بازیابی شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و کلیدهای مانور موجود در شبکه

محسن ملاعالی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
molaali@aut.ac.ir
مهرداد عابدی، استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
abedi@aut.ac.ir

Archive of SID

چکیده

پیوستگی تامین انرژی الکتریکی به عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت توان در نظر گرفته می‌شود. در شبکه‌های توزیع با توجه به ساختار شعاعی آنها، با وقوع خطا بر روی یکی از خطوط شبکه و خارج شدن آن خط، قسمت‌های پایین دست خطا کاملا بی‌برق می‌شوند و ممکن است چندین ساعت یا حتی چندین روز طول بکشد که واحد تعمیرات بتواند اقدامات لازم را انجام دهد که این امر موجب نارضایتی مصرف‌کنندگان و کاهش قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. از این رو تدوین یک الگوریتم کارآمد جهت بازیابی سریع و موثر شبکه‌های توزیع امری ضروری می‌باشد. امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده بسیار افزایش یافته است. این منابع می‌توانند در بازیابی بارهای بی‌برق شده مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله الگوریتمی ابتکاری برای بازیابی شبکه‌های توزیع با استفاده همزمان از کلیدهای مانور موجود در شبکه و منابع تولید پراکنده ارائه شده است. دقت و کارایی روش پیشنهادی با پیاده‌سازی آن بر روی شبکه 33 باسه استاندارد IEEE نشان داده شده است.

کلیدواژه‌ها: بازیابی شبکه توزیع، کلید مانور، منابع تولید پراکنده، شبکه توزیع شعاعی، الگوریتم ابتکاری

www.SID.ir

1- مقدمه

امروزه با گسترش یافتن هرچه بیشتر شبکه‌های توزیع، احتمال وقوع خطا در شبکه و همچنین نیاز به تعمیرات افزایش یافته است. پس وقوع خطا، محل خطا باید هرچه سریع‌تر توسط کلیدهای مربوطه ایزوله گردد. این امر با توجه به ساختار شعاعی شبکه‌های توزیع موجب می‌شود که مسیر انتقال انرژی به قسمتی از بارها قطع گردد و این بارها دچار خاموشی یا بی‌برقی شوند. پس از این خاموشی تلاش برای بازگرداندن سریع و هرچه بیشتر بارها آغاز می‌شود که اصطلاحا به آن عملیات بازیابی می‌گویند. قابلیت اطمینان شبکه به میزان و سرعت بازیابی موثر بارها وابسته است. در شبکه توزیع کلیدهایی وجود دارند که در حالت عادی باز هستند و می‌توان با بستن آنها و تغییر ساختار شبکه، تا از بین رفتن خطا مسیری دیگر برای تغذیه بارهای بی‌برق ایجاد کرد. این کلیدها را اصطلاحا کلید مانور می‌نامند. در مواردی که خطا در در قسمت‌هایی باشد که در مجاورت آن هیچ کلید مانوری نباشد دیگر نمی‌توان بارهای ناحیه بی‌برق شده را برقدار کرد. همچنین در حالت‌هایی که خطا در نزدیکی منبع رخ دهد و بخش زیادی از بارها بی‌برق شوند تنها به وسیله کلیدهای مانور قادر نخواهیم بود تمام بارها را دوباره برقدار کنیم.

امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع به سرعت در حال افزایش است. حضور این منابع تولید پراکنده تاثیر مهمی در عملیات بازیابی شبکه‌های توزیع دارند. منبع تولید پراکنده می‌تواند با ایجاد یک جزیره عمدی که در واقع تغذیه بخشی از بارهای سیستم توزیع با استفاده از یک برنامه مشخص می‌باشد، در بازیابی شبکه نقش داشته باشد. این امر باعث کاهش میزان بارهای بی‌برق شده و نیاز به بسته شدن کلیدهای مانور کمتر جهت بازیابی می‌شود. طبق دستور العمل شرکت‌های توزیع، پس وقوع خطا باید اتصال منابع تولید پراکنده از شبکه تا زمان رفع خطا یا ایجاد برنامه‌ای جهت جزیره‌ای کردن آنها برای بازیابی بارها، قطع گردد.

مسئله بازیابی شبکه توزیع یک مسئله پیچیده با چندین تابع هدف می‌باشد. در پژوهش تون[1] و همکاران، 2002، 173-181، از الگوریتم‌های ابتکاری جهت بازیابی استفاده شده است. در فعالیت لی[2] و همکاران، 2012، 66-76، به بازیابی با شرط کمترین تلفات پرداخته شده است. با توجه به اینکه ساختار جدید شبکه پس بازیابی، تا زمان از بین رفتن خطا (حدود چند ساعت تا چند روز) برقرار می‌باشد بنابراین مسئله تلفات چندان ضروری به نظر نمی‌رسد. مطالعه کومار[3] و همکارانش، 2010، 396-406، از تولیدات پراکنده برای بهبود و راحت‌تر شدن عمل بازیابی استفاده کرده است. در پژوهش هوانگ[4]، 2003، 867-874، منطق فازی جهت حل مسئله بکار برده شده است. نقطه ضعف این روش عدم تضمین در رسیدن به جواب بهینه می‌باشد و معمولا منطق فازی باید با ترکیب شدن با یک روش دیگر استفاده شود که این کار توسط ژو[5] و همکاران، 1997، 724-729، انجام شده است. همچنین در فعالیت ژانگ[6] و همکارانش، 2011، 253-262، از الگوریتم ژنتیک جهت بازیابی شبکه با در نظر گرفتن اولویت بارها استفاده شده است. به منظور انتخاب

