

ارائه روشی خطی مبتنی بر مسیر به منظور بازیابی بار در شبکه‌های توزیع از طریق شکل‌گیری ریزشبکه‌ها

میرسعید موسوی زاده¹، دانشجو، محمودرضا حق‌فام²، استاد، محمدحسین شریعت‌خواه³، دانشجو

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
saeed.mousavizadeh@modares.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
Haghifam@modares.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
m.shariatkhah@modares.ac.ir

چکیده: پدیده‌های طبیعی و شرایط آب و هوایی سخت می‌توانند منجر به وقوع خاموشی‌های گسترده در شبکه‌های قدرت شوند. به منظور کاهش هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی ناشی از وقوع خاموشی‌ها، اکثر شرکت‌های برق از دستورالعمل‌ها و رویه‌های عملیاتی از پیش تعیین شده‌ای جهت بازیابی سیستم استفاده می‌نمایند. با این حال، به دلیل اثرات شدید و ماهیت متفاوت چنین پدیده‌هایی روش‌های سنتی بازیابی بار در شبکه توزیع نمی‌توانند تامین انرژی الکتریکی مطلوب مصرف‌کنندگان را در این شرایط تضمین نمایند. از این رو در این مقاله مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به منظور بازیابی بار در شبکه توزیع پس از وقوع چنین رخدادهایی، ارائه شده است. در این مدل با بکارگیری الگوریتم‌هایی مبتنی بر تئوری گراف، ویژگی‌های توپولوژیکی شبکه توزیع همراه با دیگر ویژگی‌های الکتریکی آن در قالب یک مساله خطی فرمول‌بندی شده است. تشکیل ریزشبکه‌ها، تعیین محدوده سرویس‌دهی آن‌ها و مدیریت بهینه تکنولوژی‌هایی مانند منابع تولید پراکنده و منابع پاسخ‌گویی بار پس از وقوع رخداد نیز مورد توجه بوده است. در انتها نیز با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، کارایی و کاربردپذیری مدل یک‌پارچه پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بازیابی، ریزشبکه، شبکه‌های توزیع، منابع پاسخ‌گویی بار.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۶/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۴/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر محمود رضا حق‌فام

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران-دانشگاه تربیت مدرس-دانشکده برق و کامپیوتر-آزمایشگاه سیستم‌های توزیع و انتقال

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات شرایط اقلیمی، تعداد و شدت فجایع طبیعی مانند طوفان، سیل، خشکسالی و غیره در بسیاری از کشورهای جهان رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است [۱ و ۲]. با توجه به گستردگی شبکه‌های توزیع، آسیب‌پذیری بالای آن در برابر این پدیده‌های طبیعی و مشکلاتی از قبیل ضعف شاخصه‌های کنترل‌پذیری و مشکلات مختلف در ساختار نظارتی و بهره‌برداری، لزوم تحقیقات بیشتر در این حوزه ضروری به نظر می‌رسد [۳].

پس از وقوع خاموشی ناشی از شرایط آب و هوایی سخت، مهمترین وظیفه بهره‌بردار شبکه توزیع بازیابی هر چه سریع‌تر سیستم جهت کمینه‌سازی ضررهای اقتصادی وارده به مصرف‌کنندگان خواهد بود. روش‌های بازیابی بار به طور گسترده در مراجع [۴ و ۵] مورد توجه قرار گرفته است. گرچه تکنیک‌ها و استراتژی‌های متداول و سنتی بازیابی بار می‌توانند به صورت موثری عملیات جداسازی خطا را انجام داده و در مرحله بعدی بازیابی حداکثری بار را در دستور کار خود قرار دهند؛ با این حال، بهره‌گیری از این روش‌ها، در مواجهه با این نوع رخدادها که ماهیت متفاوتی نسبت به رخدادهای متداول دارند، از کارایی مناسبی برخوردار نبوده و در این شرایط چالش‌های بسیاری خواهند داشت. این موارد در مرجع [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. بکارگیری تکنولوژی‌های نوینی مانند ادوات شبکه هوشمند، ریزشبکه‌ها و سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده می‌تواند عملکرد شبکه توزیع در این شرایط را بهبود داده و بازیابی سریع‌تر سیستم را امکان‌پذیر نماید [۷]. توانایی جدا شدن از شبکه اصلی و قابلیت عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه به عنوان راه‌حلی موثر در بهبود فرایند بازیابی بار شبکه‌های توزیع در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان و صنعت‌گران قرار گرفته است.

در مرجع [۸] کفایت قیود به منظور تضمین حاشیه بهره‌برداری کافی در عملکرد اقتصادی ریزشبکه و تامین بارهای حساس هنگام وقوع خطا در شبکه بالادست، در نظر گرفته شده است. جهت تشکیل ریزشبکه‌های مطمئن و مبتنی بر مصرف‌کننده در مرجع [۹] مفهوم سیستم قدرت توزیع شده مستقل معرفی شده است که در این مقاله مدیریت سمت مصرف جهت تامین بارهای حساس در مواقع بحرانی به عنوان راه‌حلی مطمئن معرفی شده است.

در مرجع [۱۰] مجموعه اقداماتی به منظور کنترل خدمات بازیابی ریزشبکه‌های چندگانه و بهبود بهره‌برداری در حالت جزیره‌ای اتخاذ شده است. در این مقاله نشان داده شده است که اقدامات کنترلی معرفی شده در جهت کاهش زمان‌های بازیابی بار و بهبود تاب‌آوری سیستم موثر خواهد بود. مرجع [۱۱] گزارشی از تحقیقات اخیر در زمینه بکارگیری عامل‌های چندگانه در دستیابی به سیستم‌های قدرت مطمئن با قابلیت خود ترمیمی ارائه نموده است که این امر از طریق مدیریت ریزشبکه‌های مستقل امکان‌پذیر شده است. در این مقاله

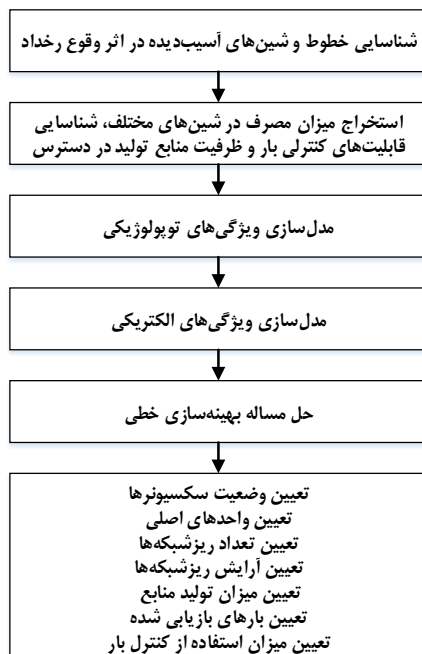
همچنین ذکر شده است که از اتصال ریزشبکه‌ها می‌توان به عنوان یک راه‌حل جدی در جهت بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت بهره برد. استفاده از ریزشبکه به منظور تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز یک ناحیه مسکونی که در مسیر طوفان قرار دارد، در مرجع [۱۲] مورد بحث قرار گرفته است. در این مقاله از یک روش کنترل فاز به منظور پایدارسازی سیستم در زمان اغتشاشات استفاده شده است. در مرجع [۱۳] مدلی به منظور هماهنگی ریزشبکه‌ها جهت بازیابی بار پس از قطعی از شبکه بالادست ارائه شده است. در این مرجع، هر یک از ریزشبکه‌ها پس از برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری در دوره قطعی، مقادیر کمبود و اضافه توان خود را به بهره‌بردار سیستم اعلام نموده و در ادامه بهره‌بردار با انجام بهینه‌سازی نحوه تبادلات توان میان ریزشبکه‌ها جهت به حداقل رساندن خاموشی‌ها در کل شبکه را مشخص می‌نماید.

