

خودترمیمی بهینه شبکه‌های توزیع هوشمند مبتنی بر گراف درخت پوشا و بهبود قابلیت اطمینان شبکه

حسین نصرت پور^۱ علی زنگنه^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران

hosseinnosratpour@gmail.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران

a.zangeneh.srttu.edu

چکیده: در این مقاله یک روش خودترمیمی و بازیابی شبکه توزیع هوشمند مبتنی بر نظریه گراف و برش‌های اساسی ارایه شده است. در نظریه گراف پیشنهادی به‌منظور خودترمیمی شبکه پس از وقوع خطا، شبکه بالادست و ریزشبکه‌های موجود همگی به‌صورت یک گره مشترک مادر معادل‌سازی می‌شوند. سپس با زدن برش اساسی روی خطی که دچار خطا شده، خطوط مانوری که در مسیر برش اساسی قرار می‌گیرند به‌عنوان راه‌حل بازیابی برای شبکه‌های منتخب انتخاب می‌شوند. پس از انتخاب شبکه‌های منتخب با حداقل تعداد کلیدزنی، با انجام یک پخش بار سه فاز نامتعادل اطمینان می‌شود که ساختار جدید شبکه محدودیتی را نقض نمی‌کند. در صورت نقض محدودیت‌های فنی شبکه، طرح‌های منتخب با کلیدزنی متفاوت و یا افزایش تعداد کلیدزنی بررسی و در نهایت طرحی که شرایط بارپذیری بیشتر و نامتعادلی و لتاژ کمتری را در شبکه موجب می‌شود، انتخاب می‌گردد. مدل پیشنهادی در دو حالت حضور و عدم حضور ریزشبکه‌ها بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB و بر روی یک سیستم توزیع نمونه عملکرد خوب مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. استفاده از نظریه گراف در مقایسه با روش‌های جستجوی تصادفی موجب کاهش تعداد کلیدزنی و زمان اجرای برنامه شده است.

کلمات کلیدی: بازیابی سیستم توزیع، بازیابی بار، نظریه گراف، جستجوی درخت پوشا، خودترمیمی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی زنگنه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - لویزان - خیابان شهید شعبانلو - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق

بازیابی می‌کنند. مرجع [۹] از یک روش دومرحله‌ای برای بازیابی بارهای قطع شده استفاده می‌کند. این مرجع در مرحله اول بخش آسیب‌دیده را به ریزشبه‌های کوچک تقسیم کرده، سپس در مرحله دوم به پخش بار در ریزشبه‌ها می‌پردازد. مرجع [۱۰] نیز بخش آسیب‌دیده را به ریزشبه‌های کوچک تقسیم کرده، سپس برای عدم قطعیت بار و منابع تولید پراکنده‌های ریزشبه‌ها، از یک برنامه تصادفی استفاده می‌کند تا بارهای قطع شده را بازیابی کند. از روش‌های دیگر بازیابی شبکه توزیع می‌توان به روش‌های ابتکاری [۱۲]، سیستم‌های خبره [۱۳]، روش تکاملی (محاسبات نرم) [۱۴] اشاره نمود. روش‌های ابتکاری ذاتاً نوعی محاسبات تخمینی هستند که فضای مسئله را کوچک می‌کنند. از معایب این روش می‌توان به دشواری در زمینه نگهداری و به‌روزرسانی به دلیل بزرگ بودن و پیچیده بودن الگوریتم اشاره نمود. سیستم خبره اساساً یک روش مبتنی بر دانش قبلی است که روش مطمئنی در بازیابی سیستم توزیع است ولی به دلیل پرهزینه بودن نگهداری تجهیزات از این روش کمتر استفاده می‌شود. روش‌های تکاملی (محاسبات نرم) شامل روش‌های شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک، تئوری فازی، بهینه‌سازی ذرات می‌شود. برای مثال مرجع [۱۴] از روش ژنتیک و مرجع‌های [۱۵، ۱۶] از روش تئوری فازی استفاده کرده‌اند. از معایب این مراجع می‌توان به زمان‌بر بودن آن‌ها اشاره نمود. در روش پیشنهادی تئوری گراف با استفاده از روابط مسیر، زمان و تعداد کلید زنی کاهش می‌یابد. شبکه توزیع را می‌توان به صورت یک گراف $G(V,E)$ نشان داد. که در آن V و E به ترتیب دلالت بر خط و باس‌های شبکه توزیع دارند. این گراف برای شناسایی خط جایگزین برای بازیابی سیستم استفاده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی دارای ویژگی‌های زیر است:

- ۱) تعداد کلید زنی در بازیابی سیستم توزیع حداقل می‌شود. الگوریتم با حداقل سازی کلیدزنی، بار بازیابی شده را نیز حداکثر می‌کند.
- ۲) ریزشبه‌ها و منابع تولید پراکنده شبکه توزیع همگی به‌عنوان فیدر مجازی مدل می‌شوند که نقطه اتصال آن‌ها با شبکه توزیع به صورت کلید باز در نظر گرفته می‌شود.
- ۳) یک مدل پخش بار نامتعادل سه فاز انجام می‌شود. تا مشخص شود راه‌حل پیشنهادی، محدودیت‌های الکتریکی و عملی را نقض نمی‌کند. همچنین در روش پیشنهادی با استفاده از روابط مسیر در گراف (به بخش ۳-۱ بند "ت" مراجعه شود) برخی از معایب روش مرجع [۷] رفع شده است. برای انتخاب بهینه‌ترین حالت بازیابی از شاخص‌های بارپذیری خطوط و نامتعادلی ولتاژ استفاده می‌شود. سایر بخش‌های مقاله به صورت زیر است. بخش دوم خودترمیمی سیستم توزیع و مراحل بازیابی بیان شده است. در بخش سوم مراحل بازیابی بخش دوم مورد بحث قرار گرفته است. و در بخش‌های چهارم و پنجم به ترتیب نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری آورده شده است.

در شبکه‌های توزیع شعاعی، انرژی از سمت منبع به سوی مصرف‌کنندگان انتهایی شبکه انتقال می‌یابد. در صورت وقوع خطا در شبکه توزیع، لازم است محل خطا هر چه سریع‌تر از سیستم جدا شود. بر اثر این جدایی ممکن است مسیر انتقال انرژی به سوی بعضی از بارها قطع شده و اصطلاحاً این بارها بی‌برق شوند [۱]. جهت بازیابی سریع‌تر بارها، باید سیستم توزیع توسعه یابد و توسعه یک شبکه قدرت خودترمیم با افزایش انعطاف‌پذیری موجب افزایش سرعت بازیابی در هنگام خطا می‌شود. در سیستم توزیع کلیدهایی وجود دارند که در حالت طبیعی باز بوده و می‌توان با بستن آن‌ها مسیر دیگری برای تغذیه بارهای بی‌برق از باس‌های دیگر همان فیدر، ریزشبه‌ها و یا فیدرهای اطراف پیدا نمود. به مسیر فیدر استفاده شده فیدر پشتیبان و به کلیدهای روی خطوط بین فیدر پشتیبان با فیدر مورد نظر کلید مانور گفته می‌شود. اگر در اطراف منطقه بی‌برق کلید مانوری وجود نداشته باشد نمی‌توان منطقه را بدون تعمیر بخش خطا بازیابی نمود. ریزشبه‌ها طوری طراحی می‌شوند که روند بازیابی سیستم توزیع را بهبود ببخشند. بازیابی سیستم توزیع یعنی تا حد امکان بار مناطق قطع شده بازیابی شود. این نقش حیاتی را در آینده نزدیک شبکه‌های برق هوشمند ایفا خواهد نمود.