[1] Toune
[2] Li
[3] Kumar
[4] Huang
[5] Zhou
[6] Zhang

Archive of SID
www.SID.ir

بهترین کلیدها جهت بازیابی بارها کومار[1] و همکاران، 2008، 261-270، از هوش محاسباتی، و شین[2] و همکارانش، 2004، 145-152، از الگوریتم جستجوی ممنوع، و همچنین سولانکی[3] و همکاران، 2007، 1026-1034، از جستجوی چند عامله استفاده کرده‌اند.

در این مقاله برای بازیابی سریع و موثر شبکه‌های توزیع از منابع تولید پراکنده با برنامه‌ای مشخص به صورت ایجاد یک جزیره عمدی بهره استفاده شده است. همچنین جهت انتخاب مناسب‌ترین کلید مانور یک شاخص معرفی گردیده است. در نهایت الگوریتمی با استفاده همزمان از منابع تولید پراکنده و کلیدهای مانور برای بازیابی بار شبکه‌های توزیع ارائه شده است.

2- توابع هدف و فرمول‌بندی مسئله

فرمول بندی مسئله بازیابی شبکه توزیع با در نظر گرفتن کمترین مقدار حذف بار، یک مسئله با سه تابع هدف است که این اهداف شامل حداکثر بازیابی بارهای بی‌برق شده، حداقل تعداد کلیدزنی و کمترین مقدار حذف بار می‌باشد. این اهداف بصورت خلاصه و به ترتیب اولویت عبارت‌اند از:

$$\max(\sum_{k\in N_S} L_k) \quad (1)$$

$$\min(n_{switching}) \quad (2)$$

$$\min(\sum_{dk\in N_{CK}} L_{dk}) \quad (3)$$

در اینجا L_k تعداد بارهای بازیابی شده و N_S مجموعه باس‌های قابل بازیابی و L_{ck} مجموع مقدار حذف بار و N_{CK} مجموعه باس‌های دارای قابلیت حذف بار می‌باشد. همچنین $n_{switching}$ تعداد عملیات کلیدزنی می‌باشد.

3- قیود مسئله بازیابی در حضور منابع تولید پراکنده

در این مقاله در حل مسئله بازیابی شبکه توزیع، قیودی که در نظر گرفته شده است عبارت‌اند از:

3-1- صادق بودن معادلات پخش بار

$$f(V,g_k)=0 \quad (4)$$

در این رابطه که بیان‌کننده معادله پخش بار می‌باشد، V بردار ولتاژ باس‌های شبکه و g_k نشان‌دهنده ساختار جدید شبکه پس از عملیات بازیابی می‌باشد.

[1] Kumar
[2] Shin
[3] Solanki

Archive of SID
www.SID.ir

3-2- حفظ ساختار شعاعی شبکه

$$g_k \in G_R \tag{5}$$

در اینجا g_k ساختار جدید شبکه پس از بازیابی و G_R مجموعه ساختارهای شعاعی ممکن برای شبکه توزیع می‌باشد.

3-3- محدودیت مقدار ولتاژ باس‌ها

پس از عملیات بازیابی ولتاژ تمامی باس‌های دارای انرژی باید از حداقل ولتاژ قابل قبول بیشتر باشد.

$$V_K \geq V_{\min} \tag{6}$$

در اینجا V_k ولتاژ باس k ام و V_{min} حداقل ولتاژ قابل قبول در هر باس می‌باشد که در اینجا مقدار آن 0.9 pu در نظر گرفته شده است.

3-4- محدودیت مقدار جریان خطوط

جریان خطوط پس از عملیات بازیابی نباید از حداکثر جریان مجاز خطوط بیشتر باشد.از بین می‌رود.

$$I_i \leq I_{\max} \tag{7}$$

که در اینجا I_i جریان شاخه i ام و I_{max} حداکثر جریان مجاز می‌باشد.