در مرجع [۱۴] نیز مدلی مبتنی بر تاب‌آوری به منظور بازیابی بارها پس از وقوع حوادث شدید ارائه شده است. در این مقاله با ارائه مفهوم زمان بهره‌برداری پیوسته، میزان در دسترس بودن ریزشبکه‌ها جهت بازیابی بار در شبکه‌های توزیع را مورد ارزیابی قرار داده است. در مرجع [۱۵] نیز طرح بازیابی ترتیبی به منظور طراحی اقدامات کنترلی مناسب جهت بازیابی بارهای حساس پس از وقوع رخداد در شبکه توزیع ارائه شده است. در این مقاله ترتیب عملیات کلیدزنی، تنظیم ولتاژ و شکل‌گیری ریزشبکه‌ها نیز مورد توجه بوده است. در بیشتر این مقالات، روش‌هایی جهت بهره‌برداری ریزشبکه‌های موجود ارائه شده و ساختار شبکه توزیع و محدودیت‌های آن نیز به ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است. به عبارت دیگر در این مقالات ساختار ریزشبکه پیش از وقوع رخداد نیز مشخص است.

تشکیل ریزشبکه‌ها پس از وقوع رخداد در شبکه‌های توزیع نیز در مقالات [۱۶ و ۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۶] فرض شده است که تعداد ریزشبکه‌ها بعد از وقوع رخداد معلوم بوده و نقاط مانوری میان فیدرها و آرایش‌های مختلف شبکه توزیع نیز در نظر گرفته نشده است. در مقاله [۱۷] با توسعه الگوریتم ارائه شده در [۱۶]، تاثیر نقاط مانور بر عملکرد شبکه توزیع جهت بازیابی بارها با ارائه مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مرتبه دوم بررسی شده است. با این حال در این مقاله نیز تعداد ریزشبکه‌ها و منابع تولید پراکنده‌ای که به عنوان واحد کنترلی اصلی در نظر گرفته می‌شوند، از پیش تعیین شده و معلوم فرض شده است.

همچنین در این مقالات محدودیت‌های ساختاری و فنی شبکه توزیع مانند تعداد سکسیونر و کلید تغییر وضعیت نیز به طور مناسبی مدل‌سازی نشده است. این امر می‌تواند طراحی اقدامات لازم به منظور بهبود تاب‌آوری سیستم در شرایط بحرانی را با چالش‌های جدی روبرو سازد. همچنین با توجه به نقش انکارناپذیر منابع پاسخ‌گویی بار در مدیریت موثرتر سیستم در این شرایط، مدل‌سازی این منابع و بررسی محدودیت‌های بکارگیری آن در شبکه‌های توزیع نیز مورد نیاز خواهد بود که در تحقیقات اخیر مورد توجه قرار نگرفته است.

شناسایی و مکان بارهای حساس و با اولویت بالاتر تعیین می‌شود. در مرحله دوم، هدف اصلی، یکپارچه نمودن مجدد سیستم با تعیین استراتژی‌های بهینه به منظور تشکیل ریزشکبه و بکارگیری واحدهای تولیدی و منابع سمت مصرف در دسترس می‌باشد. با استفاده از تئوری‌های مرتبط با نظریه گراف، الگوریتمی مبتنی بر مسیر جهت مدل‌سازی ویژگی‌های توپولوژیکی شبکه توزیع ارائه شده است. در این بخش نحوه شکل‌گیری ریزشکبه‌ها، تعیین تعداد و محدوده سرویس‌دهی آنها به صورت محدودیت‌های خطی فرمول‌بندی شده است. قابلیت‌های کلیدزنی، نقاط مانور و امکان استفاده از آرایش‌های مختلف نیز مورد توجه قرار گرفته است. به منظور بهبود کارایی و افزایش سرعت پاسخ‌دهی الگوریتم ارائه شده، مفهوم اولین گره مشترک در این بخش معرفی شده است. در مرحله سوم نیز هدف اصلی بازیابی بارهایی با اولویت بالاتر خواهد بود. در این مرحله، مدل‌سازی ویژگی‌ها و محدودیت‌های الکتریکی شبکه توزیع مورد توجه قرار گرفته است. همچنین از منابع پاسخ‌گویی بار جهت برقراری تعادل بار و تولید در ریزشکبه‌های ایجاد شده، استفاده می‌شود. البته توجه شود که در این مقاله مراحل فوق به صورت یکپارچه در قالب یک مساله بهینه‌سازی خطی مدل شده است. روندنمای الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): روندنمای الگوریتم پیشنهادی

۳- مدل‌سازی ویژگی‌های توپولوژیکی

به منظور مدل‌سازی ویژگی‌های توپولوژیکی، ابتدا گراف شبکه با در نظر گرفتن تمامی گره‌ها و خطوط استخراج می‌شود. با توجه به در نظر گرفتن نقاط مانور، این گراف دارای حلقه نیز خواهد بود. مجموعه گره‌ها (شین) و یال‌های (خطوط) شبکه به ترتیب با نمادهای N و Λ نمایش داده شده است.

از این رو در این مقاله به منظور بازیابی بارها در شبکه‌های توزیع پس از وقوع رخدادهای شدید، مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ارائه شده است. در این مدل هدف اصلی، تامین حداکثری بارهای شبکه توزیع با در نظر گرفتن اولویت‌های آنها می‌باشد. در روش ارائه شده ویژگی‌های توپولوژیکی و الکتریکی شبکه توزیع به صورت یک پارچه در قالب یک مساله بهینه‌سازی خطی مدل خواهد شد. همچنین مدل‌سازی منابع کنترلی بار و بررسی محدودیت‌های بکارگیری آن در شبکه‌های توزیع نیز مورد بحث قرار گرفته است. در روش پیشنهادی، سعی شده با ارائه فرمول‌بندی جامعی، نواقص و کاستی‌های موجود در تحقیقات پیشین مرتفع شده و با تشکیل ریزشکبه‌ها از طریق عملیات کلیدزنی و مدیریت بهینه منابع تولید پراکنده و منابع پاسخ‌گویی بار، حداکثر بهره‌وری سیستم حاصل گردد. به طور خلاصه برتری‌ها و نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- ✓ در این مقاله مدلی جامع و خطی جهت شکل‌گیری ریزشکبه‌ها در شبکه‌های توزیع ارائه شده است که نسبت به استراتژی‌های موجود در این زمینه، از کارایی بالاتری جهت بازیابی بار پس از وقوع رخدادهای شدید برخوردار است.
- ✓ در این مقاله مشارکت منابع تولید پراکنده در شکل‌گیری ریزشکبه‌ها و تجمیع ظرفیت آنها جهت بازیابی بار در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر در این مقاله بر خلاف مقالات [۱۶ و ۱۷]، تعداد ریزشکبه‌ها از پیش تعیین شده نیست و بهترین آرایش با توجه میزان صدمات وارده شده و از حل مساله بهینه‌سازی استخراج می‌شود.
- ✓ در این مقاله محدودیت‌های ساختاری شبکه توزیع و قابلیت‌های کلیدزنی از طریق سکسیونرها و نقاط مانور به صورت موثرتری در روند بازیابی در نظر گرفته شده است.
- ✓ در این مقاله مشارکت سمت مصرف از طریق برنامه‌های کنترل بار نیز در روند شکل‌گیری بهینه ریزشکبه‌ها مدل شده است.

بخش‌های مختلف این مقاله نیز به صورت زیر می‌باشد. در بخش دوم طرح پیشنهادی به منظور بازیابی بارها در شبکه‌های توزیع پس از وقوع رخدادهای شدید تشریح شده است. در بخش سوم الی پنجم فرمول‌بندی مدل پیشنهادی در قالب یک مساله بهینه‌سازی خطی آورده شده است. در بخش ششم جهت بررسی صحت و کارایی الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شده است. در بخش هفتم نیز نتیجه‌گیری‌های مقاله آورده شده است.

۴- طرح پیشنهادی

طرح جامع بازیابی پیشنهادی را می‌توان به سه مرحله آماده‌سازی، بازیابی سیستم و بازیابی بار تقسیم‌بندی نمود. در مرحله اول، وضعیت امان‌های سیستم در اثر وقوع رخداد ارزیابی شده، منابع در دسترس

در صورتی که برای گره i متغیر $\alpha_{i,k}$ برابر یک باشد، بدین معناست که گره مربوطه به ریزشبه‌ای متصل شده که در آن k امین عضو از مجموعه N_{CDG} به عنوان واحد اصلی انتخاب شده است.