تعداد زیاد خطوط، باس‌ها و تجهیزات در شبکه توزیع باعث پیچیدگی بازیابی می‌شوند. برای کاهش پیچیدگی بازیابی شبکه توزیع مطالعات و روش‌های مختلفی همچون منطق فازی [۲]، جستجوی اکتشافی [۳] و مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی [۴] ارایه شده است. در مرجع [۵] یک روش بازیابی زمان‌بر و طولانی بر مبنای جستجوی کامل مطرح گردیده است. همچنین نویسندگان در مرجع [۶]، از یک رابطه خاکستری برای بازیابی بارها استفاده نموده‌اند که از مزایای این روش می‌توان به بهبود افت ولتاژ شبکه با توجه به کلیدزنی بانک‌های خازنی موجود در شبکه توزیع اشاره نمود. این روش همچنین دارای معایبی از جمله زمان‌بر بودن و عدم کارایی در شبکه‌های توزیع بزرگ است. در [۷] با استفاده از روابط گراف و جستجوی درخت پوشا روشی برای بازیابی شبکه توزیع بعد از خطا ارایه شده است. از معایب این روشی می‌توان به بررسی نکردن شبکه‌های منتخب دیگر با تعداد کلیدزنی برابر اشاره نمود. همچنین در کلیدزنی‌های بیش از یک‌بار، به دلیل عدم استفاده از روابط مسیر در گراف امکان جزیره‌ای شدن بی-مورد بخشی از شبکه وجود دارد که بررسی و رفع آن باعث افزایش زمان بازیابی می‌شود و از آنجایی که بهینه‌ترین حالت را برای بازیابی شبکه در نظر نمی‌گیرد امکان وقوع خطای دوباره وجود دارد. مرجع [۸] برای تجدید ساختار شبکه توزیع از یک روش مبتنی بر گراف استفاده کرده است. از معایب این مرجع می‌توان به عدم استفاده از ریزشبه برای تجدید ساختار اشاره کرد. مرجع‌های [۹-۱۱] با تبدیل بخش آسیب‌دیده‌ی شبکه توزیع به ریزشبه، بارهای قطع شده را

۲- راهبرد خودترمیمی سیستم توزیع مبتنی بر نظریه گراف

راهبرد پیشنهادی خودترمیمی مبتنی بر نظریه گراف که در شکل (۱) نشان داده شده، شامل دو بخش اصلی است. بخش اول با انجام کلیدزنی سعی بر مجزا سازی محل وقوع خطا و تغییر مسیر تغذیه بارها به منظور بازیابی کامل شبکه توزیع پس از وقوع خطا را دارد. در صورت ناموفق بودن بخش اول در تغذیه کامل بارهای سیستم، در بخش دوم با ریزش بخشی از بارهای بخش جزیره شده شبکه توزیع، بارهای مهم تر بازیابی می شوند. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده بخش اول راهبرد پیشنهادی خودترمیمی شامل ۶ مرحله زیر به صورت زیر است:

- مرحله ۱: دریافت اطلاعات شبکه توزیع و تبدیل آن به گراف درخت پوشا G (به بخش ۳-۲-۱ مراجعه شود).
 - مرحله ۲: ساده سازی گراف G به G' با کاهش تعداد گره ها و شاخه های که نقشی در بازیابی ندارند (به بخش ۳-۲-۲ مراجعه شود).
 - مرحله ۳: جستجوی درخت های پوشا (طرح های بازیابی منتخب) به روش برش های اساسی و روابط مسیر در گراف (به بخش ۳-۲-۳ و ۳-۲-۴ مراجعه شود).
 - مرحله ۴: مرتب سازی شماره خطوط در گراف های جدید به دست آمده در مرحله ۳ و انجام پخش بار سه فاز نامتعادل بر روی این شبکه ها، (به بخش ۳-۳ مراجعه شود).
 - مرحله ۵: چک کردن محدودیت ها و ذخیره شبکه بازیابی شده در صورت عدم نقض محدودیت ها (به بخش ۳-۱ مراجعه شود).
 - مرحله ۶: انتخاب شبکه ای داری شاخص بارپذیری بزرگ تر و شاخص نامتعادلی ولتاژ کوچک تر (به بخش ۳-۴ مراجعه شود).
- در شکل (۱)، S_L^{\max} مقدار بار قطع شده بعد از خطا، مقدار بار ریزش شده، N تعداد کل شبکه های منتخب تولید شده، a تعداد شبکه های توزیع بدون نقض محدودیت های شبکه، i تعداد کلیدزنی، k تعداد کلیدزنی ممکن در بخش قطع شده شبکه توزیع است. همان طور که در الگوریتم شکل (۱) نشان داده شده است، مرحله های ۱ و ۲ بعد از وقوع خطا، فقط یک بار انجام می شود تا همه خطوط مانور و ریزش شبکه هایی که امکان بازیابی بارهای قطع شده را دارند مشخص شوند. مرحله ۳ نیز تمام حالت هایی که امکان بازیابی بارهای قطع شده با تعداد کلیدزنی کمتر به بیشتر را مشخص می کند. مرحله های ۴ تا ۶ با توجه به بخش های ۳-۱، ۳-۳ و ۳-۴ به بررسی شبکه های منتخب و انتخاب بهینه ترین شبکه منتخب با تعداد کلیدزنی کمتر می پردازد. اگر افزایش تعداد کلیدزنی ها در بازیابی کامل سیستم موفقیت آمیز نباشد، بازیابی جزئی با حذف بخشی از بار شبکه (بارهای با اولویت پایین) انجام می شود.

۳- مدل مسئله خودترمیمی

مهم ترین ویژگی در خودترمیمی شبکه پس از وقوع خطا، کاهش مدت زمان فرایند خودترمیمی و کارایی روش پیشنهادی در بازیابی حداکثر بارهای ممکن شبکه می باشد. روند خودترمیمی باید مدت زمان قطعی شبکه توزیع را کاهش داده و متناسب با انتظارات مشتری کارآمد و مهم تر از آن قابل اجرا و پیاده سازی باشد [۷].

۳-۱- اهداف و محدودیت های مسئله خودترمیمی

هدف اصلی در خودترمیمی موفق سیستم توزیع، بازیابی حداکثر بار با حداقل تعداد کلیدزنی است که باید در روش پیشنهادی خودترمیمی شبکه توزیع مدنظر قرار گیرد. مقادیر دو تابع بار بازیابی شده و تعداد کلیدزنی به ترتیب در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده است. در این مطالعه، پیکربندی مجدد سیستم توزیع به گونه ای انتخاب می گردد که بر اساس یک جستجوی کامل در میان درخت های پوشای برگزیده، طرح منتخب ضمن رعایت محدودیت های فنی شبکه دارای بیشترین مقدار بار بازیابی شده (۱) و کمترین تعداد کلیدزنی (۲) باشد.

$$f_1 = \sum_{i \in N_{res}} S_i \quad (1)$$

$$f_2 = n_{sw} \quad (2)$$

که در رابطه های (۱) و (۲)، S_i و N_{res} به ترتیب تعداد کلیدزنی مورد نیاز تا رسیدن به ساختار نهایی شبکه توزیع، بار بازیابی شده و به تعداد باس های بی برق شبکه توزیع دلالت می کنند. شبکه توزیع در روند بازیابی برای رسیدن به هدف مورد نظر با محدودیت هایی روبه رو خواهد بود که در ادامه بیان می گردند.

الف) محدودیت جریان عبوری از خطوط:

$$|I_l| \leq |I_l^{\max}|, \quad l \in L_{en} \quad (3)$$

که I_l و I_l^{\max} به ترتیب جریان خط l ام شبکه توزیع، حداکثر ظرفیت خط l ، و مجموعه کل خطوط شبکه توزیع است.