3-5- حدود ظرفیت منابع تولید پراکنده

توان اکتیو و راکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده موجود در شبکه، همواره باید در محدوده قابل قبول برای این منابع باشد.

$$P_g^{\min} < P_g^t < P_g^{\max} \tag{8}$$

$$Q_g^{\min} < Q_g^t < Q_g^{\max} \tag{9}$$

در اینجا P_g^{max} و P_g^{min} به ترتیب حداکثر و حداقل توان اکتیو تولیدی منبع تولید پراکنده و Q_g^{max} و Q_g^{min} به ترتیب حداکثر و حداقل توان راکتیو تولیدی منبع تولید پراکنده و همچنین P_g^t و Q_g^t به ترتیب توان اکیتو و راکتیو تولید شده توسط منبع تولید پراکنده در هر لحظه از زمان می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

4- معرفی شاخص افت ولتاژ

با توجه به ساختار شعاعی شبکه‌های توزیع، بروز خطا سبب قطع قسمت‌های پایین دست خطا می‌شود. به منظور افزایش قابلیت اطمینان و کاهش انرژی توزیع نشده در شبکه، کلیدهایی در خطوط نصب می‌شوند که در حالت عادی باز می‌باشند، این کلیدها را کلیدهای مانور می‌نامند. پس از وقوع خطا و ایزوله شدن قسمت-های معیوب شبکه، از این کلیدهای مانور در کنار منابع تولید پراکنده جهت عملیات بازیابی استفاده می‌شود. در این مقاله به منظور انتخاب مناسب‌ترین کلید مانور جهت بازیابی شبکه شاخصی برای این کلیدها معرفی می‌شود. این شاخص بر اساس یکی از قیود اصلی مسئله بازیابی یعنی محدودیت ولتاژ باس‌ها تعریف شده است.

این شاخص در واقع نشان دهنده معیاری از میزان افت ولتاژ برای هر کلید مانور می‌باشد. هرچه این شاخص برای یک کلید مانور کمتر باشد نشان دهنده این است که پس از وصل کلید مانور ولتاژ باس‌ها مقدار بیشتری خواهد بود.

$$\Delta V = \frac{R_i P_i + X_i Q_i}{V_t} \tag{10}$$

در این رابطه R_i و X_i و P_i و Q_i به ترتیب مجموع مقاومت و راکتانس و بار اکتیو و راکتیو مسیر، از کلید مانور تا انتهای قسمت بی‌برق شده می‌باشد که با توجه به ساختار و مکان قرارگیری کلید مانور این مسیر می‌تواند یک یا بیشتر باشد. همچنین V_t ولتاژ باس سمت انرژی‌دار کلید مانور می‌باشد. تمامی این مقادیر بر حسب pu می‌باشند.

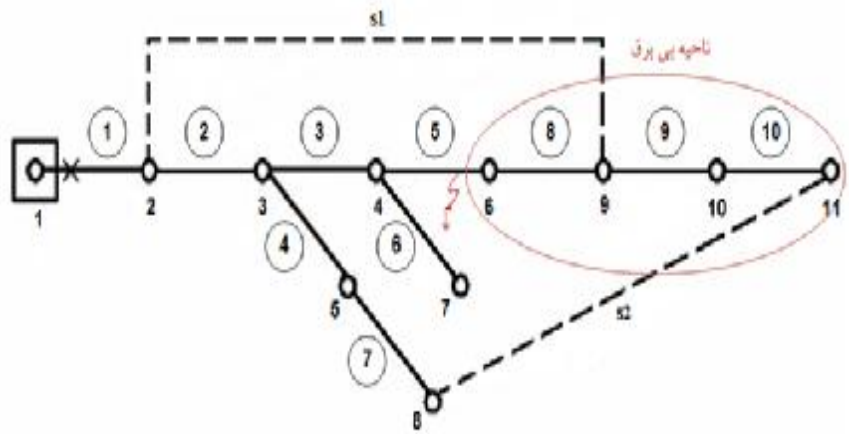
نحوه عملکرد این شاخص در شکل 1 نشان داده شده است. زمانی که خطایی بر روی خط شماره 5 رخ می-دهد، پس از ایزوله شدن این خطا، باس‌های شماره 6، 9، 10 و 11 بی‌برق می‌شوند. شاخص افت ولتاژ باید برای دو کلید مانور s1 و s2 محاسبه شود. به طور مثال در محاسبه این شاخص برای کلید مانور s1 دیده می-شود که از این کلید تا انتهای قسمت بی‌برق دو مسیر وجود دارد. مسیر اول شامل خطوط (مقاومت‌ها و راکتانس‌ها) 9و10 و باس‌های (بارهای اکتیو و راکتیو) 9و 10 و11 می‌باشد. مسیر دوم شامل خط شماره 8 و باس‌های 6و 9 می‌باشد. این شاخص برای کلید s1 برای دو مسیر بیان شده است که در آن V_2 ولتاژ سمت انرژی‌دار کلید یعنی ولتاژ باس شماره 2 است.

$$\Delta V_1 = \frac{(R_9 + R_{10})(P_9 + P_{10} + P_{11}) + (X_9 + X_{10})(Q_9 + Q_{10} + Q_{11})}{V_2}$$

$$\Delta V_2 = \frac{(R_8)(P_6 + P_9) + (X_8)(Q_6 + Q_9)}{V_2}$$

حال بین دو عدد بدست آمده،مقدار بزرگتر به عنوان شاخص افت ولتاژ برای کلید s1 در نظر گرفته می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir



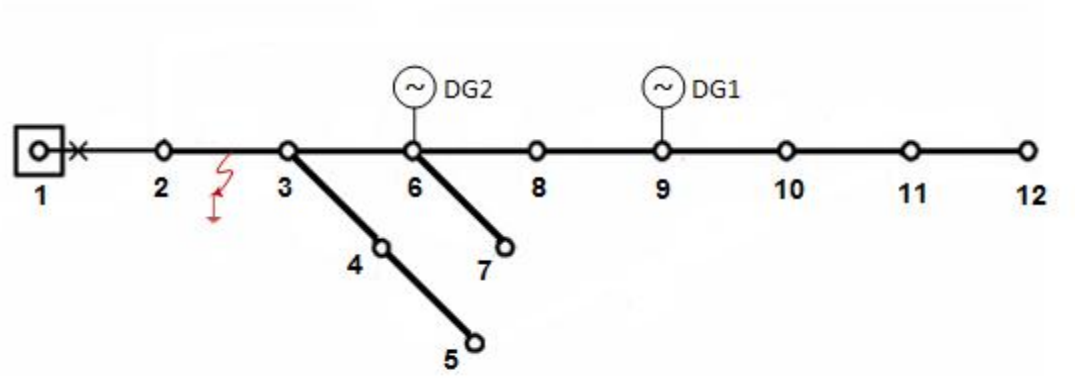
شکل1: شبکه توزیع نمونه **11** باسه

5- ایجاد جزیره عمدی توسط منابع تولید پراکنده

در بازیابی شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده، مهمترین بحث جزیره شدن منبع تولید پراکنده می‌باشد. یک جزیره زمانی بوجود می‌آید که قسمتی از شبکه فقط توسط منبع تولید پراکنده تغذیه گردد. جزیره عمدی در واقع جزیره‌ای می‌باشد که با طرح و برنامه‌ریزی از پیش تعیین شده بوجود آمده باشد. نحوه ایجاد یک جزیره در این مقاله این چنین است که ابتدا باید بررسی شود که منبع تولید پراکنده مورد نظر قادر است تمام بارهای مورد نظر را تحت یک جزیره تغذیه نمایند. جهت این هدف توان اکتیو و راکتیو منبع تولید پراکنده به ترتیب باید بیشتر از مجموع توان اکتیو و راکتیو بارهای موجود از باسی که منبع به آن متصل شده تا باس انتهایی شبکه (انتهای جزیره)، باشد و یا به عبارتی باید تعادل توان اکتیو و راکتیو برقرار باشد. اگر این شرط برقرار باشد باید با اضافه کردن یک به یک بارهای پشت منبع تولید پراکنده و هربار بررسی شرط تعادل توان تا جایی که ممکن است محدوده جزیره را بزرگتر نمود. به این ترتیب با پیدا کردن آخرین باری که شرط تعادل توان اکتیو و راکتیو را رعایت می‌کند محدوده جزیره مشخص می‌گردد و با باز کردن کلید پشت آخرین بار جزیره ایجاد می‌شود. اما اگر از باسی که منبع تولید پراکنده به آن متصل شده تا انتهای شبکه شرط تعادل توان برقرار نباشد این منبع جهت ایجاد جزیره نیازمند یک برنامه حذف بار،با کمترین مقدار حذف می‌باشد. برای این منظور مقدار اختلاف تعادل توان اکتیو و راکتیو محاسبه می‌گردد. سپس با بررسی اینکه چه مجموعه ای از بارها این اختلاف را جبران می‌کنند و همچنین با جبران اختلاف کمترین میزان تفاوت با مقدار صفر را دارند، بهترین مجموعه جهت حذف بار تعیین می‌گردد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل2: شبکه 12 باسه نمونه

نحوه عملکرد این برنامه‌ریزی در شکل 2 که یک شبکه 12 باسه را نشان می‌دهد، بیان شده است. اطلاعات این شبکه در جدول 1 و منابع بکار رفته در جدول 2 بیان شده است. اگر خطایی بین باس 2 و 3 رخ دهد پس از ایزوله شدن این خطا بارهای موجود در باس 3 تا 12 بی‌برق می‌شوند. برای ایجاد یک جزیره توسط منبع شماره 1 بارهای موجود از باسی که منبع به آن متصل است یعنی باس شماره 9 تا انتهای شبکه یعنی باس 12 در نظر گرفته می‌شود. مجموع توان اکتیو و راکتیو این بارها به ترتیب برابر با 240 kw و 195 kvar می‌باشد که از توان اکتیو و راکتیو منبع کمتر می‌باشد پس این منبع بدون حذف بار قادر به ایجاد یک جزیره می‌باشد. حال جهت گسترش جزیره توان اکتیو و راکتیو بار شماره 8 نیز به 4 باس قبلی اضافه می‌گردد که در این صورت مجموع توان اکتیو و راکتیو به ترتیب برابر با 310 kw و 255 kvar خواهد بود که از توانایی منبع بیشتر می‌باشد. بنابراین کلید موجود در خط بین باس 8 و 9 جهت ایجاد جزیره باز می‌گردد.
برای منبع دوم بارهای موجود از باسی که منبع وجود دارد یعنی باس 6، تا انتهای شبکه که دراینجا دو باس 7 و 8 باس انتهایی می‌باشند، در نظر گرفته می‌شود. این سه بار دارای مجموع توان اکتیو و راکتیو 170 kw و 142 kvar می‌باشند که منبع شماره دو قادر به تامین آنها خواهد بود. جهت گسترش جزیره چون اگر فقط بار 3 در نظر گرفته شود امکان قطعی برای بارهای 4 و 5 وجود دارد باید هر سه بار 3و 4 و 5 در نظر گرفته شود که منبع قادر به تامین آنها نخواهد بود پس باید کلید بین باس 3 و 6 جهت ایجاد جزیره باز گردد.