(ب) محدودیت اتصال گره ریشه

گره فرضی i در صورتی می‌تواند به ریزشبه k ام وصل شود که عضو k ام از مجموعه N_{CDG} (برای مثال واحد متصل به گره r) به عنوان واحد اصلی انتخاب شود. این محدودیت را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

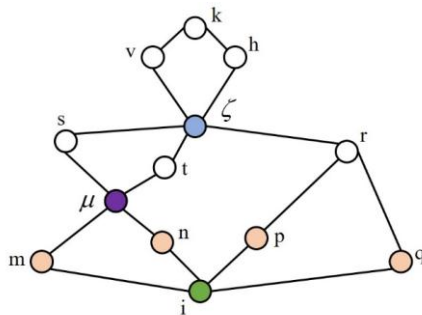
$$\alpha_{i,k} \leq \alpha_{r,k} \quad r = N_{CDG}(k), \quad \forall i \in N, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

در این رابطه $N_{CDG}(k)$ ، بیان‌گر عضو k ام از مجموعه N_{CDG} و نشان‌دهنده گره ریشه ریزشبه k ام (گره r ام) نیز می‌باشد.

(پ) محدودیت اتصال گره‌های والد

برای اتصال یک گره (برای مثال i) به یک ریزشبه (برای مثال k) بایستی یکی از گره‌های والد آن گره نیز به ریزشبه مذکور متصل باشد. منظور از گره والد، اولین گره موجود در مسیر بین گره i تا گره ریشه در ریزشبه k می‌باشد. برای مثال در شکل (۳) گره‌های n, m, p و q گره‌های والد گره i می‌باشند. برای یافتن گره‌های والد هر گره نیز از الگوریتم جستجوی اول سطح (BFS) استفاده شده است. بنا بر توضیحات فوق محدودیت اتصال گره‌های والد را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد.

$$\alpha_{i,k} \leq \sum_{\forall j \in \xi_{i,k}} \alpha_{j,k} \quad \forall i \in N, \quad \forall j \in \xi_{i,k}, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

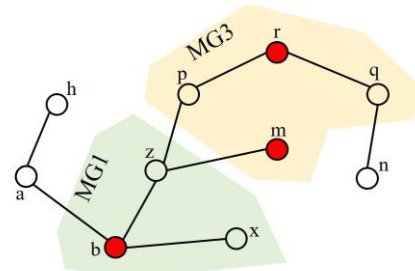


شکل (۳): گراف نمونه

(ت) محدودیت اتصالات و شعاعی بودن ریزشبه‌ها

برای تضمین این قید بایستی تنها یک مسیر فعال میان هر گره در یک ریزشبه و گره ریشه متناظر با آن ریزشبه موجود باشد. بدین منظور از ایده اولین گره مشترک استفاده شده است. در این روش، ابتدا قید اتصالات و شعاعی بودن میان یک گره و گره مشترک تضمین می‌شود و در ادامه این قید به مسیرهای میان گره مشترک و گره ریشه اعمال می‌شود. این عمل موجب کاهش حجم محاسبات و افزایش کارایی الگوریتم پیشنهادی خواهد شد. برای مثال در شکل (۳) بایستی تنها یک مسیر فعال میان گره i جهت اتصال به گره ریشه k وجود داشته باشد. با استفاده از روش فوق، ابتدا قید اتصالات و شعاعی بودن برای مسیرهای میان گره‌های i و k تضمین می‌شود و سپس این قیود به مسیرهای میان گره‌های k و اعمال می‌شود.

همچنین تشکیل ریزشبه‌ها منوط به وجود واحدهای تولید پراکنده با قابلیت کنترل فرکانس و ولتاژ خواهد بود. در هر ریزشبه بایستی حداقل به واحد تولیدی با چنین قابلیت‌ای موجود باشد. در صورت وجود چندین واحد با این قابلیت در یک ریزشبه، تنها یکی از این منابع به عنوان واحد اصلی (Master) آن ریزشبه انتخاب خواهد شد. مجموعه گره‌های متصل به تمامی منابع تولید پراکنده، N_{ADG} و مجموعه گره‌های متصل به واحدهای با قابلیت کنترل فرکانس نیز N_{CDG} است. همچنین k امین عضو از مجموعه N_{CDG} متناظر با ریزشبه k ام است. به عبارت بهتر ریزشبه k ریزشبه‌ای است که در آن واحد k ام از مجموعه N_{CDG} به عنوان واحد اصلی انتخاب شده است. همچنین در صورت انتخاب این واحد به عنوان واحد اصلی، گره متصل به آن نیز به عنوان گره ریشه در ریزشبه k ام شناخته می‌شود. به عبارت دیگر در صورت انتخاب هر یک از منابع موجود در مجموعه N_{CDG} به عنوان واحد اصلی، ریزشبه‌ای متناظر با شماره آن واحد تشکیل خواهد شد. برای مثال شبکه نشان داده شده در شکل (۲) دارای سه واحد اصلی است، از این رو مجموعه N_{CDG} نیز شامل سه عضو $\{b, m, r\}$ خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه در این شبکه، واحدهای یک و سه به عنوان واحدهای اصلی در نظر گرفته شده‌اند، از این رو تنها ریزشبه‌های یک و سه ($MG1$ و $MG3$) تشکیل شده و گره‌های b و r به عنوان گره‌های ریشه در نظر گرفته می‌شوند. ریزشبه دو ($MG2$) متناظر با واحد متصل به گره m نیز تشکیل نخواهد شد.



شکل (۲): محدوده سرویس‌دهی هر یک از ریزشبه‌ها

همچنین در هر ریزشبه بایستی ظرفیت کافی از منابع تولیدی جهت تامین بارها و برقراری تعادل مصرف و تولید وجود داشته باشد. در صورتی که ظرفیت کافی از منابع تولیدی یا تعداد کافی کلید یا سکسیونر جهت تشکیل ریزشبه‌هایی با چنین شرطی موجود نباشد، مصرف‌کنندگان موجود در آن بخش تامین نخواهند شد. برای مثال در شکل (۲) گره‌های a, n و h به هیچ ریزشبه‌ای متصل نیستند. محدودیت‌های بخش اول را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود.

(الف) محدودیت اتصال فقط به یک ریزشبه

با توجه به محدودیت‌های فنی و الکتریکی در شبکه‌های توزیع، هر گره (شین) حداکثر قابلیت اتصال به یکی از ریزشبه‌ها را خواهد داشت. بنابراین وضعیت اتصال هر گره را می‌توان به صورت زیر را مدل کرد.

$$\sum_{k=1}^{N_{MGs}} \alpha_{i,k} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (1)$$

تشکیل حلقه میان دو مسیر مذکور بایستی حداقل یکی از متغیرهای نشان‌دهنده وضعیت خطوط میان دو مسیر برابر صفر باشد.

$$\sum_{\ell=1}^{\zeta} \beta_{\ell} + \sum_{\ell'=1}^{\zeta'} \beta_{\ell'} \leq (NLine_{i-\zeta}^z + NLine_{i-\zeta'}^{z'} - 1) \quad (8)$$

$$\forall z \in APath_{i-\mu}, \forall \ell \in \Lambda_{i-\mu}^z, \forall \ell' \in \Lambda_{i-\mu}^{z'}$$

ث) محدودیت خطوط بین ریزشکبه‌ها

در صورتی که گره‌های دو سر یک خط به ریزشکبه‌های یکسانی متصل نباشند، بایستی متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت خط مذکور برابر صفر شود. این محدودیت با استفاده از رابطه زیر مدل شده است:

$$\beta_{\ell} < \alpha_{i,k} \square \alpha_{j,k} \quad \forall \ell \in \Lambda, \forall i, j \in \Psi_{\ell}, \forall k \in K \quad (9)$$

در این رابطه نماد $\square$ بیانگر عملیات منطقی XNOR می‌باشد. با تعریف متغیرهای کمکی $\chi'_{\ell,k}$ و $\chi_{\ell,k}$ می‌توان رابطه (۹) را با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) به صورت زیر خطی نمود.