ب) محدودیت حدود مجاز ولتاژ

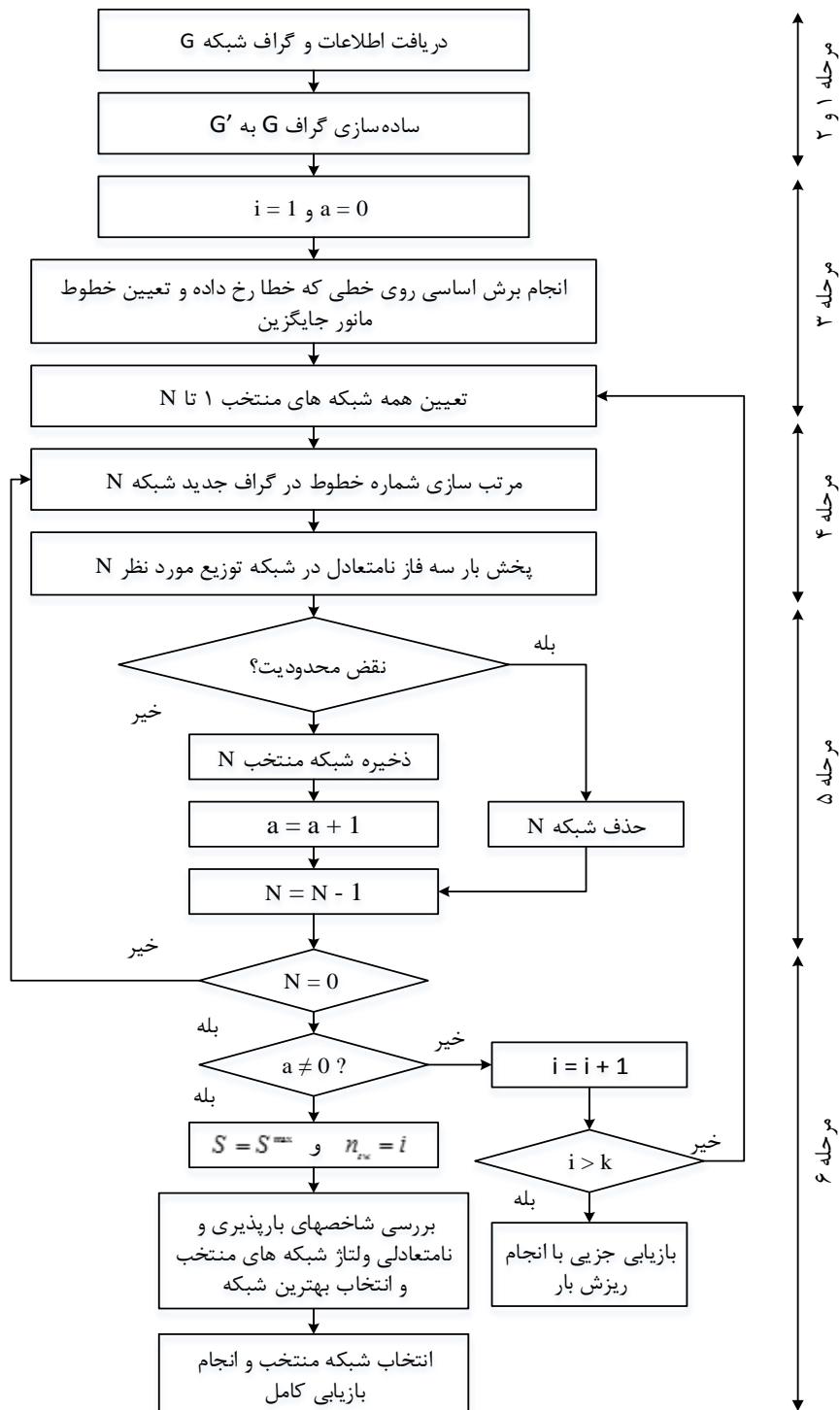
$$|V_k^{\min}| \leq |V_k| \leq |V_k^{\max}|, \quad k \in B_{en} \quad (4)$$

که V_k ، V_k^{\min} ، V_k^{\max} ، B_{en} به ترتیب ولتاژ باس k ام، حداکثر ولتاژ باس k (برابر با ۱/۰۵ پریونیت)، حداقل ولتاژ باس k ام (برابر با ۰/۹۵ پریونیت) و تعداد کل باس های شبکه توزیع است.

پ) محدودیت حداکثر توان اکتیو و راکتیو قابل تزریق ریزش شبکه

$$P_m \leq P_m^{\max} \quad \text{و} \quad Q_m \leq Q_m^{\max} \quad m \in M \quad (5)$$

که P_m و Q_m به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی ریزش شبکه m ام است. همچنین پارامترهای P_m^{\max} ، Q_m^{\max} و M نیز به ترتیب بر حداکثر توان اکتیو و راکتیو ریزش شبکه m و تعداد کل ریزش شبکه های متصل به شبکه توزیع که قادر به کمک به فرایند بازیابی شبکه توزیع هستند، دلالت می کنند.



شکل(۱): الگوریتم خودترمیمی به روش گراف و درخت پوشا

مسیرهای به طول ۲، ... و $B_6=A^6$ مسیرهای با طول ۶ را نشان می‌دهند.

$$B=B_1+B_2+\dots+B_6 \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

آرایه‌های موجود در هر سطر از ماتریس B ارتباط گره‌های دیگر گراف با گره نظیر آن سطر را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، آرایه‌های سطر یک نشان می‌دهد که گره‌های ۲ و ۳ با گره ۱ ارتباط داشته و از گره ۱ تغذیه می‌شوند و گره‌های دیگر هیچ ارتباطی با گره ۱ ندارند. سطر ۴ نشان می‌دهد که گره‌های ۵، ۶ و ۷ با گره ۴ اتصال داشته و گره‌های ۱ تا ۳ فاقد اتصالی با این گره می‌باشند. درایه سطر ۴ و ستون ۶ نشان می‌دهد که دو مسیر مختلف بین گره ۴ و ۶ وجود داشته و در نتیجه بین این دو گره حلقه ایجاد شده است. صفر شدن ستون ۴ نشان‌دهنده باز بودن خط بین دو بخش گراف است.

۳-۲- گراف پیشنهادی سیستم توزیع در راهبرد

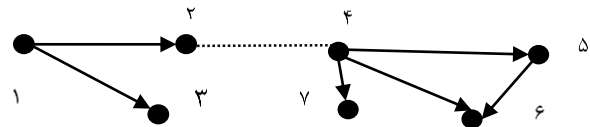
بازیابی

۳-۲-۱- تبدیل شبکه توزیع به گراف و درخت پوشا

انرژی موردنیاز شبکه توزیع از شبکه بالادست و یا از منابع موجود در ریزشبه‌های متصل به شبکه توزیع تأمین می‌شود. در این مطالعه هر ریزشبه به عنوان یک مسیر تغذیه همانند پست بالادست مدل می‌شود. در حالت طبیعی بهره‌برداری نقطه اتصال شبکه توزیع و ریزشبه به صورت کلید باز در نظر گرفته می‌شود. اگر هر باس و خط از شبکه توزیع به ترتیب به عنوان یک رأس و شاخه (یال) از گراف در نظر گرفته شود، شبکه توزیع به صورت یک گراف همبند $G(V,E)$ نشان داده خواهد شد که در آن پست فوق توزیع (بالادست) و ریزشبه‌ها همگی به عنوان یک گره اصلی (مادر) در نظر گرفته می‌شوند. ساختار شعاعی شبکه توزیع را می‌توان همانند یک درخت پوشا نشان داد که همه باس‌های شبکه توزیع را شامل شده و هیچ حلقه‌ای را نیز تشکیل نمی‌دهد. در این مقاله به منظور حفظ ساختار سنتی بهره‌برداری و حفاظت شبکه توزیع فرض شده است که ریزشبه و شبکه بالادست نمی‌توانند به طور هم‌زمان یک نقطه از شبکه توزیع را تغذیه نمایند. بنابراین به منظور جلوگیری از ایجاد حلقه در گراف درخت پوشای شبکه توزیع، در یک نقطه از مسیر اتصال ریزشبه‌ها به شبکه توزیع کلید مدار باز در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال سیستم توزیع و گراف درخت پوشای نظیر آن در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. در شکل (۳) باس F1 گره نظیر پست شبکه بالادست و باس‌های F2 تا F5 ریزشبه‌های متصل به شبکه توزیع هستند. همان‌طور که

(ت) محدودیت حفظ ساختار شعاعی شبکه توزیع

به منظور حفظ ساختار شعاعی شبکه از ارتباط میان ماتریس مجاورت شبکه توزیع با تعداد مسیر به طول‌های مختلف در آن استفاده شده است. به عنوان مثال ماتریس مجاورت به توان a معرف تعداد مسیرهای به طول a بین باس‌های شبکه توزیع است. اگر آرایه $i-j$ از ماتریس مجاورت به توان a، صفر شود به این معنی است که بین دو باس i و j مسیری به طول a وجود ندارد و اگر این مقدار ۱ شود بین باس i و j مسیری به طول a وجود خواهد داشت [۱۷]. به منظور تشخیص شعاعی بودن شبکه باید تمام ماتریس‌های مسیر به طول ۱ تا حداکثر طول ممکن (تعداد باس‌های شبکه منهای یک) را حساب نموده و باهم جمع نمود. اگر ماتریس به دست آمده دارای درایه‌ای بزرگ‌تر از ۱ باشد، آن شبکه دارای حلقه است در غیر این صورت شعاعی خواهد بود. اگر در ماتریس به دست آمده سطری صفر شود شبکه به دو بخش تقسیم می‌شود. برای درک بهتر این موضوع، شکل (۲) و ماتریس‌های مسیر آن بررسی شده است.