جدول 1: اطلاعات شبکه 12 باسه نمونه

شماره باس	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
توان اکتیو (kw)	10	30	20	40	60	40	70	50	80	45	65
توان راکتیو (kvar)	8	20	15	30	48	34	60	45	65	35	50

جدول 2: مشخصات منابع تولید پراکنده بکار رفته در شبکه 12 باسه نمونه

شماره منبع تولید پراکنده	1	2
توان اکتیو (kw)	250	200
توان راکتیو (kvar)	200	150

Archive of SID

www.SID.ir

6- الگوریتم پیشنهادی جهت بازیابی شبکه توزیع

پس از وقوع خطا و رفع آن توسط کلیدهای مربوطه، عملیات بازیابی آغاز می‌شود. اهداف این الگوریتم به ترتیب اولویت حداکثر کردن تعداد بارهای بازیابی شده، حداقل نمودن عملیات کلیدزنی و کمینه کردن میزان حذف بار می‌باشد. در حل مسئله بازیابی فرض بر این است که پارامترهای شبکه قبل از وقوع خطا موجود است. پس از وقوع خطا در سیستم توزیع جهت جلوگیری از اثرات منفی تولیدات پراکنده بر روی جریان خطا و عملکرد سیستم حفاظتی، اتصال واحدهای تولید پراکنده پایین دست خطا از شبکه توزیع باید قطع گردد. در این شرایط تا زمان ایجاد طرحی مناسب جهت بازیابی شبکه توزیع یا تا زمان رفع خطا این اتصال باید قطع باشد. با توجه به این شرایط الگوریتمی ابتکاری جهت بازیابی شبکه توزیع در پنج گام ارائه شده است:

گام اول:

پس از وقوع خطا و قطع شدن اتصال منابع تولید پراکنده پایین دست خطا از شبکه و همچنین ایزوله شدن خطا، ناحیه مشخص می‌گردد. با مشخص شدن ناحیه بی‌برق، تمام کلیدهای مانوری که امکان اتصال مستقیم به این ناحیه بی انرژی را دارند، تعیین می‌شوند و برای آنها شاخص افت ولتاژ محاسبه می‌شود. سپس کلیدها بر اساس مقدار شاخص افت ولتاژ از کم به زیاد لیست می‌شوند.

گام دوم:

کلید مانور دارای کمترین مقدار شاخص افت ولتاژ جهت بسته شدن انتخاب می‌گردد. پس از وصل آن تمامی قیود شبکه بررسی می‌گردد. اگر تمامی قیود رعایت شده باشد بازیابی تنها با بستن یک کلید مانور انجام شده است در غیر این صورت این کلید به تنهایی جهت بازیابی تمام شبکه مناسب نیست و باید از منابع تولید پراکنده نیز استفاده شود. پس این کلید باز می‌گردد و به گام سوم می‌رویم.

گام سوم:

در شبکه توزیع شعاعی بارهای انتهایی دارای افت ولتاژ بیشتری هستند. با توجه به این نکته منابع تولید پراکنده موجود در ناحیه بی‌برق بر اساس بیشترین عمق یا فاصله از محل خطا از زیاد به کم مرتب می‌شوند. منبع تولید پراکنده با بیشترین فاصله از خطا به عنوان اولین گزینه جهت ایجاد یک جزیره عمدی انتخاب می‌شود. جهت ایجاد جزیره باید توان اکتیو و راکتیو منبع تولید پراکنده از مجموع توان اکتیو و راکتیو بارها از باسی که منبع به آن متصل است تا انتهای شبکه، بیشتر باشد. اگر این شرط تعادل توان برقرار نبود به گام چهارم می‌رویم. اما اگر این شرط تعادل توان برقرار بود جزیره مطابق آنچه قبلا بیان شد تا جایی که قابل گسترش باشد ایجاد می‌شود. حال با توجه به اینکه ساختار شبکه تغییر کرده بار دیگر شاخص افت ولتاژ برای کلیدهای مانور محاسبه می‌شود و کلید با کمترین مقدار شاخص بسته شده و قیود شبکه بررسی می‌شود. اگر همه قیود رعایت شده باشد بازیابی تمام است در غیر این صورت کلید باز می‌شود و به گام چهارم می‌رویم.

گام چهارم:

منبع تولید پراکنده بعدی با بیشترین فاصله از خطا جهت ایجاد جزیره انتخاب شده و تمام مراحل گام سوم برای آن اجرا می‌شود و اگر با بستن کلید مانور که دارای کمترین مقدار شاخص افت ولتاژ است، تمامی قیود رعایت شدند بازیابی تمام است و اگر نه این روال برای منبع تولید پراکنده بعدی تا آخرین منبع ادامه پیدا می‌کند. اگر برای تمامی منابع این روند طی شد ولی بازهم بازیابی انجام نشد به گام پنجم می‌رویم.

Archive of SID

www.SID.ir

گام پنجم:

در این گام ابتدا به سراغ منبع تولید پراکنده با بیشترین فاصله از خطا که به علت عدم تعادل توان اکتیو و راکتیو، توانایی ایجاد جزیره را نداشته می‌رویم و برای ایجاد جزیره حذف بار را مطابق آنچه بیان شد انجام می‌دهیم و پس از آن دوباره کلید مانور مناسب را می‌یابیم. در صورت برآورده نشدن قیود شبکه این روند را برای تمام منابع باقی‌مانده اجرا می‌کنیم و اگر در آخرین مرحله باز هم شاهد نقض قیود بودیم در صورت وجود، کلید مانور دوم از لحاظ کمترین شاخص افت ولتاژ بسته می‌شود که در این حالت ساختار شعاعی شبکه بهم خواهد خورد. جهت رفع این مشکل باید در حلقه ایجاد شده یکی از کلیدهای موجود در ناحیه فاقد انرژی انتخاب و باز شود. که این حالت باعث تقسیم شدن بار ناحیه بی‌انرژی بین دو کلید مانور می‌شود. حال محاسبات پخش بار بر روی شبکه ایجاد شده انجام می‌شود، اگر تمام قیود رعایت شده باشد، عملیات بازیابی انجام شده است در غیر این صورت باید عملیات حذف بار از ناحیه بی‌برق صورت گیرد. حذف بار در ناحیه بی‌برق بر اساس اولویت یا حساسیت بارها انجام می‌گیرد و بارهای با اولویت پایین حذف می‌شوند.

7- سیستم مورد مطالعه

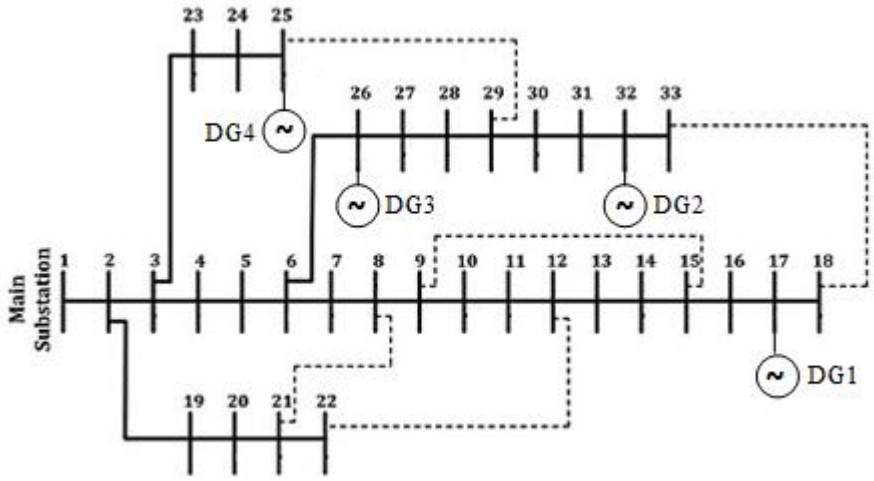
به منظور بررسی کارآیی الگوریتم بازیابی ارائه شده، شبکه توزیع 33 باسه IEEE مورد مطالعه قرار گرفته است. این شبکه دارای پنج کلید مانور می‌باشد. میزان بار این شبکه در حالت پایه مقدار 3715 kw بار اکتیو و 2300 kvar بار راکتیو می‌باشد. همچنین ولتاژ و توان نامی این شبکه به ترتیب 12.66 kv و 1 MVA است. در این شبکه چهار منبع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است که اطلاعات مربوط به آنها در جدول 3 آمده است. همچنین دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل 3 نشان داده شده و اطلاعات این شبکه در پژوهش باران[1] و همکاران، 1989، 1401-1407، آمده است.

جدول 3: مشخصات منابع تولید

نام منبع	باس اتصال	توان اکتیو (kw)	توان راکتیو (kvar)	نوع بهره‌برداری	قابلیت جزیره شدن
DG1	17	400	250	PV	دارد
DG2	32	450	250	PV	دارد
DG3	26	400	250	PV	دارد
DG4	25	450	250	PV	دارد

[1] Baran

Archive of SID
www.SID.ir



شکل3: دیاگرام تک خطی شبکه 33 باسه IEEE

الگوریتم ارائه شده در این مقاله توسط نرم افزار MATLAB کدنویسی شده است. در شبکه مورد نظر چندین مکان برای وقوع خطا در نظر گرفته شده و عملیات بازیابی انجام شده است. نتایج بازیابی برای خطا در نقاط مختلف شبکه در جدول 4 نشان داده شده است.

هنگامی که خطا بین باس 13-14 رخ می‌دهد، ابتدا منبع تولید پراکنده اول (DG1) از شبکه جدا شده و خطا نیز با باز شدن کلیدهای دو طرف خط 13-14 ایزوله می‌شود. پس از آن باس بارهای باس 14 تا 18 دچار خاموشی می‌شوند. حال دیده می‌شود که ظرفیت منبع تولید پراکنده اول از مجموع توان اکتیو و راکتیو بارهای بی‌برق شده بیشتر است پس در این شرایط با وصل دوباره منبع به شبکه یک جزیره ایجاد می‌شود و پس از انجام محاسبات پخش بار دیده می‌شود که تمامی قیود شبکه نیز رعایت گردیده است.

وقتی که خطا بین باس 26-27 رخ می‌دهد با قطع اتصال منبع شماره یک و دو از شبکه و ایزوله شدن خطا، دیده می‌شود که بارهای بی‌برق شده از مجموع ظرفیت این منابع بیشتر می‌باشد پس ابتدا به سراغ انتخاب مناسب‌ترین کلید مانور می‌رویم. برای دو کلید مانور موجود 29-25 و 33-18 شاخص افت ولتاژ به ترتیب برابر با 0.22 و 0.46 می‌باشد. پس کلید مانور با شاخص کمتر یعنی 29-25 انتخاب می‌گردد که با بستن و انجام محاسبات پخش بار دیده می‌شود که یازیابی به طور کامل انجام می‌شود. پس از آن منابع شماره یک و دو نیز می‌توانند مجددا به شبکه متصل شوند.

در حالتی که خطا بین باس 4-5 ایجاد می‌شود منابع تولید پراکنده اول تا سوم از شبکه جدا می‌شوند و پس از ایزوله شدن خطا، بخش زیادی از بار شبکه بی‌برق می‌شود. در این حالت ابتدا منبع شماره یک که دارای بیشترین فاصله تا محل خطا می‌باشد با باز شدن کلید 13-14 بارهای موجود در باس‌های 14 الی 18 را تغذیه می‌کند. پس از آن از بین سه کلید مانور 8-21 و 12-22 و 29-25، کلید 29-25 که دارای شاخص افت ولتاژ کمتری می‌باشد انتخاب می‌گردد، ولی با انتخاب این کلید دیده می‌شود که ولتاژ برخی از باس‌های شبکه کمتر از حد مجاز خواهند شد پس این کلید به تنهایی توانایی تامین تمام بارها را نخواهد داشت پس به سراغ منبع بعدی با بیشترین فاصله از محل خطا که منبع شماره دو می‌باشد می‌رویم. این منبع نیز بارهای

Archive of SID

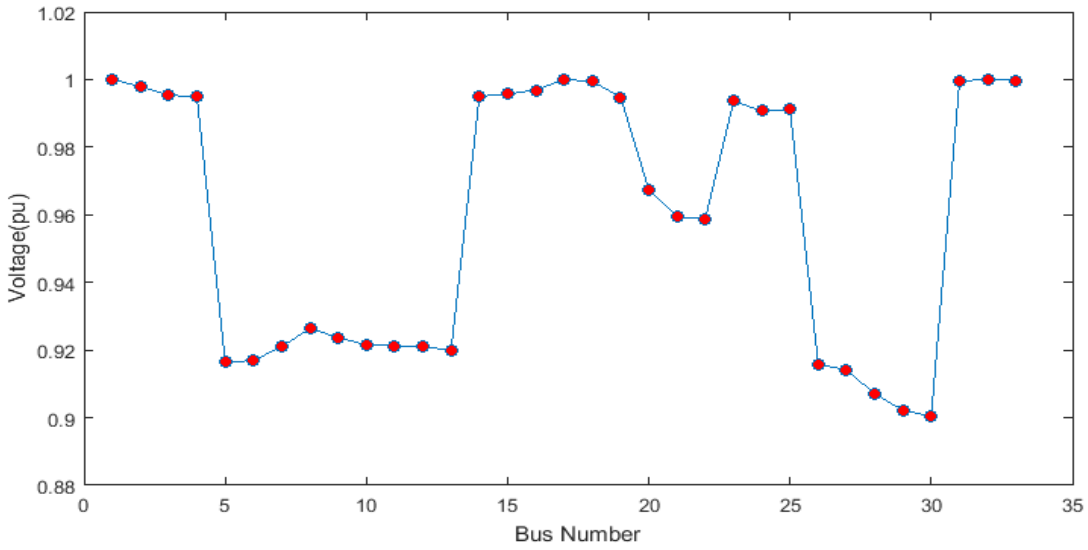
www.SID.ir

31 و 32 و 33 را در یک جزیره تغذیه می‌کند. حال با توجه به ساختار باقی مانده از شبکه کلید مانور 21-8 دارای کمترین شاخص افت ولتاژ است که با بستن آن با رعایت تمامی قیود شبکه بازیابی انجام شده است.

در حالت چهارم وقتی که خطایی بین باس 3-2 رخ می‌دهد با قطع تمام منابع تولید پراکنده از شبکه و ایزوله شدن خطا، حدود 89% از بارهای شبکه بی‌برق می‌شوند. در این حالت ابتدا منبع اول و دوم و سپس منبع چهارم یک جزیره تشکیل می‌دهند چراکه منبع سوم توانایی تغذیه بار باس‌های 26 تا 30 را ندارد. با انتخاب کلید 21-8 جهت بسته شدن دیده می‌شود که ولتاژی برخی از باس‌ها از حد مجاز کمتر خواهد شد بنابراین باید از منبع سوم نیز استفاده شود که برای این منظور بار باس شماره 30 باید حذف و کلید 6-26 برای ایجاد جزیره باز می‌گردد. حال با بسته شدن کلید مانور 21-8 دیده می‌شود که عملیات بازیابی با موفقیت انجام می‌شود. شکل 4 ولتاژ باس‌های شبکه پس بازیابی برای وقوع خطا بین باس 3-2 را نشان می‌دهد.

جدول 4: نتایج بازیابی شبکه 33 باسه

حالت	محل خطا	بارهای بی‌برق شده (kw,kvar)	کلید مانور بسته شده	کلید باز شده جهت ایجاد جزیره	باس حذف بار	باس با کمترین ولتاژ	حداقل ولتاژ (pu)
1	14-13	390،170	-	14-13	-	30	0.963
2	27-26	860،925	29-25	-	-	33	0.948
3	5-4	2115،1510	8-21	31-14،30-13	-	30	0.9004
4	3-2	3255،2080	8-21	31-14،30-13 26-25،6-24	30	24	0.905



شکل4: ولتاژ باس‌های شبکه پس بازیابی برای خطای بین باس 3-2

hive of SID

www.SID.ir

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتمی ابتکاری با استفاده از منابع تولید پراکنده و کلیدهای مانور جهت بازیابی سریع و موثر شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در این این الگوریتم بیشینه کردن مقدار بازیابی بارهای بی‌برق شده، کمینه کردن عملیات کلیدزنی و همچنین حداقل نمودن مقدار حذف بار به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. در راستای رسیدن به این اهداف سعی شده که از منابع تولید پراکنده جهت تغذیه برخی بارها به صورت جزیره‌ای استفاده گردد. همچنین با توجه به قیود شبکه، شاخصی تحت عنوان افت ولتاژ معرفی شده است و از این شاخص برای انتخاب مناسب‌ترین کلید مانور جهت بازیابی شبکه توزیع بهره برده شده است که باعث تغذیه برخی دیگر از بارها خواهد شد. روش پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد 33 باسه IEEE دارای چهار منبع تولید پراکنده با قابلیت جزیره‌ای شدن، پیاده‌سازی شده است و نتایج ارائه شده کارایی و دقت الگوریتم پیشنهادی را تایید می‌کنند.

مراجع

[1] Baran, M. E., & Wu, F. F. (1989). ***Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,*** IEEE Transactions on Power delivery, 4(2), pp. 1401-1407.

[2] Huang, C. M. (2003). ***Multi objective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks,*** IEEE Transactions on Power Systems, 18(2), pp. 867-874.

[3] Kumar, V., Gupta, I., & Gupta, H. O. (2010). ***DG integrated approach for service restoration under cold load pickup,*** IEEE Transactions on power delivery, 25(1), pp. 398-406.

[4] Kumar, Y., Das, B., & Sharma, J. (2008). ***Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers,*** IEEE Transactions on Power delivery, 23(1), pp. 261-270.

[5] Li, H., Sun, H., Wen, J., Cheng, S., & He, H. (2012). ***A fully decentralized multi-agent system for intelligent restoration of power distribution network incorporating distributed generations [application notes],*** IEEE Computational intelligence magazine, 7(4), pp. 66-76.

[6] Shin, D. J., Kim, J. O., Kim, T. K., Choo, J. B., & Singh, C. (2004***). Optimal service restoration and reconfiguration of network using Genetic-Tabu algorithm,*** Electric Power Systems Research, 71(2), pp. 145-152.

[7] Solanki, J. M., Khushalani, S., & Schulz, N. N. (2007). ***A multi-agent solution to distribution systems restoration,*** IEEE Transactions on Power systems, 22(3), pp.1026-1034.

[8] Toune, S., Fudo, H., Genji, T., Fukuyama, Y., & Nakanishi, Y. (2002). ***Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems,*** IEEE Transactions on Power Delivery, 17(1), pp. 173-181.

[9] Zhang, L., & Sun, L. (2011). ***Multi-Objective service restoration for blackout of distribution system with Distributed Generators based on multi-agent GA,*** Energy Procedia, 12, pp. 253-262.

[10] Zhou, Q., Shirmohammadi, D., & Liu, W. H. (1997). ***Distribution feeder reconfiguration for service restoration and load balancing,*** IEEE Transactions on Power Systems, 12(2), pp. 724-729.

Archive of SID

www.SID.ir