$$\beta_{\ell} < \chi_{\ell,k} + \chi'_{\ell,k} \quad \forall \ell \in \Lambda, \forall k \in K \quad (10)$$

$$\begin{cases} \chi_{\ell,k} \leq \alpha_{i,k} \\ \chi_{\ell,k} \leq \alpha_{j,k} \\ \chi_{\ell,k} \geq \alpha_{i,k} + \alpha_{j,k} - 1 \end{cases}, \begin{cases} \chi'_{\ell,k} \leq 1 - \alpha_{i,k} \\ \chi'_{\ell,k} \leq 1 - \alpha_{j,k} \\ \chi'_{\ell,k} \geq 1 - \alpha_{i,k} - \alpha_{j,k} \end{cases} \quad (11)$$

ج) محدودیت فعال بودن وضعیت خطوط و شین‌ها

با توجه به اینکه امکان نصب سکسیونر و یا کلید کنترل از راه دور روی تمامی خطوط شبکه توزیع وجود ندارد، لازم است که محدودیت نبود کلید جهت تغییر وضعیت خطوط نیز مدل‌سازی شود. از طرفی در صورت آسیب دیدن خطوط در اثر وقوع پیشامد مورد مطالعه بایستی وضعیت غیرفعال برای آنها انتخاب شود. از این رو می‌توان وضعیت عملکرد یک خط را مطابق روابط (۱۲) مدل‌سازی نمود.

$$\begin{cases} \beta_{\ell} \leq HL_{\ell} \\ \beta_{\ell} \geq (1 - Sec_{\ell}) \times HL_{\ell} \end{cases} \quad \forall \ell \in \Lambda \quad (12)$$

همچنین از رابطه (۱۳) می‌توان جهت مدل‌سازی عدم اتصال شین‌های آسیب‌دیده به ریزشکبه‌ها استفاده کرد.

$$\alpha_{i,k} \leq HB_i \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (13)$$

در صورت آسیب دیدن یک شین ($HB_i = 0$)، شین مربوطه به هیچ یک از ریزشکبه‌ها وصل نخواهد شد.

۴- مدل‌سازی ویژگی‌های الکتریکی

روابط لازم جهت مدل‌سازی ویژگی‌های الکتریکی مساله مورد نظر را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

الف) محدودیت‌های بار

در این مقاله فرض شده است که بهره‌بردار سیستم با نصب ادواتی مانند پل‌های خورشیدی کوچک، کلیدهای کنترل از راه دور و یا بستن قراردادهای پاسخ‌گویی بار، امکان کنترل مستقیم بار در بعضی از شین‌ها را خواهد داشت.

جهت یافتن این گره مشترک بایستی ابتدا تک تک مسیرها شناسایی شده و گره‌های موجود در هر مسیر استخراج شود. این امر موجب افزایش زمان محاسبات خواهد شد. برای بهبود کارایی الگوریتم در این مقاله، از مفهوم جد مشترک (LCA) در نظریه گراف جهت استخراج گره مشترک استفاده شده است. در نظریه گراف و علوم کامپیوتر پایین‌ترین جد مشترک برای دو گره، پایین‌ترین راسی است که هر دو گره مذکور جزء نوادگان آن باشند [۱۸]. برای مثال در شکل (۳) گره ۳، اولین جد مشترک گره‌های q و p است. همچنین در این شکل i اولین جد مشترک میان گره‌های والد گره i است. جهت یافتن گره LCA نیز از روش ارائه شده در مرجع [۱۸] استفاده شده است. در این مقاله مساله یافتن یافتن گره LCA به حل مساله جستجوی حداقل بازه‌ای (RMQ) کاهش می‌یابد [۱۸].

جهت تضمین قید اتصالات میان گره‌های فرضی i و j نیز از روابط (۴) و (۵) استفاده می‌شود. این روابط بیان می‌نمایند که بایستی در صورت اتصال گره i به گره k ، بایستی حداقل یک مسیر فعال میان گره‌های i و j نیز موجود باشد.

$$\alpha_{i,k} \leq \alpha_{\zeta,k} \quad \zeta = LCA(\xi_{i,k}), \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{z=1}^{NumPath_{i-\zeta}} Path_{i-\zeta}^z \geq \alpha_{i,k} \quad \forall k \in K, \forall z \in APath_{i-\zeta} \quad (5)$$

همچنین وضعیت فعال بودن هر مسیر به صورت زیر به وضعیت فعال بودن خطوط موجود در آن مسیر وابسته است.

$$Path_{i-\zeta}^z = \prod_{\ell \in \Lambda_{i-\zeta}^z} \beta_{\ell} \quad \forall z \in AllPath_{i-\zeta} \quad (6)$$

با توجه به غیر خطی بودن رابطه (۶) از مجموعه روابط (۷) می‌توان جهت خطی‌سازی استفاده نمود.

$$\begin{cases} Path_{i-\zeta}^z \leq \beta_{\ell} \\ Path_{i-\zeta}^z \geq \sum_{\ell \in \Lambda_{i-\zeta}^z} \beta_{\ell} - (NLine_{i-\zeta}^z - 1) \end{cases} \quad (7)$$

در صورت وجود چندین مسیر میان گره‌های i و j باستی قید شعاعی بودن نیز اعمال گردد. بدین منظور ترکیب‌های دو تایی از مجموعه مسیرهای $APath_{i-\zeta}$ مورد بررسی قرار گرفته و قیود عدم تشکیل حلقه اضافه خواهد شد. مشابه حالت قبل، جهت افزایش سرعت محاسبات، از ایده اولین گره مشترک بین هر دو مسیر نیز استفاده خواهد شد. برای نمونه در شکل (۳)، مسیرهای z و z' به ترتیب شامل گره‌های $\{i, n, \mu, t, \zeta\}$ و $\{i, m, \mu, s, \zeta\}$ می‌باشند. ابتدا اولین گره مشترک بین دو مسیر مذکور جهت رسیدن از گره i به گره j (در این مثال گره μ) شناسایی شده و در ادامه جهت عدم تشکیل حلقه از رابطه (۸) استفاده می‌شود. به عبارت دیگر در این حالت نیز مشابه روند قبلی، بررسی حلقه‌ها تنها تا گره μ انجام می‌شود و وجود حلقه بعد از گره μ ، هنگام بررسی مسیرهای موجود میان گره‌های μ و j مورد توجه قرار خواهد گرفت. رابطه (۸) بیان می‌کند که جهت عدم

(ج) محدودیت زاویه ولتاژ شین‌ها

$$\begin{cases} -\alpha_{i,k} \times \delta^{Max} \leq \delta_{i,k} & \forall i \in N, \forall k \in K \\ \delta_{i,k} \leq \alpha_{i,k} \times \delta^{Max} & \forall i \in N, \forall k \in K \end{cases} \quad (21)$$

$$-(1-\alpha_{i,k}) \times \delta^{Max} \leq \delta_{i,k} \leq (1-\alpha_{i,k}) \times \delta^{Max} \quad (22)$$

رابطه (۲۱) محدودیت حداقل و حداکثر زاویه ولتاژ شین را بیان می‌کند. رابطه (۲۲) نیز تنها برای شین‌های متصل به منابع تولید پراکنده با قابلیت کنترل فرکانس اعمال می‌شود. این رابطه بیان می‌کند که در صورت انتخاب منبع k ام به عنوان واحد اصلی، زاویه ولتاژ شین متصل به آن (گره i) در مقدار صفر کنترل می‌شود.