شکل (۲): یک گراف نمونه

جهت‌دار بودن شاخه‌ها در گراف شکل (۲) نشان‌دهنده جهت شارش جریان است. ماتریس مجاورت گراف ناهمبند شکل (۲) به صورت (۶) است.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

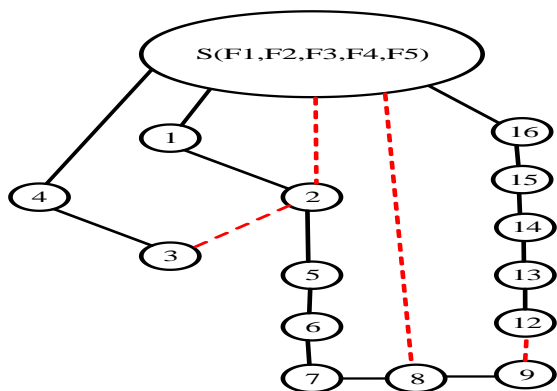
پس از نوشتن ماتریس مجاورت گراف، به دلیل یک‌طرفه بودن جریان در شبکه‌های شعاعی آن را به ماتریس بالا مثلثی (۷) تبدیل و مسیرهای مختلف در آن محاسبه می‌شود.

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

از آنجایی که گراف شکل (۲) دارای ۷ گره است، بنابراین بیشترین مسیر در آن، حداکثر می‌تواند به طول ۶ باشد. به همین منظور ماتریس تمام‌مسیرهای به طول ۱ تا ۶ را به دست آورده و باهم جمع نموده (۸) و (۹) تا نحوه ارتباط گره‌ها در گراف مشخص شود. به عنوان مثال $B_1=A^1$ ماتریس مسیرهای به طول یک، $B_2=A^2$

شوند.

پس از وقوع خطا روی یک از خطوط شبکه توزیع، کلیدهای ابتدا و انتهای خط، خطا را جدا و منزوی می‌کنند. پس از جداسازی بخش خطا، بارهای پایین دست محل وقوع خطا بی‌برق شده که باید با سلسله‌ای عملیات کلید زنی بارهای قطع شده را به شبکه برگرداند. برای مثال با وقوع خطا بر روی خط ۲-۱ و جداسازی آن، باس‌های ۲، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ بی‌برق خواهند شد که باید با کلیدزنی مناسب بازیابی شوند.



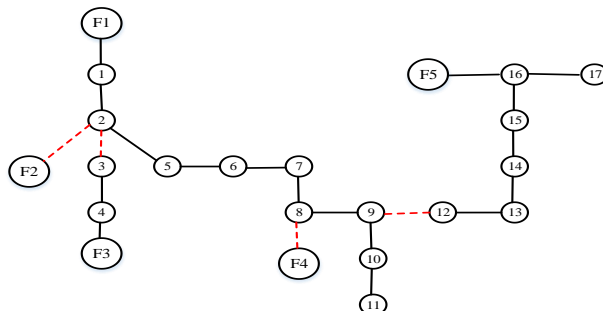
شکل (۵): گراف ساده شده شکل ۴

۳-۲-۳- تشکیل درخت‌های گراف شبکه توزیع

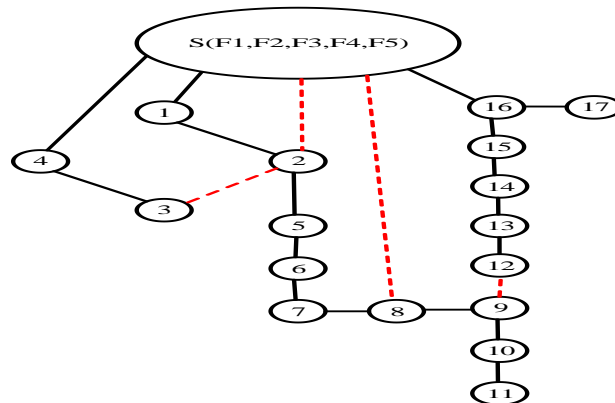
بعد از جداسازی بخش خطا، با زدن برش اساسی روی خطی که خطا رخ داده، حالت‌هایی که فقط با انجام یک کلیدزنی موجب بازیابی شبکه می‌شوند، مشخص می‌شود. برای مثال برش‌های اساسی خط ۲-۱، شامل خط‌های ۲-۵، ۲-۸، ۲-۳، و ۲-۹ است. شکل (۶) روند تشکیل درخت‌های شبکه توزیع بعد از رخ دادن خطا روی خط ۲-۱ را نشان می‌دهد. روند تشکیل درخت‌های شبکه توزیع بدین صورت است که ابتدا تمام درخت‌هایی که با انجام یک کلیدزنی به دست می‌آیند مشخص می‌شوند. این هدف با زدن برش اساسی روی خطی که در آن خطا رخ داده حاصل می‌شود. در حالتی که هیچ کدام از طرح‌های با یک کلیدزنی موفقیت‌آمیز نبوده و محدودیت‌های فنی (ظرفیت خطوط و ولتاژ باس‌ها) شبکه رعایت نشوند، طرح‌های شبکه با دو کلیدزنی بررسی می‌شوند. در این حالت دو شاخه از میان برش‌های اساسی اولیه انتخاب و وصل می‌شوند. به منظور جلوگیری از ایجاد حلقه در درخت، باید یکی از شاخه‌های موجود در پایین دست محل خطا که در مسیر بین دو شاخه برش اساسی قرار گرفته‌اند، قطع شود. این هدف با استفاده از روابط مسیر (توضیح داده شده در بخش‌های ۳-۱ بند "ت" و ۳-۲-۴) برآورده می‌شود. درخت‌های T_1 تا T_4 با انجام یک کلیدزنی از درخت T_0 و درخت T_5 با انجام سه کلید زنی (دو کلید بسته و یک کلید باز) از درخت T_0 به دست آمده است.

مشاهده می‌شود خطوط ۲-۳، ۲-۹، ۲-۱۲، ۲-۲ و ۲-۸ به منظور جلوگیری از ایجاد حلقه در گراف و برهم نخوردن ساختار بهره‌برداری شبکه توزیع به صورت مدار باز در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به شکل‌های (۳) و (۴)، برای هر شبکه توزیع می‌توان یک گراف درخت پوشای معادل رسم نمود.



شکل (۳): شبکه توزیع نمونه



شکل (۴): نمایش گراف درخت پوشای نظیر شبکه توزیع نمونه شکل ۳

۳-۲-۲- ساده‌سازی گراف درخت پوشای شبکه توزیع

تعداد درختان پوشا در بازیابی سیستم توزیع با افزایش تعداد باس-ها، خطوط شبکه و خطوط مانور افزایش می‌یابد که موجب افزایش زمان بازیابی سیستم توزیع می‌شوند. با ساده‌سازی گراف شبکه توزیع، از به وجود آمدن درخت‌های پوشایی که تأثیری در فرایند بازیابی ندارد جلوگیری می‌شود [۷]. به عنوان مثال در شکل (۴) باس‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۷ تأثیری در روند بازیابی نداشته و با وقوع خطا بر روی هر یک از خطوط ۱۰-۱۱، ۱۰-۹ و ۱۶-۱۷، تنها پس از رفع و پاک شدن خطا می‌توان باس‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۷ را بازیابی نمود. شکل (۵) گراف ساده شده شکل (۴) را نشان می‌دهد. طرح ساده‌سازی گراف درخت پوشا دارای ویژگی‌های زیر است:

- تمام گره‌های متصل به کلید باز در گراف ساده شده باقی می‌مانند.
- همه گره‌های با درجه یک (هر شاخه متصل به گره به منزله یک درجه است و گره‌ای که تنها از طریق یک شاخه به گراف متصل شده باشد با درجه یک می‌باشد) حذف می‌شود.

