است که نشان دهنده در امان بودن باس یک از وقوع فروافتادگی ولتاژ در خط‌های مختلف خطوط شبکه است. یا به عنوان مثال، در اثر خطا در ۷۴ خط شبکه، در ۵۷ حالت ولتاژ باس ۳۰ در مقدار بالاتر از ۰/۹ پریونیت قرار می‌گیرد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی، باعث جلوگیری از انتشار فروافتادگی ولتاژ در شبکه تحت مطالعه شده است.



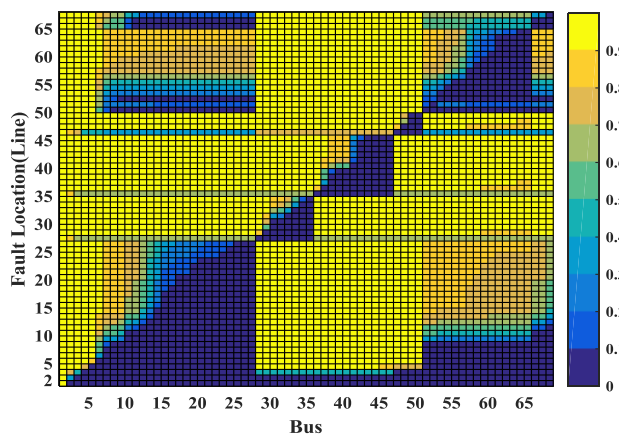
شکل (۵): تعداد حالات بدون آسیب ولتاژ یک باس خاص در اثر خطا در کلیه خطوط

شکل (۶)، پروفیل ولتاژ شین ۲۲، هنگام خطا در خطوط مختلف شبکه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، هنگام خطا در خطوط مختلف شبکه، پروفیل ولتاژ شبکه بهبود محسوسی پیدا می‌کند. این بهبود پروفیل ولتاژ برای رخ دادن خطا در خطوط ۵ تا ۲۳ کاملاً محسوس است. شکل (۷)، همین وضعیت پروفیل ولتاژ را برای شین ۵۷، هنگام خطا در خطوط مختلف شبکه نشان می‌دهد. در شین ۵۷ هم می‌توان مشاهده کرد که با انجام بازآرایی، آرایش حاصله ایمن‌تر شده و احتمال خاموشی کاهش محسوسی پیدا می‌کند. جدول (۲)، تعداد شین‌های سالم مانده (مقدار ولتاژ بیشتر از ۰/۹) هنگام خطا در همه خطوط، برای تجهیزات حساس را در دو حالت پایه و بهینه نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول مشخص است، بازآرایی با کاهش تعداد حالات ولتاژ با مقدار کمتر از ۰/۹، می‌تواند احتمال خاموشی تجهیزات حساس را به‌طور محسوسی کاهش دهد.

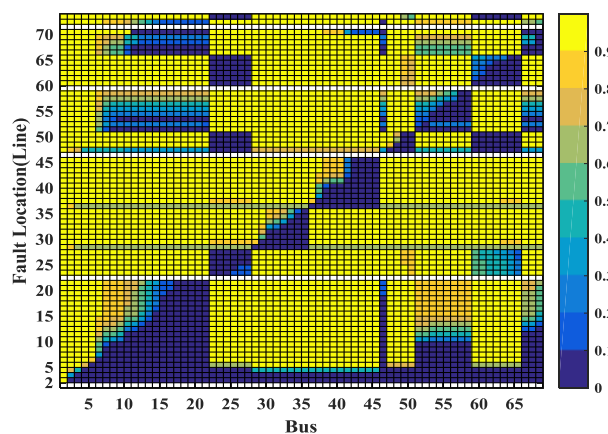


شکل (۲): پروفیل ولتاژ شبکه پیش و بعد از بازآرایی

نیز نشان‌دهنده همین وضعیت ولتاژ شین‌ها پس از رخ دادن خطا در ۵۰ درصد خطوط شبکه اما در آرایش بهینه از نظر فروافتادگی ولتاژ می‌باشد. لازم به ذکر است که در خطوط باز شبکه، اگر حمله‌ای هم رخ دهد به دلیل بار بودن خط، تأثیری در وضعیت ولتاژ شین‌ها ندارد. به همین دلیل ردیف مربوط به خطوط باز شبکه به‌صورت سفید رنگ درآمده است. از مقایسه این دو شکل نیز، اثر بازآرایی در بهبود ولتاژ شین‌ها بعد از خطا مشخص می‌گردد. همان‌طور که مشخص است، تعداد نقاط آبی رنگ که درواقع وضعیت نامناسب را هنگام خطا نشان می‌دهند در آرایش بهینه کاهش محسوسی داشته است.



شکل (۳): ولتاژ بار حساس پس از خطا در کلیه خطوط در حالت پایه



شکل (۴): ولتاژ بار حساس پس از خطا در کلیه خطوط بعد از بازآرایی

جدول (۱): آرایش‌های به‌دست‌آمده از بازآرایی و وضعیت شین‌های حساس

شاخص تابع هدف	تلفات (kW)	شاخص ولتاژ (Index)	مجموع ولتاژ شین‌های حساس هنگام خطا روی همه خطوط در آرایش موردنظر (pu)					کلیدها (خطوط) باز	تعداد تغییر کلید	حداقل ولتاژ قبل از خطا (pu)
			شین ۲۲	شین ۴۰	شین ۴۵	شین ۵۷	شین ۶۴			
حالت پایه	۲۲۵/۰۰	۲۱۶/۳۶	۳۰/۰۷	۵۸/۲۹	۵۳/۶۱	۳۳/۸۸	۳۵/۵۱	۷۰ و ۷۱ و ۷۲ و ۷۳ و ۷۴	-	۰/۹۱
آرایش بهینه	۱۴۱/۴۰	۲۴۸/۵۳	۴۳/۷۹	۵۸/۴۷	۵۴/۶۴	۴۵/۷۶	۴۵/۸۸	۲۲ و ۲۳ و ۴۶ و ۵۹ و ۷۰ و ۷۱	۳	۰/۹۲

جدول (۲): مقایسه احتمال خاموشی و شین‌های کمتر از ۰/۹ در دو حالت پایه و بهینه

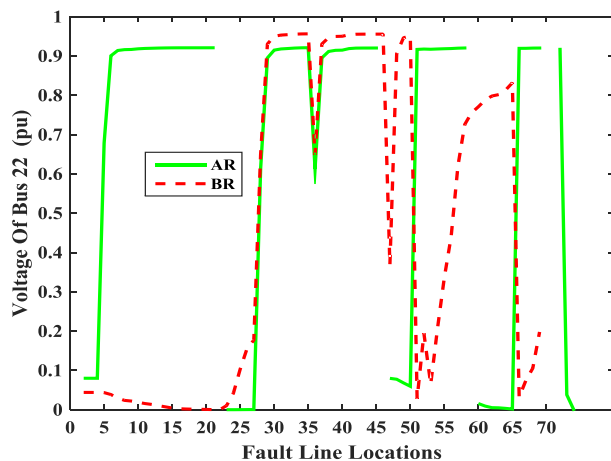
وقوع خطا در ۶۹ حالت (به تعداد خطوط باز آرایش)					شرایط خطا	
۶۴	۵۷	۴۵	۴۰	۲۲	شین حساس وضعیت شبکه	شاخص
۱۵	۱۹	۲۰	۱۹	۱۵	پایه	تعداد حالت با ولتاژ بیشتر از ۰/۹
۴۳	۳۲	۵۳	۵۳	۴۳	بهینه	احتمال عدم آسیب (وقوع ولتاژ بیشتر از ۰/۹)(درصد)
۲۱/۷	۲۷/۵	۲۹/۰	۲۷/۵	۲۱/۷	پایه	
۶۲/۳	۴۶/۳	۷۷/۸	۷۷/۸	۶۲/۳	بهینه	
۴۰/۶	۱۸/۸	۴۸/۸	۵۰/۳	۴۰/۶	-	میزان بهبود در احتمال عدم آسیب (درصد)

شکل (۸)، بهترین وضعیت تابع هدف در تکرارهای مختلف بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

این نمودار خود نشان‌دهنده کارایی مؤثر الگوریتم بهینه‌سازی انتخاب‌شده در همگرایی ذرات می‌باشد. همان‌طور که از نمودار مشخص است؛ از تکرار ۱۰ به بعد مقدار بهینه تغییری نداشته که این خود نشان‌دهنده سریع به جواب رسیدن الگوریتم می‌باشد در شکل (۹)، پروفیل ولتاژ شین‌ها در حالتی که خطا در شین‌ها به‌جای خطا در خطوط انجام گیرد نشان داده شده است. در این حالت فرض شده است که در شین ۲۱، خطا رخ داده است. همان‌طور که مشخص است آرایش پیشنهادی توانسته است تا اثرات خطا در شین را هم بهبود دهد.

۵- ارزیابی تاثیر انواع باس‌های حساس در مطالعه

همان‌طور که در بخش مقدمه تشریح گردید، شبکه‌های توزیع دارای بارهای متعدد و متفاوتی هستند که کیفیت توان از دید آنها اهمیت متفاوتی دارد. به عنوان مثال، در بارهای صنعتی که از تجهیزات الکترونیک قدرت استفاده می‌نمایند، وجود هارمونیک در ولتاژ تغذیه‌کننده منجر به اختلال در عملکرد تجهیزات شده و می‌تواند خسارتی را به دنبال داشته باشد.



شکل (۶): پروفیل ولتاژ شین ۲۲ هنگام خطا خطوط مختلف شبکه

همان‌طور که مشخص است؛ در سطر میزان بهبود در احتمال عدم آسیب، بهبود قابل توجهی در احتمال عدم آسیب شین‌های حساس شبکه رخ داده است. همچنین، لازم به ذکر است که در بین ۵ منطقه مورد مطالعه، نیز شین‌های ۴۰ و ۴۵ به دلیل کمترین احتمال آسیب، بهترین مکان برای نصب تجهیزات حساس آینده می‌باشند.

لحظه‌ای کم شدن نور روشنایی‌ها حس می‌گردد. بنابراین، هزینه خسارت کیفیت توان از دید مشترکین شبکه متفاوت خواهد بود. بر همین اساس، در این مقاله قابلیت تعریف بارهای حساس در مطالعه بازآرایی شبکه توزیع با هدف جبران‌سازی فروافتادگی ولتاژ در کنار اهداف معمول بازآرایی (نظیر تلفات) برای اولین بار ارائه شده است. قابلیت مذکور در روش پیشنهادی، بهره‌بردار را قادر می‌سازد تا بتواند بر اساس شبکه تحت مطالعه، باس‌های حساس را تعریف نموده و سپس مطالعه را انجام دهد. قطعاً باس‌های حساس متفاوت، نتیجه مطالعه را تحت تاثیر قرار خواهد داد. بطور خلاصه، یکی از نوآوری‌های این مقاله، بهبود دقت مطالعه با فراهم نمودن امکان تقسیم باس‌ها به دو دسته حساس و غیرحساس می‌باشد.

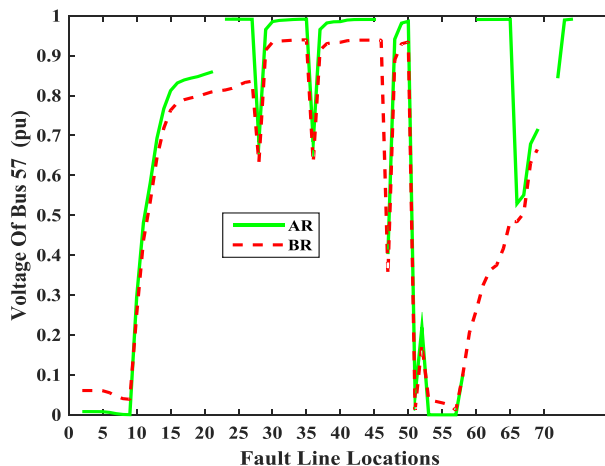
بمنظور ارزیابی این موضوع، باس‌های حساس متفاوت از قسمت گذشته در نظر گرفته شده و مطالعه برای شرایط جدید تکرار شده است. نتایج مطالعه در جدول (۳) ارائه و مقایسه انجام گرفته است.

همانطور که در نتایج جدول مشاهده می‌شود، انتخاب شین‌های حساس (که یکی از قابلیت‌های روش پیشنهادی است) می‌تواند آرایش‌های متفاوتی را به عنوان بهینه حاصل نماید. به عنوان نمونه، در شرایطی که شین‌های حساس انتخابی توسط بهره‌بردار، شین‌های ۲۲، ۴۰، ۴۵، ۵۷ و ۶۴ باشند، آرایش بهینه در صورتی حاصل می‌شود که کلیدهای ۲۲، ۴۶، ۵۹، ۷۰ و ۷۱ در وضعیت باز قرار گیرند. اما در شرایطی که شین‌های حساس انتخابی توسط بهره‌بردار، شین‌های ۱۸، ۲۴، ۲۷ و ۵۸ باشند، آرایش بهینه با بازنمودن کلیدهای ۱۵، ۱۹، ۲۴، ۵۹ و ۷۰ حاصل خواهد شد.

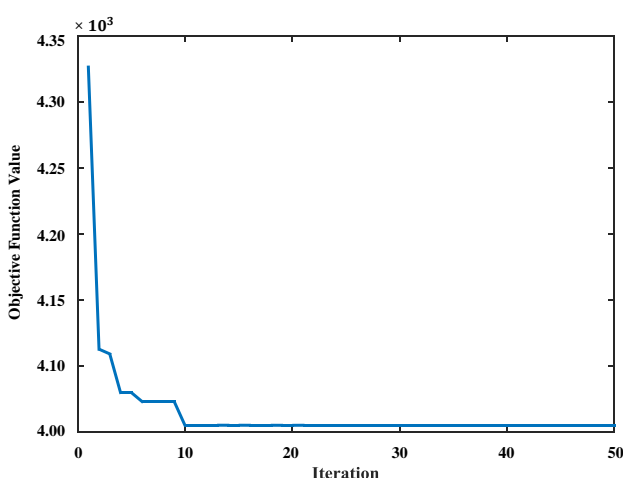
۶- ارزیابی اقتصادی مطالعه

همانطور که در بخش مقدمه مقاله اشاره گردیده است، شبکه‌های توزیع بصورت حلقوی طراحی شده و بصورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

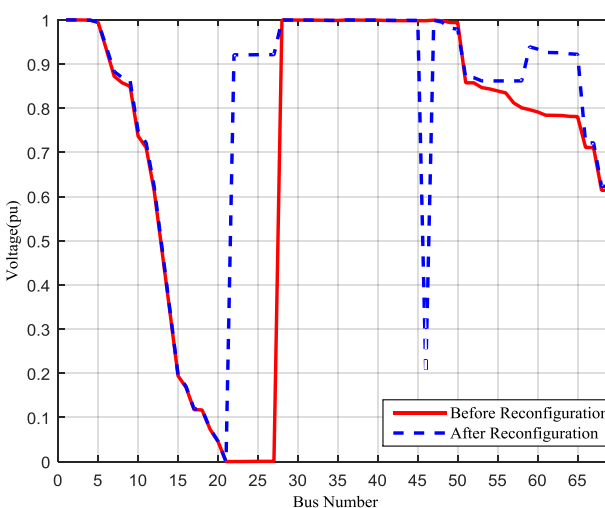
بنابراین، حضور کلیدهای معمولاً باز در شبکه‌های توزیع به همراه کلیدهای معمولاً بسته، امکان تغییر آرایش را برای بهره‌بردار شبکه فراهم می‌نماید تا در مواقع لزوم بتواند با تغییر آرایش، وضعیت بهره‌برداری شبکه را بهبود بخشیده و به هدف موردنظر نزدیک گردد. اساساً کلیدهای مانوری تعبیه شده در شبکه، با هدف تغییر آرایش شبکه و تغذیه بخش سالم شبکه در شرایط خطا تعبیه شده‌اند. لکن، در شرایط بهره‌برداری عادی شبکه نیز می‌توان از این کلیدها برای تغییر آرایش شبکه و دستیابی به وضعیت بهتر از زوایای متعدد استفاده نمود. اولین بار، مرلین و همکاران هدف تلفات را برای این منظور معرفی نمودند. پس از آن اهداف متعدد دیگری به مسئله اضافه شدند. در این مقاله، برای اولین بار، موضوع فروافتادگی ولتاژ و جلوگیری از انتشار آن در شبکه با استفاده از بازآرایی مطرح و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.



شکل (۷): پروفیل ولتاژ شین ۵۷ هنگام خطا در خطوط مختلف شبکه



شکل (۸): بهترین نتیجه تابع هدف تعیین شده در هر تکرار



شکل (۹): پروفیل ولتاژ در حالت خطا شین

همچنین، در مصرف‌کنندگان صنعتی که بارهای آنها مجهز به تجهیزات حفاظتی می‌باشد، وقوع فروافتادگی در ولتاژ تغذیه می‌تواند عملکرد تجهیزات حفاظتی را به همراه داشته و باعث قطع روند برق‌رسانی و اختلال در عملکرد مجموعه گردد. در سمت مقابل، وقوع فروافتادگی ولتاژ در بارهای مسکونی گاهی اوقات صرفاً با تجربه

جدول (۳): اثر تغییر شین‌های حساس بر آرایش پیشنهادی

شاخص تابع هدف	تلفات (kW)	شاخص ولتاژ (Index)	کلیدها (خطوط) باز	تعداد تغییر کلید	هزینه کلیدزنی (دلار)	هزینه تلفات - دلار / کیلووات ساعت (درصد کاهش در مقایسه با حالت پایه)	حداقل ولتاژ قبل از خطا (pu)
حالت پایه	۲۲۵/۰۰	۲۱۶/۳۶	۷۴ و ۷۳ و ۷۲ و ۷۱ و ۷۰	-	-	۴۰/۵ (% ۰)	۰/۹۱
آرایش بهینه (باس‌های حساس ۲۲ و ۴۰ و ۴۵ و ۵۷ و ۶۴)	۱۴۱/۴۰	۲۴۸/۵۳	۷۱ و ۷۰ و ۵۹ و ۴۶ و ۲۲	۳	۰/۳	۳۵/۴۵ (% ۳۷/۲)	۰/۹۲
آرایش بهینه (باس‌های حساس ۱۸ و ۲۴ و ۲۷ و ۵۸)	۱۴۳/۳۲	۱۷۴/۵۴	۷۰ و ۵۹ و ۲۴ و ۱۹ و ۱۵	۴	۰/۴	۲۵/۸۰ (% ۳۶/۳)	۰/۹۳

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر بازآرایی بر بهبود فروافتادگی ولتاژ شین‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از بین عوامل ایجادکننده فروافتادگی ولتاژ، خطا در خطوط به‌عنوان عامل ایجادکننده در نظر گرفته شد. مطالعات بر روی شبکه ۶۹ شینه استاندارد IEEE و با بهره‌گرفتن از الگوریتم ازدحام ذرات گسسته صورت پذیرفت. در این مطالعه، ارزیابی اقتصادی الگوریتم پیشنهادی و همچنین ارزیابی تاثیر انتخاب شین‌های حساس نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بازآرایی می‌تواند موجب بهبود هم‌زمان فروافتادگی ولتاژ شین‌ها و تلفات در شبکه توزیع شود. همچنین مشخص گردید که با انجام بازآرایی می‌توان احتمال آسیب به شین‌ها و تجهیزات حساس شبکه را در هنگام خطا به حداقل رساند.

۸- مراجع

- [1] A. Baghini, Handbook of power quality: John Wiley & Sons, 2008.
- [2] Z. Li, S. Jazebi, and F. De León, "Determination of the optimal switching frequency for distribution system reconfiguration," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, pp. 2060-2069, 2017.
- [3] S. Esmaeili, 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.
- [4] H. Haghighat and B. Zeng, "Distribution system reconfiguration under uncertain load and renewable generation," IEEE Transactions on Power Systems, vol.

عموماً بازآرایی شبکه‌های توزیع، با توجه به فراهم بودن کلیدهای مانوری در شبکه، به عنوان روشی کم هزینه در مقایسه با سایر روش‌های جبران‌سازی مبتنی بر تجهیزات شناخته می‌شود. در بازآرایی هزینه پیاپی‌سازی یا تغییر آرایش صرفاً هزینه کلیدزنی کلیدهای مانوری بوده که در مقایسه با سودآوری اهداف مورد مطالعه بسیار کم هزینه می‌باشد. به عنوان نمونه، هزینه تلفات که با توجه به قیمت لحظه‌ای برق هم می‌تواند محاسبه شود [۳۳، ۳۴]، به طور میانگین ۱۸ سنت بر کیلووات ساعت و هزینه هر بار کلیدزنی ۱۰ سنت می‌باشد [۳۵]. بر این اساس، میزان کاهش تلفات در مقایسه با هزینه کلیدزنی عدد بسیار بزرگتری خواهد بود. جدول (۳) نشان‌دهنده ارزیابی اقتصادی مطالعه بازآرایی می‌باشد.

همانطور که در جدول مذکور نمایش داده شده است، هزینه کلیدزنی در مقایسه با مقدار کاهش هزینه تلفات ناچیز می‌باشد. این موضوع یکی از نقاط قوت و برتری بازآرایی در مقایسه با سایر روش‌های مقابله با فروافتادگی ولتاژ است. لازم به ذکر است که، انجام بازآرایی با هدف فوق، علاوه بر کاهش تلفات، منجر به جلوگیری از انتشار فروافتادگی ولتاژ نیز می‌گردد. انتشار فروافتادگی ولتاژ و حس آن توسط مشترکین، دارای ارزش اقتصادی متفاوت در مشترکین مختلف می‌باشد. به عنوان مثال در مشترکین صنعتی، گاه‌ها فروافتادگی ولتاژ منجر به قطع تولید و چرخه صنعتی آن‌ها شده و هزینه بسیار زیادی در مقایسه با مشترکین خانگی به همراه دارد. لحاظ نمودن این موضوع، منجر به افزایش سودآوری بازآرایی در مقایسه با هزینه کلیدزنی لازم جهت تغییر آرایش می‌باشد.

- Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502), 2001, p. 5 pp. vol. 1.
- [20] Y. Zhang and J. V. Milanović, "Global voltage sag mitigation with FACTS-based devices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 2842-2850, 2010.
- [21] S. Samineni, B. K. Johnson, H. L. Hess, and J. D. Law, "Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage sag correction," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, pp. 42-52, 2006.
- [22] M. Amini and A. Jalilian, "Modelling and improvement of open-UPQC performance in voltage sag compensation by contribution of shunt units," *Electric Power Systems Research*, vol. 187, p. 106506, 2020.
- [23] E. Babaei and M. Sahebjam, "Compensation of Voltage Disturbances and Downstream Fault Currents Reduction by Using a New Topology of DVR-FCL," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 15, pp. 83-92, 2019.
- [24] M. Rahimi Pour Behbahani, A. Jalilian, and M. Amini, "Reconfiguration of distribution network using discrete particle swarm optimization to reduce voltage fluctuations," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, p. e12501, 2020.
- [25] M. Amini and A. Jalilian, "Reduction of short-term flicker emission using genetic algorithm-based network reconfiguration in distribution network," in *31st International Conference on Power System Conference (PSC)*, 2016, pp. 1-5.
- [26] J. Olamaei, T. Niknam, and G. Gharehpetian, "Application of particle swarm optimization for distribution feeder reconfiguration considering distributed generators," *Applied Mathematics and computation*, vol. 201, pp. 575-586, 2008.
- [27] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "A discrete binary version of the particle swarm algorithm," in *IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation*, 1997, pp. 4104-4108.
- [28] H. HassanzadehFard and A. Jalilian, "Optimization of DG Units in Distribution Systems for Voltage Sag Minimization Considering Various Load Types," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, pp. 1-15, 2020.
- [29] H. Musa and S. Ibrahim, "A review of particle swarm optimization (PSO) algorithms for optimal distributed generation placement," *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 4, pp. 232-39, 2015.
- [30] J. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, pp. 2473-2480, 2007.
- [31] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," *IEEE Transactions on power Delivery*, vol. 4, pp. 725-734, 1989.
- [32] M. Amini and A. Jalilian, "Optimal sizing and location of open-UPQC in distribution networks considering load growth," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 130, p. 106893, 2021.
- [33] H. Karimi and S. Jadid, "Optimal Pricing Design for Demand Response Programs with the aims of simultaneously improving the profits and load factor," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 17, pp. 149-159, 2020.
- [34] H. Karimi and S. Jadid, "Real -Time Pricing Design
- 31, pp. 2666-2675, 2016.
- [5] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. Narasimham, "Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation," *IEEE transactions on power systems*, vol. 28, pp. 317-325, 2013.
- [6] M. Amini, A. Jalilian, and M. R. P. Behbahani, "Fast network reconfiguration in harmonic polluted distribution network based on developed backward/forward sweep harmonic load flow," *Electric Power Systems Research*, vol. 168, pp. 295-304, 2019.
- [7] A. Merlin and H. Back, "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system," in *Proc. 5th Power System Computation Conf.*, Cambridge, UK, 1975, pp. 1-18.
- [8] M. Amini, A. Jalilian, and M. R. P. Behbahani, "A new method for evaluation of harmonic distortion in reconfiguration of distribution network," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, p. e12370, 2020.
- [9] 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.
- [10] N. Sahoo and K. Prasad, "A fuzzy genetic approach for network reconfiguration to enhance voltage stability in radial distribution systems," *Energy conversion and management*, vol. 47, pp. 3288-3306, 2006.
- [11] h. toodeji, "Enhancement of Power Quality and Controllability of Electrical Arc Furnaces Using UPQC," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 15, pp. 13-21, 2018.
- [12] E. Hooshmand and A. Rabiee, "Distribution Feeder Reconfiguration Considering Price-Based Demand Response Program," in *Demand Response Application in Smart Grids*, ed: Springer, 2020, pp. 95-117.
- [13] H. M. Ahmed and M. Salama, "Energy Management of AC-DC Hybrid Distribution Systems Considering Network Reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019.
- [14] S. Jazebi, M. M. Hadji, and R. A. Naghizadeh, "Distribution network reconfiguration in the presence of harmonic loads: optimization techniques and analysis," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 1929-1937, 2014.
- [15] H. Shareef, A. A. Ibrahim, N. Salman, A. Mohamed, and W. L. Ai, "Power quality and reliability enhancement in distribution systems via optimum network reconfiguration by using quantum firefly algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 58, pp. 160-169, 2014.
- [16] F. Sayadi, S. Esmaili, and F. Keynia, "Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new P-PSO algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, pp. 2316-2326, 2016.
- [17] D. M. Vilathgamuwa, A. R. Perera, and S. S. Choi, "Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, pp. 928-936, 2003.
- [18] A. M. Rauf and V. Khadkikar, "An enhanced voltage sag compensation scheme for dynamic voltage restorer," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 62, pp. 2683-2692, 2014.
- [19] M. Haque, "Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM," in *2001 IEEE*

Considering Uncertainty of Renewable Energy Resources and Thermal Loads in Smart Grids," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 16, pp. 1-10, 2019.

[35] Z. Li, S. Jazebi, and F. De Leon, "Determination of the optimal switching frequency for distribution system reconfiguration," IEEE Transactions on Power Delivery, . 2060-2069, 2016.

¹ Dynamic voltage restorer (DVR)

² Static Compensator (STATCOM)

³ Flywheel energy storage

⁴ Number of survived events from voltage sag (NSEVS)