(چ) محدودیت‌های پخش بار

در این مقاله از روش مذکور در مرجع [۱۹] جهت انجام محاسبات پخش بار در شبکه‌های توزیع استفاده شده است. در این مرجع از تقریب خطی قابل قبولی جهت محاسبه اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها استفاده شده است. در فرایند خطی‌سازی انجام شده در مقاله مذکور ارتباط میان توان‌های اکتیو و اندازه ولتاژ شین و ارتباط میان توان‌های راکتیو و زاویه ولتاژ شین‌های شبکه توزیع نیز مدل شده است.

$$F1_\ell = \frac{r_\ell}{r_\ell^2 + x_\ell^2}, \quad F2_\ell = \frac{x_\ell}{r_\ell^2 + x_\ell^2} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} flow_\ell^P &= Zflow_\ell^P + \sum_{\forall k \in K} [\delta_{j,k} - \delta_{i,k}] \times F2_\ell \\ &+ \sum_{\forall k \in K} [V_{j,k} - V_{i,k}] \times F1_\ell \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} flow_\ell^Q &= Zflow_\ell^Q + \sum_{\forall k \in K} [\delta_{i,k} - \delta_{j,k}] \times F1_\ell \\ &+ \sum_{\forall k \in K} [V_{j,k} - V_{i,k}] \times F2_\ell \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{cases} -(1-\beta_\ell) \times \text{BigM} \leq Zflow_\ell^P \leq (1-\beta_\ell) \times \text{BigM} \\ -(1-\beta_\ell) \times \text{BigM} \leq Zflow_\ell^Q \leq (1-\beta_\ell) \times \text{BigM} \end{cases} \quad (26)$$

روابط (۲۳) الی (۲۵) معادلات خطی شده پخش بار در شبکه‌های توزیع [۱۹] را نشان می‌دهد. همچنین فرض شده است جهت توان انتقالی مثبت از شینی با شماره بزرگ‌تر به سمت شینی با شماره کوچک‌تر می‌باشد. روابط (۲۶) نیز به ترتیب جهت صفر کردن توان‌های اکتیو و راکتیو خطوطی که متغیر β_ℓ آن‌ها صفر است استفاده می‌شود.

۵- تابع هدف

تابع هدف مساله بهینه‌سازی، به صورت رابطه (۲۷) می‌باشد. توان‌مندی بازیابی سیستم را نیز می‌توان مطابق رابطه (۲۸) از روی نسبت مجموع بارهای بازیابی شده در فیدرهایی که دچار قطعی شده‌اند، به مجموع کل بارهای متاثر شده ناشی از رخداد (با در نظر گرفتن اولویت‌ها) به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\begin{cases} P_{i,k}^{L,s} = \alpha_{i,k} \times \text{PLoad}_i - P_{i,k}^{LC,s} \\ Q_{i,k}^{L,s} = \alpha_{i,k} \times \text{QLoad}_i - \tan(\varphi_i) \times P_{i,k}^{LC,s} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{i,k}^{LC,s} \leq \alpha_{i,k} \times P_i^{LC,Con} & \forall k \in K, \forall i \in \bar{N} \\ \sum_{\forall k \in K} P_{i,k}^{LC,s} = \sum_{d=1}^D \sigma_{i,d}^{L,s} \times P_{i,d}^b & \forall i \in \bar{N} \\ \sum_{d=1}^D \sigma_{i,d}^{L,s} \leq 1 & \forall i \in \bar{N} \end{cases} \quad (15)$$

رابطه (۱۴) میزان توان‌های اکتیو و راکتیو برنامه‌ریزی شده برای هر یک از بارها با توجه به قابلیت‌های کنترل بار را نشان می‌دهد. همچنین بیان می‌کند که تنها در صورت اتصال بار مربوطه به یکی از ریزشکبه‌ها می‌توان از قابلیت کنترل بار در محدوده مجاز آن استفاده نمود. مجموعه روابط (۱۵) نیز توان‌مندی‌های کنترل بار و محدودیت انتخاب بلوک‌های مربوطه را نشان می‌دهد.

(ب) محدودیت‌های منابع تولید پراکنده

$$\begin{cases} P_{m,k}^{DG,s} \leq \alpha_{r,k} \times P_m^{DG,Max} \\ \alpha_{r,k} \times Q_m^{DG,Min} \leq Q_{m,k}^{DG,s} \leq \alpha_{r,k} \times Q_m^{DG,Max} \end{cases} \quad (16)$$

$\forall m \in M, \forall k \in K, \quad r = N_{ADG}(m)$

رابطه (۱۶) قید حداکثر تولید توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهند. در این رابطه، r نیز شماره گره متصل به منبع تولید پراکنده m است.

(پ) محدودیت توان عبوری از خطوط

این قید را می‌توان به صورت رابطه (۱۷) فرمول‌بندی نمود. این روابط به ازای هر خط معتبر خواهد بود.

$$\begin{cases} -\beta_\ell \times flow_\ell^{P,Max} \leq flow_\ell^P \leq \beta_\ell \times flow_\ell^{P,Max} \\ -\beta_\ell \times flow_\ell^{Q,Max} \leq flow_\ell^Q \leq \beta_\ell \times flow_\ell^{Q,Max} \end{cases} \quad (17)$$

(ت) قید تعادل در هر گره

$$\begin{cases} \sum_{\forall k \in K} [P_{m,k}^{DG,s} - P_{i,k}^{L,s}] = \sum_{\ell \in \theta L(i)} flow_\ell^P & \forall i \in N \\ \sum_{\forall k \in K} [Q_{m,k}^{DG,s} - Q_{i,k}^{L,s}] = \sum_{\ell \in \theta L(i)} flow_\ell^Q & \forall i \in N \end{cases} \quad (18)$$

در این روابط m شماره منبع تولید پراکنده متصل به گره i است.

(ث) محدودیت‌های ولتاژ گره‌ها

$$\begin{cases} \alpha_{i,k} \times 0.95 \leq V_{i,k} & \forall i \in N, \forall k \in K \\ V_{i,k} \leq \alpha_{i,k} \times 1.05 & \forall i \in N, \forall k \in K \end{cases} \quad (19)$$

$$V_{i,k} = \alpha_{i,k} \times V_k^{DG,set} \quad i = N_{CDG}(k) \quad (20)$$

رابطه (۱۹) محدودیت حداقل و حداقل ولتاژ شین را بیان می‌کند. رابطه (۲۰) نیز بیان می‌کند در صورتی که منبع تولید پراکنده k ام به عنوان واحد اصلی انتخاب شود، ولتاژ گره متصل به آن منبع نیز در مقدار مبنا تنظیم می‌شود.

جهت تشکیل ریزشبکه‌ها بوده و از این رو حداکثر تعداد ریزشبکه‌های قابل شکل‌گیری نیز برابر ۷ خواهد بود. اولویت تامین بارها نیز برابر یک می‌باشد. در این تست دو رخداد وقوع سیل و حمله تروریستی به پست فوق توزیع مورد مطالعه قرار گرفته است. در رخداد اول، فرض شده شین‌های ۲، ۳، ۴، ۱۰، ۶۳، ۶۴، ۶۵ و ۸۹ در وضعیت خراب می‌باشند. در این رخداد ارتباط فیدرهای شماره یک و دو از پست فوق توزیع قطع شده و تنها فیدر شماره ۳ به شبکه بالادست متصل می‌باشد. در این رخداد شبکه بالادست نیز به صورت یک منبع تولید پراکنده متصل به شین یک در نظر گرفته می‌شود. در رخداد دوم تنها شین شماره یک در وضعیت خراب بوده و ارتباط هر سه فیدر با شبکه بالادست قطع خواهد شد

جدول (۱): اطلاعات واحدهای تولید پراکنده

Unit	Bus	Cap.	$Q^{\max}$	$Q^{\min}$
DG1	۱۷	۸۰۰	۶۰۰	-۶۰۰
DG2	۲۴	۱۰۰۰	۸۰۰	-۸۰۰
DG3	۵۱	۹۰۰	۸۰۰	-۸۰۰
DG4	۵۹	۱۲۰۰	۱۰۰۰	-۱۰۰۰
DG5	۶۷	۱۰۰۰	۸۰۰	-۸۰۰
DG6	۷۶	۱۱۰۰	۸۰۰	-۸۰۰
DG7	۱۰۵	۱۵۰۰	۱۲۰۰	-۱۲۰۰
DG8	۷	۲۰۰	۱۵۰	-۱۵۰
DG9	۳۳	۳۰۰	۲۰۰	-۲۰۰
DG10	۴۳	۳۰۰	۲۰۰	-۲۰۰
DG11	۸۸	۲۰۰	۱۰۰	-۱۰۰
DG12	۱۰۳	۵۰۰	۳۰۰	-۳۰۰
DG13	۱۱۳	۳۰۰	۱۵۰	-۱۵۰
DG14	۱۱۷	۳۰۰	۱۵۰	-۱۵۰

$$Max : ObjF = \sum_{i \in N} \left(Pro_i^L \times \sum_{k \in K} P_{i,k}^{L,s} \right) \quad (27)$$