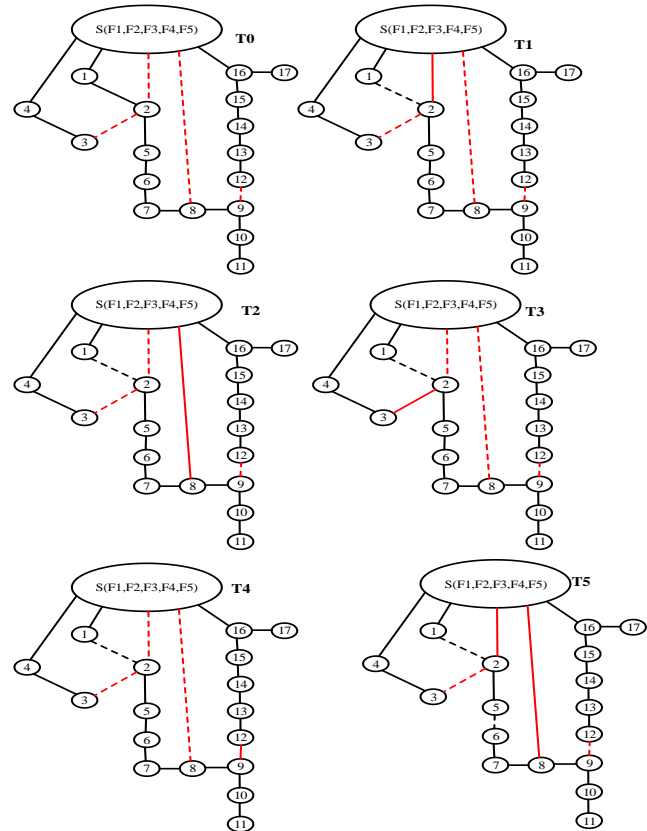
۳-۲-۴- کاهش درختان تولیدی و حفظ شعاعی بودن

شبکه توزیع

اگر بعد از انجام یک کلید زنی همه شبکه‌های به وجود آمده در بازیابی شبکه توزیع با محدودیت ظرفیت خطوط یا افت ولتاژ روبه‌رو شوند، باید به ازای بستن هر کلید، یک خط دیگر باز شود تا شبکه توزیع به صورت شعاعی باقی بماند. اما خطی که برای باز شدن انتخاب می‌شود باید دارای ویژگی‌هایی باشد که از ایجاد درختی که قادر به بازیابی کامل شبکه توزیع نیست جلوگیری به عمل آید. ویژگی‌های خط باز شده به این صورت است:

- خط باز شده جزو خطوطی باشد که بعد از رخ دادن خطا در منطقه بدون انرژی قرار گیرد.
- با باز شدن خط هیچ جزیره‌ای در گراف شبکه توزیع ایجاد نشود (همبند بودن گراف شبکه توزیع حفظ شود).
- خط باز شده در مسیر بین دو شاخه برش اساسی قرار گرفته باشد.
- باز شدن خط از ایجاد حلقه در گراف شبکه توزیع جلوگیری نماید.

برای مثال در شکل (۶) به منظور تشکیل درخت T_5 ، با بسته شدن دو کلید $S-2$ و $S-8$ یکی از خط‌های ۲-۵، ۶-۵، ۷-۶ و ۸-۷ باید قطع شوند تا شعاعی بودن شبکه و همبند بودن گراف حفظ شود.



شکل (۶): روند تشکیل درخت‌های شبکه توزیع

۳-۳- پخش بار نامتعادل در شبکه توزیع

امکان‌سنجی فنی درخت‌های تشکیل شده به روش بخش ۳-۲-۳ با انجام یک پخش بار سه فاز نامتعادل بررسی می‌شود. روش‌های مختلفی همچون گوس-سایدل، نیوتن رافسون و روش پیشرو-پسرو جهت انجام پخش بار در سیستم‌های قدرت معرفی شده که روش پیشرو-پسرو روشی متداول و قدرتمند برای شبکه‌های توزیع شعاعی محسوب می‌شود. در این مقاله از روش پخش بار پیشرو-پسرو به منظور انجام پخش بار سه فاز نامتعادل استفاده شده است [۱۸]. از آنجایی که در این روش یک حرکت رفت و برگشت از ابتدای شبکه به انتهای آن صورت می‌گیرد لازم است که قبل از انجام هر پخش بار شماره خطوط در گراف جدید شبکه توزیع مرتب شده و به عنوان مثال در صورت تغییر جهت جریان در یک خط، باید شماره باس ابتدا و انتهای خط جابجا شود.

۳-۴- شاخص‌های انتخاب شبکه مناسب

انتخاب و اجرای کلیدزنی مناسب در بازیابی شبکه توزیع باعث افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع بعد از فرایند بازیابی می‌شود. به منظور در نظر گرفتن هم‌زمان تاثیر چند شاخص در فرایند بازیابی می‌توان با به-هنجار رساندن مقادیر شاخص‌ها آن‌ها را با هم جمع وزنی نمود. در این مقاله دو شاخص بارپذیری خطوط و نامتعادلی ولتاژ شبکه توزیع که به ترتیب از نوع توابع صعودی و نزولی هستند با استفاده از روابط (۶) و (۷) به‌هنجار می‌شوند [۱۹]. رابطه (۸) جمع وزنی مقادیر به‌هنجار شده دو شاخص مذکور را نشان می‌دهد.

$$IU'_i = \frac{IU_i - IU_{i, \min}}{IU_{i, \max} - IU_{i, \min}} \quad (6)$$

$$VU'_i = \frac{VU_{i, \max} - VU_i}{VU_{i, \max} - VU_{i, \min}} \quad (7)$$

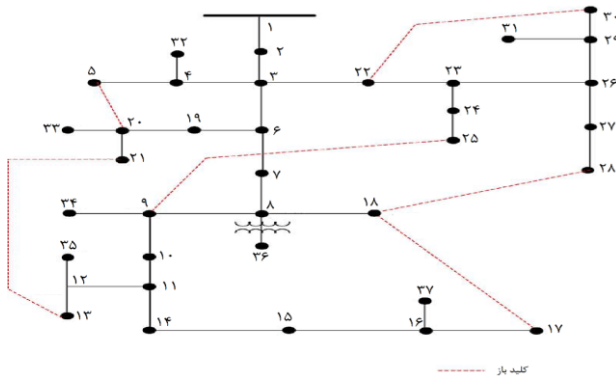
$$Y = w \times IU' + (1-w) \times VU' \quad (8)$$

که IU' و VU' به ترتیب مقادیر به‌هنجار شده دو شاخص بارپذیری خط و نامتعادلی ولتاژ شبکه توزیع است. همچنین w ضریب وزنی است که بسته به اهمیت هر کدام از شاخص‌ها با توجه به نظر بهره‌بردار سیستم مقداری بین صفر و یک انتخاب می‌کند. ضرایب IU_{\max} و IU_{\min} به ترتیب شاخص بارپذیری خطوط و حداکثر و حداقل مقدار شاخص بارپذیری را نشان می‌دهند. همچنین ضرایب VU_{\max} و VU_{\min} به ترتیب شاخص نامتعادلی ولتاژ و حداکثر و حداقل مقدار شاخص نامتعادلی ولتاژ را نشان می‌دهند.

۳-۴-۱- شاخص بارپذیری خطوط

اگر شبکه توزیع طوری طراحی شود که جریان هر خط از ظرفیت آن به اندازه مناسب فاصله داشته باشد قابلیت اطمینان خط بالا رفته و احتمال وقوع خطا در آن خط کمتر خواهد شد. شاخص بارپذیری خطوط شبکه توزیع در رابطه (۹) ارایه شده است.

گردیده که تمام خطوط شبکه ۳۷ باس IEEE دارای کلید با قابلیت باز و بسته شدن هستند و ولتاژ مجاز تمام باس‌ها بین بازه ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت در نظر گرفته شده است.



شکل (۷): شبکه توزیع IEEE-37 اصلاح شده

جدول ۱ نتایج الگوریتم خودترمیمی به ازای پنج سناریوی مختلف وقوع خطا را نشان می‌دهد. در هر سناریو اثر ضریب وزنی شاخص بارگذاری خط به ازای دو مقدار ۰/۶ و ۰/۴ بر روی نتایج کلیدزنی به دست آمده است. به منظور انجام مقایسه نتایج دو روش مبتنی بر جستجوی اکتشافی [۳] و روش برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح (MINLP) [۴] نیز در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش برنامه‌ریزی ریاضی و در سناریوهای ۲ و ۳ مسئله به خوبی جواب نداده و شرایط شعاعی بودن شبکه توزیع نقض شده است.

مقایسه نتایج سه روش جستجوی اکتشافی، برنامه‌ریزی ریاضی و روش پیشنهادی تئوری گراف نشان می‌دهد که روش مبتنی بر تئوری گراف در تمام سناریوهای تعریف شده دارای کمترین تعداد کلیدزنی بوده و با یک کلیدزنی بازیابی موفقی داشته است.

جدول (۱): مقایسه روش‌های بازیابی در سیستم ۳۷ باس IEEE اصلاح شده

سنار یو	بخش خطا	روش پیشنهادی (تئوری گراف با استفاده از روابط مسیر در گراف)						روش جستجوی اکتشافی [۳]			روش برنامه‌ریزی ریاضی [۴]			
		باز کردن کلید	زمان شبیه- سازی (ثانیه)	بستن کلید	باز کردن کلید	زمان شبیه- سازی (ثانیه)	بستن کلید	باز کردن کلید	بستن کلید	باز کردن کلید	زمان شبیه- سازی (ثانیه)	بستن کلید	باز کردن کلید	زمان شبیه- سازی (ثانیه)
۱	۲۲-۲۳	-	۰/۴۵۷	۲۲-۲۶	۰/۷۴۹	۲۲-۳۰	-	-	۴۱	-	-	-	-	
۲	۷-۸	-	۰/۵۳۵	۹-۱۰	۰/۸۷۲	۱۸-۲۸	۱۸-۲۸	۹-۱۰	۹۱	۱۵-۱۶	۱۸-۲۸، ۱۳-۲۱	۱۸-۲۸	۹-۱۰	
۳	۸-۹	-	۰/۴۴۱	۹-۱۰	۰/۹۶۷	۱۷-۱۸	۱۷-۱۸	۹-۱۰	۱۲۰	۱۱-۱۴ ۱۶-۱۷	۱۷-۱۸، ۱۳-۲۱ ۹-۲۵	۱۷-۱۸	۹-۱۰	
۴	۱۰-۱۱	-	۰/۳۳۲	۱۱-۱۴	۰/۸۳۴	۱۷-۱۸، ۱۳-۲۱	۱۷-۱۸	۱۱-۱۴	۳۰	۱۶-۱۷	۱۷-۱۸، ۱۳-۲۱	۱۷-۱۸	۱۱-۱۴	
۵	۶-۱۹	-	۰/۳۴۷	۲۰-۲۱	۰/۷۶۵	۵-۲۰، ۱۳-۲۱	۵-۲۰	۲۰-۲۱	۳	-	۵-۲۰	۵-۲۰	-	

$$IU = \sum_{k=1}^m \frac{I_k^{\max} - I_k}{I_k^{\max}} \quad (9)$$

که m تعداد کل خطوط با احتساب تعداد فازهای هر خط می‌باشد (در این بخش به دلیل سه فاز بودن تمام خطوط در عدد ۳ ضرب شده است). هر چه اندازه شاخص بارپذیری، IU بزرگ‌تر باشد شبکه توزیع قابلیت اطمینان بهتری خواهد داشت.

۳-۴-۲- شاخص نامتعادلی ولتاژ

شبکه توزیع به دلیل مواردی مانند وجود مشترکین تک فاز و یا تقسیم نامتعادل بار بر روی فازها، دچار نامتعادلی ولتاژ در اندازه و فاز ولتاژ می‌شوند که با استفاده از استاندارد IEEE از شاخص نسبت توالی منفی به مثبت ولتاژ (۱۰) استفاده شده است [۲۰].

$$VU = \frac{V^-}{V^+} \quad (10)$$

$$V^+ = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (11)$$

$$V^- = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (12)$$

که V^+ و V^- به ترتیب معرف ولتاژهای توالی مثبت و منفی بوده و ضریب a برابر $1 \angle 120^\circ$ است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

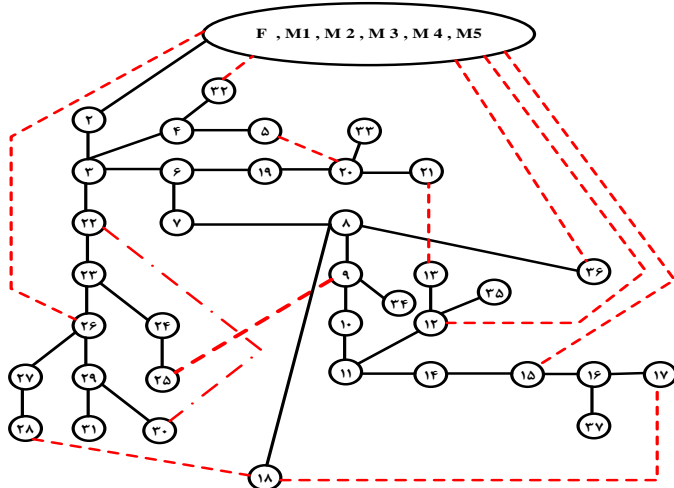
در این بخش، الگوریتم پیشنهادی خودترمیمی بر روی سیستم توزیع نمونه IEEE37 شبیه اصلاح شده نشان داده شده در شکل (۷) اعمال می‌شود. سناریوهای وقوع خطا و خودترمیمی شبکه پس از آن در دو حالت با و بدون حضور ریزش‌ها بررسی می‌شود.

۴-۱- خودترمیمی سیستم توزیع بدون ریزش‌ها

با اضافه نمودن ۶ خط به صورت خط‌چین (به عنوان خطوط مانور در حالت طبیعی باز) به شبکه استاندارد ۳۷ باس IEEE [۲۱] شبکه توزیع اصلاح شده جدیدی مطابق شکل (۷) به دست می‌آید. خطوط اضافه شده دارای کلید قابل باز و بسته شدن بوده و در حالت اولیه به صورت باز در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در این شبیه‌سازی فرض

جدول (۲): مقدار توان بیش از نیاز ریزشکبه‌ها

مقدار توان	ریزشکبه ۱	ریزشکبه ۲	ریزشکبه ۳	ریزشکبه ۴	ریزشکبه ۵
توان اکتیو (kW)	۶۵۰	۷۰۰	۶۵۰	۱۱۵۰	۳۰۰
توان راکتیو (kVar)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۵۵۰	۲۰۰



شکل (۸): گراف شبکه توزیع نمونه همراه با ریزشکبه شکل (۷)

در جدول ۴، سناریوهای ۱ تا ۶ نشان می‌دهند که زمان شبیه‌سازی با حضور ریزشکبه در صورت کاهش کلیدزنی کمتر می‌شود. در سناریوی ۱ خط مانور ۹-۲۵ نامتعادلی ولتاژ را کاهش داده اما بارپذیری خطوط نسبت به بسته شدن خط ۲۲-۳۰ به دلیل محدودیت در خطوط ۲۴-۲۵ و ۲۴-۲۳ کاهش می‌یابد. بنابراین رفع محدودیت خطوط ۲۴-۲۵ و ۲۴-۲۳ بهترین راه برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع در شرایط بحرانی است. ریزشکبه M2 با وجود بهبود شاخص بارپذیری، شاخص نامتعادلی ولتاژ را افزایش می‌دهد و تأثیر منفی در شبکه توزیع دارد در نتیجه محل ریزشکبه M2 مناسب نیست. در سناریوهای ۲، ۴ و ۶ با توجه مکان مناسب ریزشکبه‌های M1 و M4 شاخص‌های بارپذیری خطوط و عدم نامتعادلی ولتاژ بهبود یافته است. در سناریو ۶ علاوه بر بهبود شاخص‌ها، زمان بازیابی و تعداد کلید زنی کاهش داشته است در نتیجه ریزشکبه M4 مناسب‌ترین ریزشکبه است. ریزشکبه‌های M1 و M3 به دلیل عدم تأمین بارهای قطع شده در سناریو ۳، نمی‌توانند کمکی به بازیابی کنند. سناریو ۵ نیز نشان می‌دهد که ریزشکبه M1 به دلیل مکان نامناسب و میزان کم تزریق توان، برای بازیابی بارها مناسب نیست.