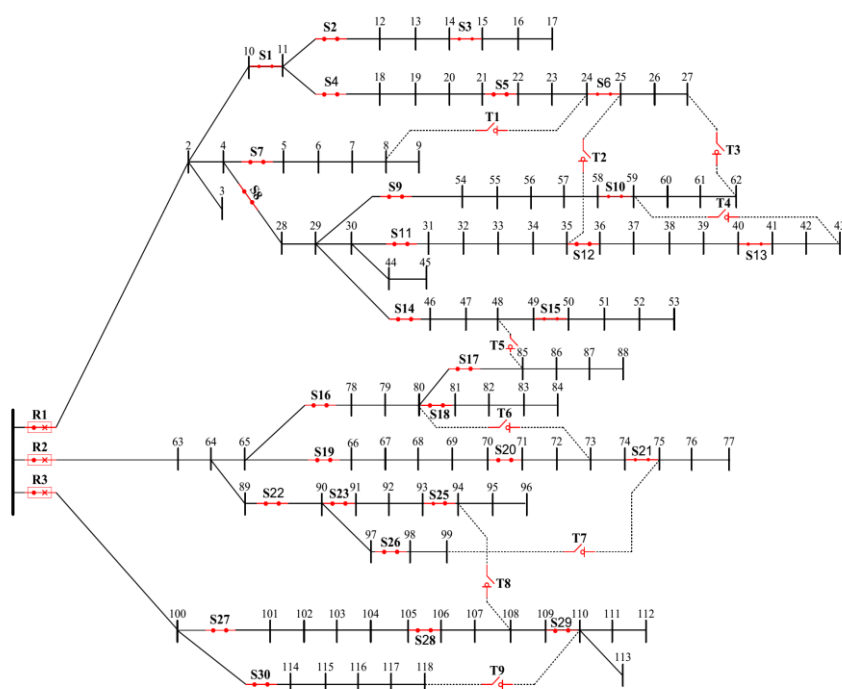
$$Recovery = \frac{ObjF}{\sum_{i \in N_{Interrupted}} (Pro_i^L \times PLoad_i)} \quad (28)$$

۶- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش کارایی الگوریتم پیشنهادی به منظور تشکیل ریزشبکه‌ها و همچنین بهره‌برداری از ادوات موجود در شبکه توزیع پس از وقوع رخداد شدید مورد بررسی قرار گرفته است. از بسته نرم‌افزاری IBM ILOG CPLEX 12.6 و شبیه‌سازی بر روی سیستمی با ویژگی‌های Core(TM) i7، 4 GHz فرکانس، 16 GB RAM جهت حل مساله خطی مورد نظر استفاده شده است. میزان حد آستانه دقت محاسبات نیز برابر ۰/۰۱ درصد در نظر گرفته شده است.

۶-۱- شبکه تست اول

شبکه توزیع ۱۱ کیلوولت نشان داده شده در شکل (۴) که دارای سه فیدر، ۱۱۸ شین، ۳ کلید، ۲۹ سکسیونر و ۹ نقطه مانور می‌باشد؛ به عنوان شبکه تست اول انتخاب شده است. کل توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی این شبکه به ترتیب برابر ۲۲/۷۱ مگاوات و ۱۷/۰۴ مگاوات آمپر می‌باشد. اطلاعات مربوط به میزان مصارف در شین‌های شبکه و پارامترهای خطوط نیز در مرجع [۲۱] آورده شده است. همچنین اطلاعات مربوط به مکان نصب و ظرفیت منابع تولید پراکنده در جدول (۱) آورده شده است. در این شبکه فرض شده ۷ واحد DG1 الی DG7 از ۱۴ واحد تولید پراکنده موجود دارای قابلیت کنترل فرکانس



شکل (۴): دیاگرام تک خطی شبکه تست اول

۶-۱-۱- بررسی تاثیر قابلیت های کلیدزنی

در این حالت تاثیر قابلیت های کلیدزنی و استفاده از نقاط مانور بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، روش های مطرح شده در مقالات [۱۶] و [۱۷] نیز بر روی شبکه تست پیاده سازی شده اند. جدول (۲) عملکرد سیستم مورد مطالعه در هر دو رخداد را نشان می دهد. شاخص بازیابی، توان مندی سیستم در بازیابی بارها در ناحیه متاثر شده (در رخداد اول فیدرهای شماره یک و دو و در رخداد دوم کل سیستم) است.

در این سیستم، در رخداد اول حدود ۱۹ درصد از منافع حاصل از تامین بارها، با شکل گیری ریزش بکه ها در فیدرهای یک و دو قابل بازیابی می باشد. با بکارگیری نقاط مانور این شاخص به مقدار ۲۹ درصد افزایش یافته است که نشان دهنده اهمیت این قابلیت در بهبود فرایند بازیابی می باشد. این مقادیر در رخداد دوم به ترتیب برابر ۲۰ و ۳۰ درصد بوده است. همچنین مطابق با جداول (۳) و (۴) نتیجه می شود که روش پیشنهادی در این مقاله از کارایی بالاتری جهت بازیابی بار نسبت به روش های موجود در [۱۶] و [۱۷] برخوردار است.

جدول (۲): بررسی تاثیر قابلیت های کلیدزنی بر عملکرد سیستم

	رخداد اول		رخداد دوم	
	بدون مانور	با مانور	بدون مانور	با مانور
مدت زمان حل (sec)	۰/۱۱۵۴	۰/۶۹۵۳	۰/۱۲۹۹	۷/۴۷۳۲
تعداد ریزش بکه ها	۴	۴	۵	۴
منابع اصلی	۲،۳،۴،۶	۱،۲،۳،۶	۱،۲،۳،۶،۷	۶،۷،۳،۱
تابع هدف	۳۲۵۷/۳	۵۱۸۶/۰۱۲	۴۳۷۶/۱	۶۶۸۷/۴
شاخص بازیابی	۰/۱۸۴۴	۰/۲۹۳۶	۰/۱۹۲۷	۰/۲۹۴۵

در این مراجع با توجه به اینکه فرض شده تعداد ریزش بکه ها معلوم بوده و هر یک از منابع تولید پراکنده به عنوان منبع اصلی در نظر گرفته می شوند، طرح پیشنهادی به منظور تشکیل ریزش بکه ها بهینه نخواهد بود. به عبارت بهتر در این مقالات، مشارکت منابع اصلی در شکل گیری ریزش بکه ها در نظر گرفته نشده و از این رو بهره مندی حداکثری از قابلیت های موجود امکان پذیر نخواهد بود.

جدول (۳): بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در رخداد اول

	بدون مانور		با مانور	
	مرجع [۱۶]	الگوریتم پیشنهادی	مرجع [۱۷]	الگوریتم پیشنهادی
تابع هدف	۲۵۲۰/۷	۳۲۵۷/۳	۴۲۵۱/۶	۵۱۸۶/۰۱
شاخص بازیابی	۰/۱۴۲۷	۰/۱۸۴۴	۰/۲۴۰۷	۰/۲۹۳۶

جدول (۴): بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در رخداد دوم

	بدون مانور		با مانور	
	مرجع [۱۶]	الگوریتم پیشنهادی	مرجع [۱۷]	الگوریتم پیشنهادی
تابع هدف	۳۶۳۹/۵	۴۳۷۶/۱	۵۷۵۳/۲	۶۶۸۷/۴
شاخص بازیابی	۰/۱۶۰۳	۰/۱۹۲۷	۰/۲۵۳۳	۰/۲۹۴۵

۶-۱-۲- بررسی تاثیر قابلیت های کنترل بار

در این حالت برای بارهای متصل به شین های ۲۰، ۳۲، ۳۹، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۵۸، ۷۱، ۷۴، ۸۵، ۸۶، ۹۱، ۱۰۱، ۱۰۲، ۱۰۳، ۱۰۷، ۱۰۹ و ۱۱۳ قابلیت کنترل بار در پنج سطح در نظر گرفته شده است. این بارها دارای پیک مصرف بالای ۴۰۰ کیلووات می باشند. فرض شده که بهره بردار سیستم با نصب ادواتی از جمله کلیدهای کنترل از راه دور قابلیت کنترل بارهای مذکور به صورت پله های ۱۰۰ کیلوواتی را دارد. در پله پنجم نیز کل بار قطع خواهد شد. جدول (۵) عملکرد سیستم مورد مطالعه در هر دو رخداد را نشان می دهد. در این حالت قابلیت کلیدزنی از طریق نقاط مانور نیز در نظر گرفته شده است.

جدول (۵): بررسی تاثیر قابلیت های کنترل بار بر عملکرد سیستم

	رخداد اول	رخداد دوم
مدت زمان حل (sec)	۱/۴۱۰۶	۱۵/۷۹۷
تعداد ریزش بکه ها	۲	۵
منابع اصلی	۴، فیدر سوم	۲،۳،۴،۵،۷
تابع هدف	۷۹۷۹/۱	۹۳۱۶/۵
شاخص بازیابی	۰/۵۷۳۶	۰/۴۱۰۲

از نتایج قابل استنباط است که در این حالت با تشکیل تعداد ریزش بکه های کمتری بارهای بیشتری بازیابی شده اند. در این حالت با بهره گیری از توان مندی های کنترل بار و در نتیجه مدیریت موثرتر منابع، شاخص بازیابی سیستم در رخدادهای اول و دوم به ترتیب حدود ۲۷ و ۱۱ درصد افزایش داشته است که نشان دهنده اهمیت نقش منابع سمت مصرف در بهبود بازیابی می باشد. دلیل این افزایش چشم گیر نیز این است که در این حالت بهره مندی حداکثری از منابع تولیدی میسر شده است. از طرفی با توجه به مدل سازی متغیرهای کنترلی بار و افزایش تعداد متغیرها و محدودیت های مساله، زمان حل به ازاء هر دو رخداد افزایش یافته است. با توجه به ابعاد شبکه توزیع مورد مطالعه و در نظر گرفتن هم زمان قابلیت های مختلف در فرایند ارزیابی، زمان بدست آمده کاملاً منطقی بوده و از این رو، الگوریتم پیشنهادی جهت ارائه طرح بازیابی نیز کاربردی خواهد بود.

۶-۲- شبکه تست دوم

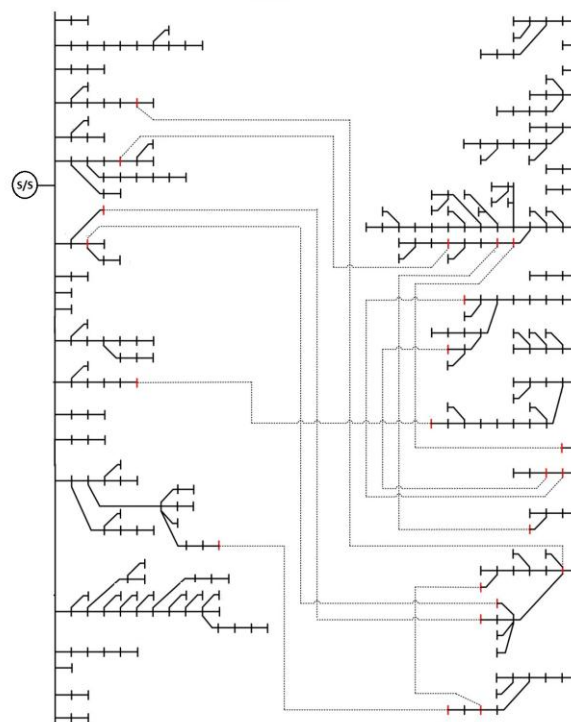
در این قسمت کارایی الگوریتم پیشنهادی و روش های مطرح شده در مقالات [۱۶] و [۱۷] با انجام شبیه سازی بر روی یک شبکه تست بزرگ تر مورد مقایسه قرار گرفته است. شبکه توزیع ۶ کیلوولت نشان داده شده در شکل (۵) دارای ۲۷۴ شین، ۳۷ فیدر، ۶۵ سکسیونر و ۱۱ نقطه مانور می باشد. کل توان های مصرفی این شبکه نیز به ترتیب برابر ۶۲/۰۲ مگاوات و ۴۲/۷۹ مگاوات آمپر راکتیو می باشد. همچنین این شبکه دارای ۱۰ منبع تولید پراکنده با قابلیت کنترل فرکانس، ظرفیت ۵ مگاوات آمپر و ضریب توان ۰/۸ است. اطلاعات مربوط به میزان مصارف در شین های شبکه، پارامترهای خطوط و محل نصب منابع تولید پراکنده در مرجع [۲۲] و [۲۳] آورده شده است. همچنین فرض شده به ازای وقوع آتش سوزی در پست فوق توزیع اصلی، ارتباط

بازیابی بار نسبت به روش‌های قبلی داشته است. از طرفی در این مقاله تاثیر کمبود تعداد ادوات کلیدزنی و محدودیت‌های مربوطه نیز مورد بررسی قرار گرفت؛ موضوعی که در بیشتر مقالات پیشین نادیده گرفته شده است. مدل‌سازی این نوع محدودیت‌ها، بررسی عملکرد سیستم‌های توزیع واقعی در شرایط آب و هوایی سخت را میسرتر می‌نماید. همچنین در این مقاله برای اولین بار بحث مدیریت سمت مصرف در روند شکل‌گیری ریزشکبه‌ها در نظر گرفته شد و نشان داده شد که بهره‌گیری از روش‌های مذکور می‌تواند عملکرد سیستم در این شرایط را بهبود دهد و بازیابی موثرتر آن را منجر شود.

فهرست علائم و نشانه‌ها

N	مجموعه گره‌ها (شین) شبکه
Λ	مجموعه یال‌های (خطوط) شبکه
K	مجموعه ریزشکبه‌های قابل تشکیل
$\bar{N}$	مجموعه بارهای با قابلیت کنترل بار
M	مجموعه تمامی منابع تولید پراکنده
Ψ_ℓ	مجموعه گره‌های دو سر خط ℓ
N_{ADG}	مجموعه گره‌های متصل به تمامی منابع تولید پراکنده
N_{CDG}	مجموعه گره‌های متصل به واحد با قابلیت کنترل فرکانس
$\zeta_{i,k}$	مجموعه گره‌های والد گره i جهت اتصال به ریزشکبه k
$\theta L(i)$	مجموعه خطوط متصل به گره i
$\Lambda_{i-\zeta}^Z$	مجموعه خطوط در مسیر Z میان گره‌های i و ζ
$\Lambda_{i-\mu}^Z$	مجموعه خطوط در مسیر Z میان گره‌های i و μ
$\Lambda_{i-\mu}^{Z'}$	مجموعه خطوط در مسیر Z' میان گره‌های i و μ
N_{Int}	مجموعه بارهایی که دچار خاموشی شده‌اند
$APath_{i-\zeta}$	مجموعه مسیرهای موجود میان گره‌های i و ζ
N_{MGs}	حداکثر تعداد ریزشکبه‌های قابل تشکیل
D	تعداد بلوک‌های کنترل بار
$P_{i,d}^b$	بلوک‌های کنترل بار i
ζ	اولین جد مشترک میان والدهای گره i
HL_ℓ	نشان‌دهنده وضعیت سلامت خط ℓ پس از وقوع رخداد
Sec_ℓ	نشان‌دهنده وجود کلید جهت تغییر وضعیت بر روی خط ℓ
HB_i	نشان‌دهنده وضعیت سلامت شین i پس از وقوع رخداد
$BigM$	عددی بسیار بزرگ
Pro_i^L	اولویت بار i جهت تامین شدن
r_ℓ, x_ℓ	مقاومت و راکتانس خط ℓ
$NLine_{i-\zeta}^Z$	تعداد خطوط در مسیر Z میان گره‌های i و ζ
$NLine_{i-\mu}^Z$	تعداد خطوط در مسیر Z میان گره‌های i و μ
$NLine_{i-\mu}^{Z'}$	تعداد خطوط در مسیر Z' میان گره‌های i و μ
$PLoad_i$	میزان توان اکتیو مصرفی بار i
$QLoad_i$	میزان توان راکتیو مصرفی بار i

فیدرها با شبکه بالادست امکان‌پذیر نمی‌باشد. جدول (۶) عملکرد سیستم مورد مطالعه در رخداد مذکور را نشان می‌دهد.



شکل (۵): دیاگرام تک خطی شبکه تست دوم

جدول (۶): مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی

	بدون مانور		با مانور	
	مرجع [۱۶]	الگوریتم پیشنهادی	مرجع [۱۷]	الگوریتم پیشنهادی
تابع هدف	۲۲۷۴۷/۶۹	۲۷۰۴۶/۹۲	۳۲۴۶۱/۲۶	۳۵۴۷۸/۳۲
بازیابی	۰/۳۶۶۷	۰/۴۳۶۱	۰/۵۲۳۴	۰/۵۷۰۲

در این سیستم با بکارگیری الگوریتم پیشنهادی در حالت بدون استفاده از نقاط مانور، حدود ۴۴ درصد بارها از طریق شکل‌گیری ریزشکبه‌ها قابل بازیابی می‌باشد؛ در حالی که روش مطرح شده در مرجع [۱۶] تنها بازیابی ۳۷ درصد از بارها را تضمین می‌نماید. در حالت استفاده از نقاط مانور نیز شاخص‌های بازیابی در روش پیشنهادی برابر ۵۷ درصد بوده در حالی که این شاخص با بکارگیری روش مطرح در مرجع [۱۷] تنها ۵۲ درصد می‌باشد. این نتایج کارایی بالاتر روش پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی خطی به منظور تشکیل ریزشکبه‌ها جهت بازیابی بار پس از وقوع رخداد شدید در شبکه توزیع ارائه شده است. در این مقاله سعی شده است با بکارگیری روشی مبتنی بر مسیر، هماهنگی واحدهای تولیدی جهت تشکیل ریزشکبه‌ها و تعیین بهینه آن‌ها به عنوان واحدهای اصلی به طور مناسبی مدل‌سازی شود. نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهادی با تجمیع ظرفیت این منابع و مشارکت بهینه‌تر آن‌ها در شکل‌گیری ریزشکبه‌ها، عملکرد بهتری در روند

- Proc. IEEE Power Eng.Soc. Gen. Meeting—Convers. Del. Electr. Energy 21st Century, 2008.
- [10] Resende F. O., Gil N. J., and Lopes J. A. P., "Service restoration on distribution systems using Multi-MicroGrids," Eur. Trans. Electr. Power, Vol. 21, No. 2, pp. 1327–1342, Mar. 2011.
- [11] Colson C. M., Nehrir M. H., and Gunderson R. W., "Distributed multiagent microgrids: A decentralized approach to resilient power system self-healing," in Proc. 4th Int. Symp. Resilient Control Syst., 2011.
- [12] Hurtt J., Mili L., "Residential microgrid model for disaster recovery operations," in Proc. IEEE Grenoble Conf., pp. 1–6, 2013.
- [13] Farzin H., Fotuhi-Firuzabad M., Moeini-Aghaie M., "Enhancing Power System Resilience Through Hierarchical Outage Management in Multi-Microgrids," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 6, pp. 2869–2879, Nov. 2016.
- [14] Gao H., Chen Y., Xu Y., "Resilience-Oriented Critical Load Restoration Using Microgrids in Distribution Systems," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 6, pp. 2837–2848, Nov. 2016.
- [15] Chen B., Chen C., Wang J., Butler-Purpy K., "Sequential Service Restoration for Unbalanced Distribution Systems and Microgrids," in IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PP, No. 99, pp. 1–1.
- [16] Chen C., Wang J., Qiu F., "Resilient Distribution System by Microgrids Formation After Natural Disasters," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 2, pp. 958–966, March 2016.
- [17] Ding T., Lin Y., Bie Z., Chen C., "A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration," Applied Energy, Vol. 199, , pp. 205–216, 2017.
- [18] Fischer J., Heun V. Theoretical and Practical Improvements on the RMQ-Problem, with Applications to LCA and LCE. Combinatorial Pattern Matching 2006; 4009. Springer, Berlin.
- [19] Yuan H., Li F., Wei Y., "Novel Linearized Power Flow and Linearized OPF Models for Active Distribution Networks with Application in Distribution LMP," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. PP, No. 99, pp. 1–1.
- [20] IBM ILOG CPLEX 12.6 <http://www.cplex.com>; 2015.
- [21] Zhang D., Fu Z., Zhang L., "An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems," Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 5, 2007.
- [22] Selim, K., Gorpnich A., "Economical optimization of capacitor placement for large-scale practical distorted distribution network," Electrical Power Quality and Utilisation Journal Vol. 16, pp. 21–29, 2013.
- [23] https://www.dropbox.com/s/v3ha3w4hj8e4p9j/274_bus_Data.xlsx?dl=0
- $V_k^{DG,set}$ ولتاژ مبنای منبع تولید پراکنده m
- $NumPath_{i-\zeta}$ تعداد مسیرهای موجود میان گره‌های i و ζ
- $\alpha_{i,k}$ متغیری باینری نمایان گر وضعیت اتصال گره i به ریزشبه k
- β_ℓ متغیری باینری نمایان گر وضعیت فعال بودن خط ℓ
- $V_{i,k}$ ولتاژ شین i در ریزشبه k
- $\delta_{i,k}$ زاویه ولتاژ شین i در ریزشبه k
- $\sigma_{i,d}^{L,s}$ متغیر باینری نشان دهنده انتخاب بلوک d ام
- $P_{i,k}^{LC,s}$ کاهش بار برنامه ریزی شده مصرف کننده i در ریزشبه k
- $Path_{i-\zeta}^z$ وضعیت فعال بودن مسیر z میان گره‌های i و ζ
- $\chi'_{\ell,k}, \chi_{\ell,k}$ متغیرهای کمکی
- $Q_{i,k}^{L,s}, P_{i,k}^{L,s}$ توان های اکتیو و راکتیو برنامه ریزی شده جهت تامین مصرف کننده i در ریزشبه k
- $Q_{m,k}^{DG,s}, P_{m,k}^{DG,s}$ توان های اکتیو و راکتیو برنامه ریزی شده منبع تولید پراکنده m در ریزشبه k
- $flow_\ell^Q, flow_\ell^P$ توان های اکتیو و راکتیو عبوری از خط ℓ
- $Zflow_\ell^Q, Zflow_\ell^P$ متغیرهای کمکی جهت صفر کردن توان های اکتیو و راکتیو خطوطی که باز هستند

مراجع

- [1] Aki H., "Demand-Side Resiliency and Electricity Continuity: Experiences and Lessons Learned in Japan," in Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 7, pp. 1443–1455, July 2017.
- [2] Gholami A., Aminifar F. and Shahidehpour M., "Front Lines against the Darkness: Enhancing the Resilience of the Electricity Grid through Microgrid Facilities," in IEEE Electrification Magazine, Vol. 4, No. 1, pp. 18–24, March 2016.
- [3] Panteli M., Mancarella P., "Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies," Electric Power Systems Research, Vol. 127, 2015.
- [4] Adibi M. M., Fink L. H., "Power system restoration planning," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 9, No. 1, pp. 22–28, Feb. 1994.
- [5] Lindemeyer D., Dommel H. W., Adibi M. M., "Power system restoration—A bibliographical survey," Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 23, No. 3, pp. 219–227, Mar. 2001.
- [6] Bie Z., Lin Y., Li G., "Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience," in Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 7, pp. 1253–1266, July 2017.
- [7] Chen C., Wang J., Ton D., "Modernizing Distribution System Restoration to Achieve Grid Resiliency Against Extreme Weather Events: An Integrated Solution," in Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 7, pp. 1267–1288, July 2017.
- [8] Tsikalakis A., Hatziar N., "Operation of microgrids with demand side bidding and continuity of supply for critical loads," Eur. Trans. Electr. Power, Vol. 21, No. 2, pp. 1238–1254, Mar. 2011.
- [9] Rahman S., "Framework for a resilient and environment-friendly microgrid with demand-side participation," in