همچنین همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی خودترمیمی مبتنی بر تئوری گراف دارای زمان شبیه‌سازی کوچک‌تری نسبت به روش دیگر است. جدول ۳ نتایج به‌دست‌آمده الگوریتم خودترمیمی ارائه شده در [۷] و الگوریتم پیشنهادی که توسعه و بهبودی از روش [۷] است را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با محدود کردن جریان هر خط در هر فاز، سناریوهای ۲ و ۳ با توجه به نتایج مرجع [۷] قابل انجام نبوده و محدودیت خطوط را نقض می‌کنند (در جدول ۳ مقدار شاخص بارپذیری به دلیل نقض محدودیت ندارند). سناریو ۶ در جدول ۳ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به دلیل استفاده از روابط مسیر گراف، زمان بازیابی از ۱۳/۸ به ۰/۹۷۸ ثانیه کاهش و شاخص بارپذیری خطوط افزایش یافته است. بنابراین روش پیشنهادی از روش به‌کاررفته در مرجع [۷] مناسب‌تر است.

با کاهش ضریب وزنی W تأثیر شاخص بارپذیری خط در نتایج الگوریتم خودترمیمی کاهش و شاخص نامتعادلی ولتاژ از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد شد. در سناریوی ۱ با کاهش ضریب W به جای بستن کلید ۳۰-۲۲، کلید ۲۵-۹ بسته می‌شود و شبکه توزیع متعادل‌تر و بارپذیری خطوط کمتر می‌شود ولی در سناریوهای دیگر تأثیر شاخص بارپذیری نسبت به شاخص نامتعادلی ولتاژ بیشتر بوده و در نتیجه افزایش ۰/۲ ضریب W تأثیری در تغییر نتایج کلیدزنی خطوط مانور ندارد.

۲-۴ - خودترمیمی سیستم توزیع همراه با ریزشکبه

با اضافه نمودن ۵ ریزشکبه به ترتیب به باس‌های ۱۵، ۲۶، ۱۲، ۳۶ و ۳۲ به سیستم توزیع IEEE 37 شینه، سیستم توزیع جدیدی ساخته می‌شود. با توجه به فرض حفظ ساختار سنتی بهره‌برداری و حفاظت شبکه توزیع که ریزشکبه و شبکه بالادست نمی‌توانند به‌طور هم‌زمان یک نقطه از شبکه توزیع را تغذیه نمایند، ریزشکبه‌ها از طریق یک کلید قابل باز و بست که در حالت طبیعی به‌صورت باز است به شبکه توزیع متصل شده‌اند. حداکثر توان اکتیو و راکتیو قابل تزریق ریزشکبه به شبکه توزیع در جدول ۲ ارائه شده است. با تعریف مجدد سناریوهای وقوع خطای تعریف شده در بخش (۴-۱)، نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم خودترمیمی بررسی می‌شود. شکل (۸) گراف درخت پوشای تشکیل شده از شبکه توزیع جدید را نشان می‌دهد که همه ریزشکبه‌ها و باس ۱ (بالادست F) به‌صورت فشرده در یک گره مادر مدل شده‌اند. در شکل (۸)، شاخه‌های پر (بدون خط‌چین) نشان‌دهنده خط‌های با کلید بسته و شاخه‌های با خط‌چین نشان‌دهنده خطوط مانور با کلید باز در حالت اولیه هستند.

در جدول ۴، شش سناریوی مختلف وقوع خطا و نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم خودترمیمی در دو حالت با و بدون حضور ریزشکبه نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در صورت افزایش تأثیر شاخص بارپذیری خط (انتخاب ضریب وزنی W بزرگ) و همچنین مناسب بودن محل ریزشکبه، حضور ریزشکبه‌ها باعث کاهش کلیدزنی و افزایش بارپذیری خطوط می‌شود.

جدول (۳): مقایسه روش پیشنهادی با نتایج یک مرجع به روش گراف در سیستم ۳۷ باس IEEE اصلاح شده

نتایج مرجع [۷]				نتایج روش پیشنهادی								بخش خطا	سناریو
شاخص بارپذیری خطوط	زمان شبیه-سازی (ثانیه)	باز کردن کلید	بستن کلید	زمان شبیه-سازی (ثانیه)	باز کردن کلید	W = ۰/۴			W = ۰/۶				
						شاخص عدم نامتعادلی ولتاژ	شاخص بارپذیری خطوط	بستن کلید	شاخص عدم نامتعادلی ولتاژ	شاخص بارپذیری خطوط	بستن کلید		
۸۹/۷۷۵	۱/۳۳۵	-	۲۲-۳۰	۰/۴۵۷	-	۰/۰۱۵۵	۸۷/۴۴۵	۹-۲۵	۰/۰۱۶۸	۸۹/۷۷۵	۲۲-۳۰	۲۲-۲۳	۱
-	۰/۸۲۵	-	۹-۲۵	۰/۵۳۵	-	۰/۰۲۰۳	۸۵/۷۷۵	۱۸-۲۸	۰/۰۲۰۳	۸۵/۷۷۵	۱۸-۲۸	۷-۸	۲
-	۰/۷۸۷	-	۹-۲۵	۰/۴۴۱	-	۰/۰۱۹۴	۸۹/۶۷۵	۱۷-۱۸	۰/۰۱۹۴	۸۹/۶۷۵	۱۷-۱۸	۸-۹	۳
۹۰/۵۳۳	۰/۴۸۴	-	۱۷-۱۸	۰/۳۳۲	-	۰/۰۱۷۱	۹۰/۵۳۳	۱۷-۱۸	۰/۰۱۷۱	۹۰/۵۳۳	۱۷-۱۸	۱۰-۱۱	۴
۸۹/۷۶۸	۰/۸۰۵	-	۵-۲۰	۰/۳۴۷	-	۰/۰۱۶۲	۸۹/۷۶۸	۵-۲۰	۰/۰۱۶۲	۸۹/۷۶۸	۵-۲۰	۶-۱۹	۵
۸۲/۹۵۹	۱۳/۸۰	۶-۱۹	۹-۲۵، ۵-۲۰	۰/۹۷۸	۶-۷	۰/۰۲۲	۸۳/۵۱۸	۱۸-۲۸، ۵-۲۰	۰/۰۲۲	۸۳/۵۱۸	۱۸-۲۸، ۵-۲۰	۳-۶	۶

جدول (۴): مقایسه تأثیر حضور ریزشبه‌ها در بازیابی

حضور ریزشبه‌ها							عدم حضور ریزشبه‌ها							بخش خطا	سناریو		
زمان شبیه-سازی	باز کردن کلید	W = ۰/۴			W = ۰/۶			زمان شبیه-سازی	باز کردن کلید	W = ۰/۴			W = ۰/۶				
		شاخص عدم نامتعادلی	شاخص بارپذیری خطوط	بستن کلید	شاخص عدم نامتعادلی	شاخص بارپذیری خطوط	بستن کلید			شاخص عدم نامتعادلی	شاخص بارپذیری خطوط	بستن کلید	شاخص عدم نامتعادلی			شاخص بارپذیری خطوط	بستن کلید
۰/۶۴۵	-	۰/۰۱۵۵	۸۷/۳۵۹	۹-۲۵	۰/۰۱۷	۹۲/۱۳۲	۲۶-M2	۰/۴۵۷	-	۰/۰۱۶	۸۷/۴۴۵	۹-۲۵	۰/۰۱۷	۸۹/۷۷۵	-۳۰ ۲۲	-۲۳ ۲۲	۱
۰/۶۴۶	-	۰/۰۰۹	۹۲/۲۱	-M4 ۳۶	۰/۰۰۹	۹۲/۲۱	۳۶-M4	۰/۵۳۵	-	۰/۰۲۰	۸۵/۷۷۵	-۲۸ ۱۸	۰/۰۲۰	۸۵/۷۷۵	-۲۸ ۱۸	۷-۸	۲
۰/۵۱۲	-	۰/۰۱۹	۸۹/۶۷۵	-۱۸ ۱۷	۰/۰۱۹	۸۹/۶۷۵	۱۷-۱۸	۰/۴۴۱	-	۰/۰۱۹	۸۹/۶۷۵	-۱۸ ۱۷	۰/۰۱۹	۸۹/۶۷۵	-۱۸ ۱۷	۸-۹	۳
۰/۵۹۸	-	۰/۰۰۷	۹۵/۵۸۳	-M1 ۱۵	۰/۰۰۷	۹۵/۵۸۳	۱۵-M1	۰/۳۳۲	-	۰/۰۱۷	۹۰/۵۳۳	-۱۸ ۱۷	۰/۰۱۷	۹۰/۵۳۳	-۱۸ ۱۷	-۱۱ ۱۰	۴
۰/۳۶۶	-	۰/۰۱۶	۸۹/۷۶۸	۵-۲۰	۰/۰۱۶	۸۹/۷۶۸	۵-۲۰	۰/۳۴۷	-	۰/۰۱۶	۸۹/۷۶۸	۵-۲۰	۰/۰۱۶	۸۹/۷۶۸	-۲۰ ۵	-۱۹ ۶	۵
۰/۷۱۱	-	۰/۰۱	۹۲/۵۴۰	-M4 ۳۶	۰/۰۱	۹۲/۵۴۰	۳۶-M4	۰/۹۷۸	۶-۷	۰/۰۲۲	۸۳/۵۱۸	۵-۲۰ -۲۸ ۱۸	۰/۰۲۲	۸۳/۵۱۸	-۲۰ ۵ -۲۸ ۱۸	۳-۶	۶

- روش پیشنهادی با استفاده از روابط مسیر در گراف شعاعی بودن شبکه توزیع را به صورت مطمئن تضمین می‌کند.
- الگوریتم جستجوی ثنوری گراف به دلیل کاهش کلید زنی و به دنبال آن کاهش زمان، روش مناسبی برای بازیابی سیستم و جستجوی خط جایگزین در هنگام وقوع خطا است.
- در روش پیشنهادی، انتخاب خط مناسب جهت خودترمیمی همچنین موجب افزایش بارپذیری خطوط شده و در نتیجه می‌توان مقدار بارهای بیشتری را تغذیه نمود.
- افزایش بارپذیری خطوط شبکه توزیع باعث کاهش افت ولتاژ در باس‌هایی که بیشترین افت ولتاژ را دارند می‌شود بنابراین از آسیب‌های احتمالی به شبکه توزیع و مصرف‌کنندگان جلوگیری می‌شود.
- وجود ریزشبه‌های متصل به شبکه توزیع علاوه بر افزایش سرعت روند بازیابی، امکان بازیابی بار بیشتری را نیز فراهم می‌نماید.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش جستجوی درخت پوشا به منظور خودترمیمی شبکه توزیع پس از وقوع خطا استفاده گردید. پس از وقوع خطا با استفاده از برش‌های اساسی بر روی خط دچار حادثه شده، خطوط جایگزینی که با حفظ محدودیت‌های فنی شبکه امکان بازیابی کامل بارهای شبکه را داشته باشند انتخاب می‌گردند. الگوریتم پیشنهادی بر روی یک سیستم توزیع نمونه در دو حالت با و بدون اتصال ریزشبه‌ها آزمایش و بررسی گردید و نتایج رضایت بخشی به دست آمده آمد. از تحلیل نتایج عددی به دست آمده، موارد زیر را استنتاج می‌شود:

- الگوریتم ثنوری گراف با انتخاب درخت‌های پوشا از کلیدزنی کمتر به بیشتر باعث حداقل شدن تعداد کلیدزنی می‌شود.

Reduction and Service Restoration”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, 1998

- [13] Tsai.Men-Shen, “Development of an Object-Oriented Service Restoration Expert System With Load Variations”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 23, NO. 1, 2008
- [14] Kumar.Yogendra, Biswarup.Das ,and Jaydev.Sharma, “Multiobjective, Multiconstraint Service Restoration of Electric Power Distribution System With Priority Customers”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2008.
- [15] Lim.Seong-II, Seung-Jae Lee, Myeon-Song Choi, Dong-Jin Lim and Bok-Nam Ha, “Service Restoration Methodology for Multiple Fault Case in Distribution Systems” IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 21, NO. 4, 2006
- [16] Elmitwally. Akram, Elsaid. Mohammed, Elgamal. Mohammed, and Senior.Zhe Chen, “A Fuzzy-Multiagent Self-Healing Scheme for a Distribution System With Distributed Generations”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 30, NO. 5, SEPTEMBER 2015
- [17] ضرابی‌زاده. حمید (مترجم)، باندی و مورتی (مولف)، “نظریه گراف‌ها و کاربردهای آن” موسسه فرهنگی و هنری دیباگران تهران، ۱۳۷۸
- [18] Jen-Hao Teng, “A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solutions”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 18, NO. 3, 2003
- [19] Zangeneh .Ali, Jadid .Shahram and Rahimi-Kian . Ashkan, “A fuzzy environmental-technical-economic model for distributed generation planning” Elsevier, Energy 3437-3445, 2011
- [20] Shahnia .Farhad , Ghosh.Arindam, edwich.Gerard L and Zare .Firuz “Voltage unbalance improvement in low voltage residential feeders with rooftop PVs using custom power devices Elsevier”, Electrical Power and Energy Systems 55 , 2014
- [21] IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee’s Distribution Test Feeder Working Group. Distribution Test Feeders[Online]. available: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>

• در تمام سناریوهای وقوع خطا تعریف‌شده بر روی سیستم توزیع نمونه، عملیات خودترمیمی بدون نیاز به حذف و ریزش بار به صورت موفقیت‌آمیزی از طریق کلیدزنی انجام پذیرفت.

مراجع

- [۱] مرادخانی. امین، حقی‌فام. محمودرضا و محمدیان. مصطفی، “بازیابی بار شبکه‌های توزیع در حضور تولید پراکنده با در نظر گرفتن منابع انرژی ذخیره‌ای”، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۸۹
- [2] S.-I. Lim, S.-J. Lee, M.-S. Choi, D.-J. Lim, and B.-N. Ha, “Service restoration methodology for multiple fault case in distribution systems”, IEEE Trans. Power Syst., vol. , no. 4, pp. 1638–1644, Nov. 2006.
- [3] A. L. Morelato and A. Monticelli, “Heuristic search approach to distribution system restoration,” IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 4, pp. 2235–2241, Oct. 1989.
- [4] S. Khushalani, J.M. Solanki, and N. N. Schulz, “Optimized restoration of unbalanced distribution systems,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 2, pp. 624–630, May 2007.
- [5] Kleinberg. Michael and Miu. Miller. Karen, “Improving Service Restoration of Power Distribution Systems Through Load Curtailment of In-Service Customers”. IEEE POWER SYSTEMS, 2012
- [6] W.-M. Lin, C.-H. Huang, C.-H. Lin, C.-M. Chen and L.-W. “Wang. Restoration strategy for secondary power network with grey relational analysis” IET Gener. Transm. Distrib. pp. 167–174, 2008
- [7] Juan Li, Xi-YuanMa, Chen-Ching Liu and Kevin P. Schneider, “Distribution System Restoration With Microgrids Using Spanning Tree Search”, IEEE Trans. Power Syst, 2014
- [۸] مویدی‌راد. حجت، فلکی. حمید، فرشاد. محسن، “یک الگوریتم ابتکاری برای تجدید آرایش شبکه‌های توزیع به منظور کاهش تلفات اهمی مبتنی بر نظریه‌ی گراف، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۳؛ ۱۱ (۱): ۷۲–۵۹.
- [۹] نادری کاوه، حسامی نقشبندی علی. الگوریتمی جدید برای جزیره بندی کنترل شده سیستم های قدرت مبتنی بر خوشه بندی طیفی مقید. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۶؛ ۱۴ (۳): ۵۴–۴۱.
- [10] Wang .Zhaoyu and Wang. Jianhui, “Self-Healing Resilient Distribution Systems Based on Sectionalization Into Microgrids”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 30, NO. 6, NOVEMBER 2015
- [11] Golshani.Amir, Sun .Wei and Sun .Kai, “Advanced power system partitioning method for fast and reliable restoration: toward a selfhealing power grid”, IET Gener. Transm. Distrib. Vol. 12 Iss. 1, pp. 42-52, 2018
- [12] Lin.Whei.Min and Hong-Chan.Chin, “A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss