ارائه الگوریتم چند عاملهٔ قابل انعطافی برای بازیابی سریع شبکه‌های توزیع، سازگار با محیط GIS

وحید متقی[۱] - شاهرخ شجاعیان[۲]
(۱) کارشناس ارشد - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر
(۲) استادیار - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۸

خلاصه: پیکربندی شبکه‌های توزیع به دنبال وقوع خطا و خارج شدن بخش معیوب شبکه، باید به سرعت تغییر کند تا بخش‌های سالم مجدداً برق‌دار شوند. این کار که در اصطلاح بهره برداران مانور و در اصطلاح آکادمیک بازیابی سیستم نامیده می‌شود، محتاج یک آلگوریتم منطقی، سریع و قابل انعطاف برای همهٔ آرایشهای شبکه است. در سالهای اخیر با استقرار سیستمهای GIS در شبکه‌های توزیع، نحوهٔ درج اطلاعات شبکه در کامپیوترها دگرگون شده و در عمل امکان رؤیت شبکه توسط کامپیوتر، چنانکه در نرم افزارهای سنتی سیستم بود، وجود ندارد. در این مقاله با تعریف مناسب ارتباط بین شرکاء شبکه، علاوه بر تشخیص سریع منطقه مواجه با اتصالی و مناطق بی برق متأثر از آن، براساس اطلاعات دیجیتال موجود در بانکهای GIS، میزان بار از دست رفته مشخص گردیده و با توجه به ظرفیت مسیرهای قابل دسترس، استراتژی بهینه بازیابی انتخاب می‌شود. آلگوریتم پیشنهادی در محیط Matlab روی یک شبکه توزیع سه فیدره پیچیده شبیه سازی شده و سرعت و دقت آن محک زده می‌شود.

کلمات کلیدی: بازیابی، شرکاء شبکه، مانور، سکشن، شبکه توزیع.

A Flexible Multi-Agent Algorithm for Fast Restoration of Distribution Systems, Compatible with GIS

Vahid Mottaghi[1] – Shahrokh Shojaeian[2]
(1) Msc – Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch
vahid.mottaghi@iaukhsh.ac.ir
(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch
shojaeian@iaukhsh.ac.ir

Power distribution network configuration must be restructured fast after occurring a fault in order to restoring healthy parts. A logical algorithm is needed to do such restoration. In recent years, by developing GIS systems in distribution networks, data entering and structuring in computers has been changed and dissimilar to conventional softwares, computer cannot view the network configuration. In this paper a proper definition of network agents are suggested in matrix format. By such definition fast detection of fault location and deenergized sections located at its downstream parts is done. Also curtailed load is calculated. Finally with digital data available in the GIS databases, optimal restoration strategy is selected and applied based on available routs. The proposed algorithm is applied on a complicated three feeder distribution network to test its effectiveness and speed. Simulations in MATLAB shows that the proposed algorithm is very fast and robust to any complicated network configuration as well as any number and location on sequential faults.

Index Terms: Restoration, network agents, section, distribution network.

نویسنده مسئول: شاهرخ شجاعیان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، shojaeian@iaukhsh.ac.ir

۱- مقدمه

در اثر وقوع اتصال کوتاه در شبکه توزیع، بخش معیوب شبکه با عملکرد حفاظتها از مدار خارج می‌شود. به دلیل آنکه اغلب شبکه‌های توزیع آرایشی شعاعی دارند، بخشهای بعد از سکشن معیوب (که عملاً سالم هستند) هم بی برق خواهند شد. هدف بازیابی[۱] شبکه، برق‌دار کردن بخشهای اخیر است.

تا به حال روشهای گوناگونی برای بازیابی شبکه‌های توزیع ارائه شده‌اند. در [۱] از روش تکرار لاگرانژین استفاده شده است. در این روش دستیابی به جواب بهینه از طریق فرآیند تکرار انجام می‌شود. مراحل بازیابی به گام‌های کوچکتری شکسته می‌شوند و در هر مرحله وضعیت فیدرها با مرحلهٔ قبلی مقایسه شده و حالت بهینه انتخاب می شود. همچنین با مقداری محاسبات اضافی می‌توان زمان بندی برق‌دار شدن فیدرهای قطع شده را هم انجام داد. در [۲] از روش بازیابی گروهی منابع تغذیه، استفاده شده که مبتنی بر ترکیب روش جستجوی گراف و شبکه عصبی است. نقش شبکه عصبی در این روش ایجاد خود یادگیری به هنگام کنترل یک بردار خطای عمومی بوده است [۳].

در [۳] تمرکز اصلی بر یافتن یک توپولوژی جدید برای شبکه فشار متوسط است. به نحوی که ابعاد منطقه مرتبط با اتصالی به حداقل ممکن رسانده شده و بارهای بیشتری برق‌دار شوند. برای این منظور نرم افزاری توسط نویسندگان نوشته شده و روی یک شبکه واقعی به همراه سیستم کنترل پیشنهادی شبیه سازی شده است. نرم افزار امکان تبادل نظر با اپراتور را نیز برای انتخاب مانور نهایی دارد.

در [۴] از روش تعقیب شبکه[۲] برای بازیابی استفاده شده که هم حالت تک مسیره و هم چند مسیره را در مانور شبکه منظور می‌کند. در شرایطی که مانور به تنهایی کفایت نکند، این آلگوریتم امکان پیشنهاد فهرست مناسبی برای بارزدایی[۳] می‌نیمم را نیز دارد.

در [۵] به بازیابی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چند منظوره نگریسته شده که در آن باید با حداقل سوئیچینگ، حداکثر تعداد بارها برقدار شوند. برای حل مسئله از حل بهینهٔ پره تو استفاده شده که در آن بهینگی با استفاده از آلگوریتم ژنتیک تضمین می‌گردد.

در [۶] باز هم به بازیابی به عنوان یک مسئلهٔ بهینه سازی چند هدفهٔ چند قیده نگریسته شده و برای حل آن از آلگوریتم ژنتیک مرتب‌کنندهٔ غیرمسلط[۴] نوع۲ (NSGA-II) استفاده شده است. مزیتی که برای روش پیشنهادی نسبت به روش ژنتیک سنتی برشمرده شده این است که نیازی به ضرایب وزن‌دهی برای تبدیل مسئله چندهدفه به تک هدفه نیست. این ادعا با بررسی چندین شبکه تست نشان داده شده است.

در [۷] یک سیستم خبره شیئ گرا برای بازیابی پیشنهاد شده است. این سیستم تغییرات بارها را هم در نظر می‌گیرد و حتی می‌تواند چند طرح برای مانور در اختیار اپراتور قرار دهد تا او هرکدام را عملی‌تر می‌داند انجام دهد. در [۸] از روش چند عامله[۵] (MAS) با قابلیت یادگیری استفاده شده است. یادگیری به شیوه‌ای موسوم به روش Q انجام می‌شود که برای داده‌های محدود مناسب است و نتیجهٔ مانورهای قبلی را در طرحهای بعدی منظور می‌کند. این روش روی بخشی از شبکهٔ غرب ویرجینیا انجام شده است.

در [۹] بازهم از روش چند عامله استفاده شده ولی برای متمرکز کردن اطلاعات نقش واحدهای FRTU[۶] هم در نظر گرفته شده است. در واقع واحدهای اخیر همان عاملهای شبکه هستند. با این سیستم، امکان تشخیص نقاط مانوری ضعیف شبکه هم فراهم می‌شود.

در همهٔ روشهای فوق تلاش بر این است که با روشهای صریح ریاضی، (یعنی حل مسائل بهینه‌سازی) یا با روشهای تکرار یا آلگوریتمهای هوش مصنوعی مسئله بازیابی حل شود. این فرآیند بی‌شک محتاج پردازش زیاد، بعضاً ارتباطات متعدد بین نقاط مختلف شبکه و دیسپاچینگ و در نتیجه ترافیک داده‌ای بالا و در نهایت هزینهٔ بیشتر هستند.

در روش پیشنهادی در مقاله حاضر، با تعریف مناسب وظیفه سازمانی هر عامل شبکه مراحل فوق بین اجزاء شبکه تقسیم شده و زمان بازیابی کاهش می‌یابد. همانگونه که درادامه به تفصیل به آن پرداخته می‌شود وظیفهٔ تشخیص خطا، محل آن و میزان بار ازدست رفته بر عهدهٔ عوامل "منابع تغذیه اصلی" قرار گرفته و با استفاده از اطلاعات ارسالی از اجزاء شبکه، حالت بهینه مانور در مرکز کنترلی اتخاذ و از طریق "پستهای مانوری" اجرا می‌گردند. برای به دست آوردن داده‌های وضعیتی سکشنها استفاده از همان اطلاعات کنتورهای هوشمند که در سالهای اخیر متداول شده‌اند به همراه مودمهای ارزان قیمت کفایت می‌کند. داده‌های ثابت شبکه نیز از سیستم GIS[۷] گرفته می‌شوند که به روز و سهل الوصولند. به این ترتیب از ترافیک اطلاعات، پردازش، تصمیم گیری و اجرا جلوگیری به عمل آمده و اجرای این روش ارزان و سریع خواهد بود. پس از مقدمهٔ حاضر در بخش دوم، اصول روش پیشنهادی تشریح شده و در بخش سوم یک شبیه سازی نمونه روی شبکه‌ای سه فیدره با روش پیشنهادی انجام می‌شود. نهایتاً نتایج کلی مقاله در بخش چهارم ارائه خواهند شد.

۲- تشریح روش پیشنهادی

۲-۱- اصول کلی

برای شروع مکانیزم بازیابی یک شبکه توزیع به روش چندعامله، ابتدا باید اهداف بازیابی براساس وضعیت عادی و پایدار آن، تعریف گردد. هدف از این مرحله آن است که چگونه اجزاء شبکه را در حالت عادی شبکه به یکدیگر معرفی شوند تا در زمان وقوع خطا بتوان آرایش مطلوب را به دست آورد. مرحله بعدی، استخراج اطلاعات مورد نیاز جهت ساده سازی آلگوریتم تصمیم گیری است. توجه به این مرحله بسیار حائز اهمیت است. زیرا زمانی می‌توان سرعت تصمیم گیری در بازیابی را افزایش داد که اطلاعات به صورت دسته بندی شده در اختیار واحدهای تصمیم گیر شبکه (عاملها) قرار گیرد. در آن صورت واحدها می‌توانند علاوه بر افزایش سرعت تصمیم گیری، در ارسال فرمانها نیز سرعت کافی داشته باشند. پس از بازیابی، نیاز است تا ارتباطات سازمانی شبکه بازتولید گردد تا در صورت وقوع اتصالی‌های بعدی، امکان بازیابی مجدد شبکه وجود داشته باشد.

۲-۲- تولید ماتریس ارتباطات سازمانی اجزاء (عوامل سازمانی)

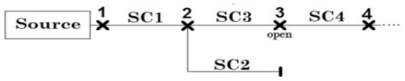
در شبکه‌های توزیع اجزاء اصلی متعددی از قبیل ترانسها، خطوط، کلیدها، رله‌ها و... وجود دارند. آنچه در زمان بازیابی و در اتخاذ تصمیمات اثرگذار آن، مهم می‌باشد، میزان بار، محل وقوع خطا (تعیین سکشن معیوب) و کلیدهای مرتبط با محل اتصالی می‌باشند. به بیان دیگر اجزاء یا عوامل سازمانی مهم مرتبط با این موضوع عبارتند از: خطوط، کلیدها و منابع تغذیه اصلی. منظور از منابع تغذیه اصلی همان پست‌های فوق توزیع است.

از نکات قابل توجه برای پیاده‌سازی آلگوریتم‌های بازیابی شبکه، وجود بسترهای جانبی و بانکهای اطلاعاتی مناسبی است که بتوان آخرین تغییرات شبکه را در آنها به سهولت ردیابی نمود. مهمترین و موثرترین این بسترها، محیط GIS می‌باشد که دارای برخی مزایای ذاتی برای شبکه‌های تأسیسات شهری مثل آب و برق است. از جمله این مزایا حفظ ارتباطات عناصر در هر لحظه در قالب اطلاعات دیجیتال و بانکهای اطلاعاتی استاندارد می‌باشد. محیط GIS می‌تواند در ساختن ماتریس ابتدایی شبکه که مشخص کننده ارتباطات عوامل سازمانی است، نقش بسزایی داشته باشد. با توجه به این امکانات در ادامه مراحلی برای بناکردن ماتریس شبکه پیشنهاد می‌گردد.

هر سکشن از شبکه دارای سکشنهایی در بالا و پایین دست می‌باشد. البته الزامی برای وجود هردوی آنها به صورت همزمان نیست. به عنوان مثال سکشن ته خط، دیگر پایین دستی ندارد اما حتما دارای سکشن بالا دست خواهد بود.

به همین ترتیب برای اولین سکشن فیدرها که منبعد سکشن تغذیه نامیده می‌شود، سکشن بالادستی وجود ندارد، اما سکشن پایین دست حتماً حضور خواهد داشت.

اگر سکشنی هم دارای بالادست و هم دارای پایین دست باشد، دارای دو کلید جداکننده[۸] و اگر سکشن آخر خط باشد دارای یک کلید جداکننده است. نکته مهم در تعریف سکشن ته خط آن است که چه از طریق خط هوایی و چه از طریق خط زمینی به قسمت دیگری از شبکه متصل نباشند. توضیح بیشتر برای این نکته را در شبکه نمونه شکل (۱) ارائه می‌کنیم. از آنجا که سکشن (SC2) به جایی ختم نمی‌شود، یک سکشن ته خط است، اما سکشن سوم (SC3) اگرچه باز هم در انتها باز است، سکشن ته خط نبوده و سکشن مانور (ارتباطی) محسوب می‌شود. در بازیابی خودکار سیستم، نیاز است بنای تعریف ماتریسهای شبکه به صورتی باشد که بسیاری از نیازها به صورت خودکار تولید گردند که از جمله آنها سکشن بالادست و پایین دست می‌باشد. بنا به توضیحات ارائه شده هر سکشن حداقل دارای یک کلید و حداکثر دو کلید می‌باشد. اگرکلیدها به صورتی تعریف گردند که کدامیک تغذیه کننده سکشن و کدامیک متصل‌کننده به سکشن بعدی است می‌تواند در تولید سکشن بالادست و پایین دست کمک نماید.

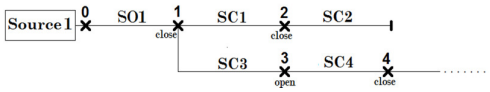


شکل (۱): شبکه نمونه برای تعریف سکشنهای ته خط و مانور

Fig. (1): A sample network to define ending sections and reconfiguration

در شکل (۲) سکشنهای SC1 و SC3 هردو از کلید ۱ تغذیه می‌گردند. SC2 پایین دست SC1 است اما SC4 پایین دست SC3 نمی‌باشد. این تعریف از آن لحاظ مهم است که اگر مسیر تغذیهٔ سکشنها در زمان بازیابی تغییر کند، سکشنهای بالا دست و پایین دست به صورت خودکار تولید می‌گردند. اگر در زمان بازیابی کلیدهای ۳ و ۴ تغییر وضعیت داده، به ترتیب باز و بسته شوند، SC3 تغذیه کنندهٔ SC4 خواهد بود. در نتیجه SC4 زیر مجموعهٔ منبع شماره (۱) می‌شود. تا این مرحله ماتریسی با پیکربندی شکل (۳) خواهیم داشت.

متعاقب تنظیم این اطلاعات به راحتی می‌توان منابع تغذیه شبکه را تشخیص داد. لازم به ذکر است که شماره کلیدهای ابتدای فیدر برای تشخیص بهتر توسط یک علامت منفی متمایز می‌شوند. با توجه به شکل (۲) اطلاعات اولیه به صورت ماتریس شکل(۴) وارد می‌گردند.



شکل (۲): مثالی برای نشان دادن ارتباطات سازمانی سکشنها

Fig. (2): An example of agents relationships

ستون اول	ستون دوم	ستون سوم	ستون چهارم	ستون پنجم
نام سکشن	نام کلید تغذیه کننده	وضعیت کلید	نام کلید ارتباطی	وضعیت کلید
....	....	....	....	....

شکل (۳): ماتریس ساختار اصلی شبکه

Fig. (3): Network main structure matrix

ستون اول	ستون دوم	ستون سوم	ستون چهارم	ستون پنجم
SO1	0	CLOSE	1	CLOSE
SC1	1	CLOSE	2	CLOSE
SC3	1	CLOSE	3	OPEN
SC4	4	CLOSE	3	OPEN

شکل (۴): نحوهٔ پر شدن ماتریس شکل (۳) برای شبکه شکل (۲)

Fig. (4): Filling matrix of Fig. (3) for the network of Fig. (2)

از این ماتریس استنتاجهای زیر حاصل می‌شوند:
SC2 پایین دست SC1 و یا بلعکس SC1 بالادست SC2 می‌باشد.
همچنین SO1 دارای سکشن بالادست نیست، بنابراین منبع تغذیه سیستم خواهد بود.
ستون ششم که نام سکشن بالادست است به صورت خودکار ساخته خواهد شد. در تعریف نقاط مانور می‌توان گفت سکشنی که بتواند از مسیر دیگر تغذیه شود قابلیت مانور دارد. بنابر این ماتریس ارتباطات شبکه شکل (۵) به صورت خودکار گسترش یافته و ستون هفتم که مشخص کننده کلید مانور در آن سکشن است اضافه می‌گردد. بنابراین اگر محتوای ستون برابر با ۱ باشد، سکشن مجهز به کلید مانور است.

ستون اول	ستون دوم	ستون سوم	ستون چهارم	ستون پنجم	ستون ششم
SC1	1	CLOSE	2	CLOSE	SO1
SC3	1	CLOSE	3	OPEN	SO1
SC2	2	CLOSE	5	CLOSE	SC1

شکل (۵): گسترش ماتریس ساختار اصلی شبکه
Fig. (5): Expansion if the network main structure matrix

برای تکمیل اطلاعات اولیهٔ ساختار شبکه، نیاز به دانستن بار هر سکشن، ظرفیت منابع تغذیه اصلی و ظرفیتهای مانوری است. مشخصاً بار هر سکشن می‌تواند از طریق نصب لوازم اندازه‌گیری در محل مناسبی در سکشن (زیر کلید تغذیه کننده) و یا به صورت آفلاین از طریق اجرای نرم افزارهای پخش بار تعیین گردد. ظرفیت منابع تغذیه اصلی نیز در ابتدای به مدار آمدن هر منبع بر اساس میزان ظرفیت جریان دهی منبع تعریف می‌گردد. به عبارت دیگر دو پارامتر قابل اندازه گیری هستند. اما پارامتر سوم که ظرفیت مانوری منابع تغذیه است بایستی به صورت خودکار و براساس ماتریس ساختاری شبکه محاسبه شود.
بنابر این به ماتریس شکل (۵) دو ستون "بار سکشن "و "ظرفیت منبع تغذیه" هم اضافه گردیده و ظرفیت مانوری در ماتریس دیگر ساخته می‌شود. به این ترتیب ماتریس" ساختار اصلی شبکه" که از این پس ماتریس A نامیده خواهد شد طبق شکل (۶) ایجاد می‌گردد.

ستون ۱	ستون ۲	ستون ۳	ستون ۴	ستون ۵	ستون ۶	ستون ۷	ستون ۸	ستون ۹	ستون ۱۰	ستون ۱۱
نام سکشن	نام کلید تغذیه کننده	وضعیت کلید تغذیه کننده	نام کلید ارتباطی	وضعیت کلید ارتباطی	بار سکشن	نام سکشن بالا دست	سکشن متصل به پست است؟	سکشن برقدار است؟	کلید مانور	ظرفیت جریان دهی
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

شکل (۶): ماتریس ساختار اصلی شبکه (A)
Fig. (6): Network main structure matrix

اکنون نوبت ایجاد ماتریس‌های تعمیم یافته برای مرکز یا مراکز کنترل است. اولین ماتریس، ماتریسی است که بتواند در یک نگاه پیکربندی را براساس منابع تغذیه، سکشنهای تحت تغذیه، ظرفیت آزاد مانوری به آن منبع و نام کلیدهای مانوری مربوط به آن منبع تشخیص دهد. به عبارت دیگر زمانی که رله‌های سکشن، وقوع اتصالی را تشخیص داده و کلیدهای دو طرف سکشن را باز می‌کنند، در مرکز کنترل مشخص گردد، چه سکشنی با چه میزان بار و از کدام منبع تغذیه از مدار خارج گردیده است. ایجاد چنین ماتریسی از ماتریس ساختار اصلی شبکه بر مبنای این واقعیت انجام می‌شود که در ماتریس اخیر منابع تغذیه سکشنها مشخص گردیده‌اند.
عملیات جستجو به صورت خودکار در ماتریس ساختار اصلی شبکه انجام می‌پذیرد. بدین صورت که اگر ستون هشتم دارای محتوای ۱ باشد، به معنی وجود منبع تغذیه تلقی می‌گردد. حال کافی است در ماتریس اصلی شبکه (ماتریسA) سکشن‌هایی که در ستون هفتم آنها (سکشن بالادست) نام منبع تغذیه مورد نظر آمده، استخراج گردند. بنابراین تمامی سکشنهای پایین دست منبع استخراج می‌شوند. همچنین با محاسبهٔ مجموع کل بار سکشنها و تفاضل آنها از ظرفیت منبع، ظرفیت قابل مانور منبع مورد نظر به دست می‌آید. از طرفی اگر در ماتریس ساختار اصلی شبکه دقت گردد در صورتی که محتوای ستون دهم (وجود امکان مانور) برابر ۱ باشد آنگاه کلیدهای مانور منبع مورد نظر نیز استخراج می‌شوند. بنابراین ماتریس "مشخصات منبع تغذیه" که از این پس ماتریس B نامیده می‌شود به صورت شکل (۷) ایجاد می‌گردد.

ستونهای n+2 تا m-ام	ستون n+1	ستونهای دوم تا n-ام	ستون اول
نام کلیدهای قابل مانور از طریق منبع	ظرفیت آزاد منبع جهت مانور	نام تمامی سکشنهای پایین دست منبع	نام منبع تغذیه
...	...	...	...

شکل (۷) : ماتریس مشخصات منبع تغذیه (ماتریسB)
Fig. (7): Power supply characteristics matrix (B)

نکته قابل توجه آن است که با خروج یک سکشن از شبکه به دلیل اتصالی، ظرفیت آزاد آن منبع زیاد نمی‌شود. زیرا ظرفیت بایستی برای همان سکشن بعد از رفع اتصالی باقی بماند.
ماتریس بعدی که می‌تواند در زمان اتصالی نقش بسزایی در تصمیم گیری‌های مراکز کنترل ایفای نقش کند، ماتریس "نقاط مانوری" است. در زمان بازیابی تعیین نقاط مانور شبکه ضرورت دارد. نقاط مانور لزوماً شامل مشخصات و خصوصیات زیر است:
۱- بار مورد نیاز را تامین نماید یا قسمتی از بار از دست رفته را بازیابی نماید
۲- با سکشنهای بی برق مرتبط باشند
۳- منطقه‌ای که دارای اتصالی است، نباید در مانور ظاهر شود.

بنابراین لازم است به صورت دینامیک و بر اساس آخرین تغییرات و با توجه به ماتریس B، ماتریس "پستهای مانوری" که از این پس ماتریس C نامیده می‌گردد، تولید شود. روش کار، استخراج نام کلیدهای مانور از ماتریسB است و با در نظر گرفتن ستون "ظرفیت آزاد " در ماتریس B و ستون "نام منبع" مشخص می‌گردد که منبع از طریق کدام کلید چه ظرفیت قابل مانوری را در دسترس دارد. همچنین با جستجوی نام کلید مورد نظر در دیگر سطرهای ماتریس B می‌توان مشخص نمود که کدام منبع می‌تواند از ظرفیت مانوری مذکور در زمان خطا استفاده نماید.

برای مشخص شدن نحوه تولید ماتریس C مثالی ارائه می‌کنیم. اگر ماتریس B به صورت شکل (۸) در نظر گرفته شود، ماتریس C به صورت شکل (۹) خواهد بود.

Source Name	Down Stream	Down 1	Down 2	Free Capacity	Tie 1	Tie 2	Tie 3	Tie 4
102	**SC1**	**SC2**	**SC6**	**10**	**56**	**2726**	**1716**	**710**
103	**SC4**	**SC3**	**SC7**	**31**	**2726**	**1112**	**1113**	**56**
104	**SC9**	**SC8**	**SC5**	**5**	**56**	**1112**	**2109**	**711**

شکل (۸): ماتریس B یک شبکه نمونه

Fig. (8): Matrix B for a sample network

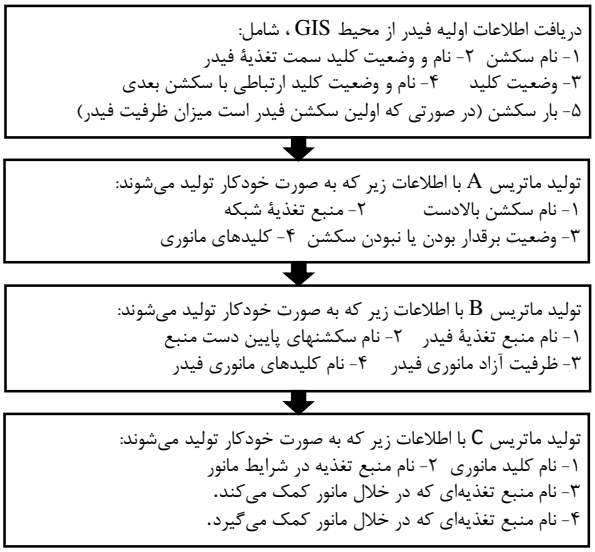
Tie	Source 1	Source 2	Transferable Capacity
56	**102**	**104**	**10**
56	**104**	**102**	**5**
2726	**102**	**103**	**10**
2726	**103**	**102**	**31**

شکل(۹): ماتریس C برای شبکه شکل (۸)

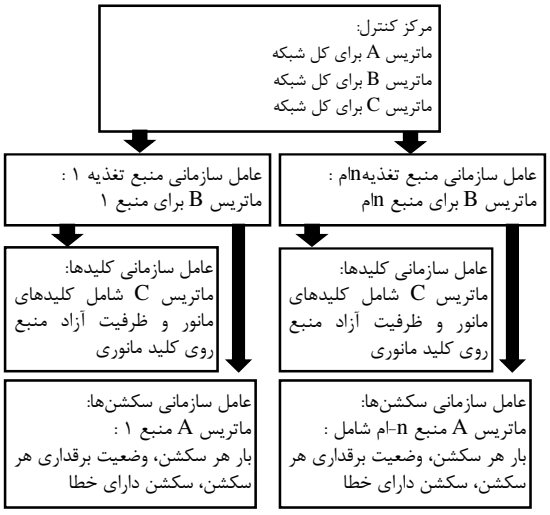
Fig. (9): Matrix C for the network shown in Fig. (8)

برای درک بهتر، نحوهٔ تولید ماتریسهای اساسی شبکه در فلوچارت شکل (۱۰) آمده است. همچنین نحوهٔ ارتباطات سازمانی اجزاء شبکه با یکدیگر و با مرکز کنترل در شکل (۱۱) آمده است. حال بایستی بر اساس یک آلگوریتم مناسب بتوان بعد از وقوع اتصالی بازیابی شبکه را مدیریت کرد. الگوریتم مورد نظر در شکل (۱۲) ارائه شده است. در این حالت پس از وقوع اتصالی ابتدا باید سکشن تحت خطا مشخص شود. برای مشخص شدن آن از این واقعیت استفاده می‌شود که تمامی بالادست‌ها، اتصالی را می‌بینند. بنابراین سکشنی که پایین دست‌تر از همه می‌باشد و اتصالی را دیده، قطعاً سکشن تحت اتصالی می‌باشد. برای روشن شدن موضوع مثالی در شکل (۱۳) آمده است.

با مشخص شدن سکشن معیوب، مجدداً با رجوع به ماتریسA، کلیدهای دو طرف سکشن معیوب باز شده و براساس اطلاعات ماتریس مذکور، مناطق زیر دست سکشن، تبدیل به سکشن بی برق می‌گردند.



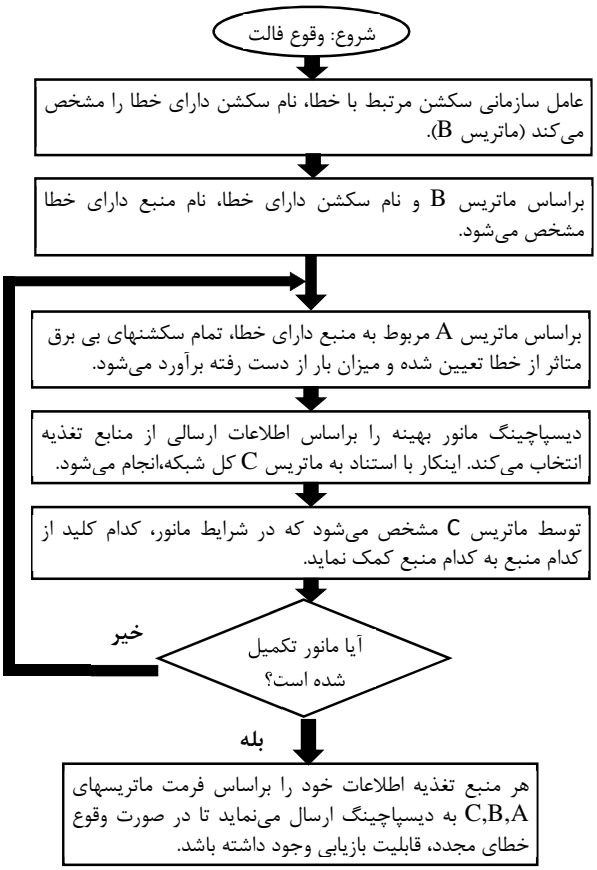
شکل (۱۰): نحوه تولید ماتریسهای اساسی



شکل (۱۱): ارتباطات سازمانی اجزاء شبکه

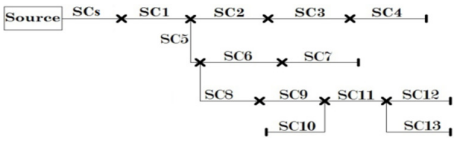
Fig. (11): Agents relationship for the networks elements

مثلاً در صورت معیوب شدن سکشن ۸ در شبکه شکل (۱۳) این سکشنها عبارتند: ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲و ۱۳. با رجوع به ماتریس B مشخص می‌گردد که کدام منبع تغذیه بارهای خود را ازدست داده که در اینجا مشخصاً همان سکشن منبع SCs می‌باشد. حال با توجه به بارهای ثبت شده در ماتریس A کل بار از دست رفته نیز مشخص می‌گردد. بنابراین درگام اول "منطقه معیوب "مشخص می‌گردد. در گام دوم کلیدهای دو طرف اتصالی باز شده و "قفل" می‌گردند. در گام سوم مشخص می‌گردد کدام منبع بارهای خود را از دست داده است (ماتریس B). در گام چهارم میزان بار از دست رفته به دست می‌آید. حال برای انجام عملیات مانور به ماتریس C رجوع شده و در ستون سوم آن که نام منبعی است که قرار است انرژی خود را بازیابی نماید، منبع تغذیه مواجه با اتصالی جستجو می‌شود، به شرط آن که ظرفیت مانور از میزان بار از دست رفته بیشتر باشد.



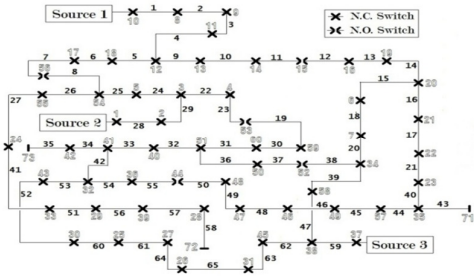
شکل (۱۲): الگوریتم بازیابی شبکه

Fig. (12): Network restoration matrix



شکل (۱۳): مثالی برای بیان نحوه تشخیص محل اتصالی

Fig. (13): An example for fault locating



شکل (۱۴): مثالی برای بیان بین آلگوریتم پیشنهادی

Fig. (14): An example to show the proposed algorithm

۳- شبیه سازی یک شبکه نمونه

شبکه‌ای را شامل سه فیدر توزیع از سه پست فوق توزیع مانند شکل (۱۴) در نظر بگیرید.

با توجه به توضیحات ارائه شده، برنامه‌ای در محیط Matlab نوشته شد. با اجرای این برنامه ماتریس‌های ساختار اصلی شبکه (A)، مشخصات منابع تغذیه (B) و پستهای مانوری (C) به ترتیبی که در جداول (۱،۲و۳) آمده‌اند، به دست آمد.

فرض کنیم خطایی در سکشن ۱۴ اتفاق بیفتد. کلیدهای۱۹و۲۰ باز شده و سکشن‌های ۱۲،۱۳و۱۴ بی برق می‌شوند. تنها مسیر مانور، از طریق سکشن ۱۱ و کلید ۱۵ می‌باشد. با اجرای الگوریتم پیشنهادی و وجود ظرفیت آزاد در منبع (۲)، بار از دست رفتهٔ سکشنهای ۱۲و۱۳ از طریق مسیر ذکر شده مجدداً برق دار می‌گردد.

ماتریسهای A و B و C جدید شبکه به صورت جداول (۴ و ۵ و ۶) توسط آلگوریتم پیشنهادی تولید می‌شوند. این در واقع همان ساختار بازیابی شدهٔ شبکه است. برای محک زدن صحت کار آلگوریتم بلافاصله بعد از خطای اول و در شرایطی که آرایش بازیابی شده در شبکه حکمفرماست، فرض می‌کنیم خطایی دیگر روی سکشن ۱۱ رخ دهد. واضح است که شبکه هیچ گونه پیشنهادی که بتواند بازیابی کامل شبکه را انجام دهد ندارد و لاجرم بخشی از آن بی برق خواهد ماند.

از جداول (۴ و ۵ و ۶) مشخص است که سکشن‌های ۱۲،۱۳و۱۴ بی برق شده‌اند و میزان بار از دست رفته برابر ۳۹ آمپر می‌باشد همچنین با توجه به جدول (۳) منبعی که برای مانور انتخاب شده منبع (۱) با واسطهٔ کلید ۱۵ است. حال الگوریتم بازیابی را اجرا می‌کنیم. برای این منظور کلید مانوری ۱۵ بسته شده و کلیدهای مواجه با خطا یعنی ۲۰و۱۹ باز می‌شوند. ماتریس A به صورت جدول (۴) در می‌آید. از این جدول مشخص می‌شود که در سکشن ۱۲ کلید تغذیه کننده پس از مانور از ۱۶ به ۱۵ تغییر یافته است. همچنین کلید تغذیه کنندهٔ سکشن ۱۳ از ۱۹ به ۱۶ تغییر یافته و برای ایزوله کردن خطا، کلید ۱۹ از سمت سکشن۱۴ باز شده است. از ماتریس B در حالت جدید، که در جدول (۵) آمده، مشخص می‌شود که ظرفیت آزاد منبع (۱) به دلیل مانور و برقدار کردن سکشن‌های بی برق ۱۲ و ۱۳ از ۹۴۲ آمپر به ۹۱۷ آمپر کاهش یافته است. سکشن‌های ۱۲ و ۱۳ که در جدول (۲) قبل از خطا زیر مجموعه منبع شماره (۳) بودند نیز به صورت خودکار پس از مانور در ماتریس B جدید یعنی جدول (۵) زیر مجموعه منبع شماره (۱) شده‌اند. از جدول (۶) مشخص می‌شود که دیگر کلید ۱۵ در مانور دخیل نیست. همچنین ظرفیت مانوری کلید ۵۶ از ۹۴۲ به ۹۱۷ و ظرفیت کلیدهای ۴۴،۵۲ و ۵۳ با این که مقداری از بار منبع شماره (۳) رفته کماکان ۱۹۶۸ باقی مانده و زیادتر نشده زیرا بعد از رفع عیب باید مجدد بار خود را تغذیه نماید. برای مقایسهٔ روش پیشنهادی با روشهای قبلی یکی از مهمترین ملاکها زمان انجام آلگوریتم است. با توجه به سادگی روش چند عاملهٔ پیشنهادی و عدم نیاز آن به روشهای تکرار یا روشهای هوش مصنوعی، سرعت آن بسیار زیاد است. برای نمونه مقایسه‌ای بین این روش و روش معرفی شده در [۹] که یکی از بهترین مراجع شرح داده شده در مقدمه بود، انجام شد. در شرایطی که زمان عنوان شده برای بازیابی شبکه مورد استفاده در [۹] در بهترین شرایط بالاتر از ۲۰ ثانیه بوده است، برای همان شبکه با روش پیشنهادی این مقاله در ۳/۲ میلی‌ثانیه طرح بازیابی به دست آمد.

Table (1): Matrix A for the network shown in Fig. (14)

جدول (۱) : ماتریس A برای شبکه شکل (۱۴)

1	-10	1	8	1	1	0	1	1	0	1000
2	8	1	9	1	2	1	0	1	0	0
3	9	1	11	1	3	2	0	1	0	0
4	11	1	12	1	4	3	0	1	0	0
5	12	1	18	1	5	4	0	1	0	0
6	18	1	17	1	6	5	0	1	0	0
7	17	1	56	0	7	6	0	1	1	0
8	54	1	56	0	8	25	0	1	1	0
9	12	1	13	1	9	4	0	1	0	0
10	13	1	14	1	10	9	0	1	0	0
11	14	1	15	0	11	10	0	1	1	0
12	16	1	15	0	12	13	0	1	1	0
13	19	1	16	1	13	14	0	1	0	0
14	20	1	19	1	14	15	0	1	0	0
15	6	1	20	1	15	18	0	1	0	0
16	20	1	21	1	16	15	0	1	0	0
17	21	1	22	1	17	16	0	1	0	0
18	7	1	6	1	18	20	0	1	0	0
19	59	1	53	0	19	30	0	1	1	0
20	34	1	7	1	20	39	0	1	0	0
21	22	1	23	1	21	17	0	1	0	0
22	3	1	4	1	22	29	0	1	0	0
23	4	1	53	0	23	22	0	1	1	0
24	3	1	5	1	24	29	0	1	0	0
25	5	1	54	1	25	24	0	1	0	0
26	54	1	55	1	26	25	0	1	0	0
27	55	1	24	1	27	26	0	1	0	0
28	-1	1	2	1	28	0	1	1	0	1200
29	2	1	3	1	29	28	0	1	0	0
30	60	1	59	1	30	31	0	1	0	0
31	51	1	60	1	31	32	0	1	0	0
32	40	1	51	1	32	33	0	1	0	0
33	41	1	40	1	33	42	0	1	0	0
34	41	1	42	1	34	42	0	1	0	0
35	42	1	73	0	35	34	0	1	0	0
36	51	1	50	1	36	32	0	1	0	0
37	50	1	52	0	37	36	0	1	1	0
38	34	1	52	0	38	39	0	1	1	0
39	58	1	34	1	39	47	0	1	0	0
40	23	1	35	1	40	21	0	1	0	0
41	24	1	33	1	41	27	0	1	0	0
42	32	1	41	1	42	53	0	1	0	0
43	35	1	71	0	43	40	0	1	0	0
44	35	1	57	1	44	40	0	1	0	0
45	57	1	49	1	45	44	0	1	0	0
46	49	1	46	1	46	45	0	1	0	0
47	38	1	58	1	47	59	0	1	0	0
48	46	1	47	1	48	64	0	1	0	0
49	47	1	48	1	49	48	0	1	0	0
50	48	1	44	0	50	49	0	1	1	0
51	33	1	29	1	51	41	0	1	0	0
52	30	1	43	1	52	60	0	1	0	0
53	43	1	32	1	53	52	0	1	0	0
54	32	1	36	1	54	53	0	1	0	0
55	36	1	44	0	55	54	0	1	1	0
56	29	1	39	1	56	51	0	1	0	0
57	39	1	28	1	57	56	0	1	0	0
58	28	1	72	0	58	57	0	1	0	0
59	-37	1	38	1	59	0	1	1	0	3580
60	25	1	30	1	60	61	0	1	0	0
61	27	1	25	1	61	64	0	1	0	0
62	38	1	45	1	62	59	0	1	0	0
63	45	1	31	1	63	62	0	1	0	0
64	26	1	27	1	64	65	0	1	0	0
65	31	1	26	1	65	63	0	1	0	0

Table (2): Matrix B for the network shown in Fig. (14)

جدول (۲): ماتریس B برای شبکه شکل (۱۴)

-10	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	942	56	15	0	0	0
-1	28	29	22	23	24	25	26	27	41	51	56	57	58	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	725	53	56	0	0	0
-37	59	47	62	39	63	65	20	38	64	18	61	15	16	17	21	40	43	44	45	46	48	49	50	60	14	52	53	54	55	13	42	12	33	34	35	32	36	37	31	30	19	1968	52	44	44	15	52

Table (3): Matrix A for the network shown in Fig. (14)

جدول (۳): ماتریس C برای شبکه شکل (۱۴)

			56	-10	-1	942
			15	-10	-37	942
			53	-1	-37	725
			56	-1	-10	725
			52	-37	-37	1968
			44	-37	-37	1968
			15	-37	-10	1968
			53	-37	-1	1968

۴- نتیجه گیری

در این مقاله روشی چند عامله برای بازیابی هوشمند شبکه‌های توزیع ارائه شد که با توجه به طراحی شدن آن بر اساس جدول‌بندی ماتریسی اطلاعات شبکه، برای پیاده‌سازی در محیط GIS بسیار مناسب است. اطلاعات دیجیتال موجود در محیط GIS برای تشکیل سه ماتریس مناسب که بتواند نوعی بینایی شبکه را برای کامپیوتر فراهم آورند به کار رفت. با اجرای آلگوریتم برای یک شبکه توزیع پیچیده دقت و توانایی آن در گزینش استراتژی بهینهٔ بازیابی تست شد. چون این روش از هیچ آلگوریتم محاسباتی پیچیده‌ای استفاده نمی‌کند سرعت آن بسیار عالی است و برای شبکه‌های توزیعی که مجهز به بستر مخابراتی مناسب برای مانیتورینگ و فرمان از راه دور هستند کاملاً مفید است.

Table (4): Matrix A for the network of Fig. (14) after fault in section 14

جدول (۴): ماتریس A برای شبکه شکل (۱۴) پس از خطا در سکشن ۱۴

1	-10	1	8	1	1	0	1	1	0	1000	0
2	8	1	9	1	2	1	0	1	0	0	0
3	9	1	11	1	3	2	0	1	0	0	0
4	11	1	12	1	4	3	0	1	0	0	0
5	12	1	18	1	5	4	0	1	0	0	0
6	18	1	17	1	6	5	0	1	0	0	0
7	17	1	56	0	7	6	0	1	1	0	0
8	54	1	56	0	8	25	0	1	1	0	0
9	12	1	13	1	9	4	0	1	0	0	0
10	13	1	14	1	10	9	0	1	0	0	0
11	14	1	15	1	11	10	0	1	1	0	0
12	15	1	16	1	12	11	0	1	1	0	0
13	16	1	19	1	13	12	0	1	0	0	0
14	20	0	19	0	14	15	0	1	0	0	1
15	6	1	20	1	15	18	0	1	0	0	0
16	20	1	21	1	16	15	0	1	0	0	0
17	21	1	22	1	17	16	0	1	0	0	0
18	7	1	6	1	18	20	0	1	0	0	0
19	59	1	53	0	19	30	0	1	1	0	0
20	34	1	7	1	20	39	0	1	0	0	0
21	22	1	23	1	21	17	0	1	0	0	0
22	3	1	4	1	22	29	0	1	0	0	0
23	4	1	53	0	23	22	0	1	1	0	0
24	3	1	5	1	24	29	0	1	0	0	0
25	5	1	54	1	25	24	0	1	0	0	0
26	54	1	55	1	26	25	0	1	0	0	0
27	55	1	24	1	27	26	0	1	0	0	0
28	-1	1	2	1	28	0	1	1	0	1200	0
29	2	1	3	1	29	28	0	1	0	0	0
30	60	1	59	1	30	31	0	1	0	0	0
31	51	1	60	1	31	32	0	1	0	0	0
32	40	1	51	1	32	33	0	1	0	0	0
33	41	1	40	1	33	42	0	1	0	0	0
34	41	1	42	1	34	42	0	1	0	0	0
35	42	1	73	0	35	34	0	1	0	0	0
36	51	1	50	1	36	32	0	1	0	0	0
37	50	1	52	0	37	36	0	1	1	0	0
38	34	1	52	0	38	39	0	1	1	0	0
39	58	1	34	1	39	47	0	1	0	0	0
40	23	1	35	1	40	21	0	1	0	0	0

41	24	1	33	1	41	27	0	1	0	0	0
42	32	1	41	1	42	53	0	1	0	0	0
43	35	1	71	0	43	40	0	1	0	0	0
44	35	1	57	1	44	40	0	1	0	0	0
45	57	1	49	1	45	44	0	1	0	0	0
46	49	1	46	1	46	45	0	1	0	0	0
47	38	1	58	1	47	59	0	1	0	0	0
48	46	1	47	1	48	46	0	1	0	0	0
49	47	1	48	1	49	48	0	1	0	0	0
50	48	1	44	0	50	49	0	1	1	0	0
51	33	1	29	1	51	41	0	1	0	0	0
52	30	1	43	1	52	60	0	1	0	0	0
53	43	1	32	1	53	52	0	1	0	0	0
54	32	1	36	1	54	53	0	1	0	0	0
55	36	1	44	0	55	54	0	1	1	0	0
56	29	1	39	1	56	55	0	1	0	0	0
57	39	1	28	1	57	56	0	1	0	0	0
58	28	1	72	0	58	57	0	1	0	0	0
59	-37	1	38	1	59	0	1	1	0	3580	0
60	25	1	30	1	60	61	0	1	0	0	0
61	27	1	25	1	61	64	0	1	0	0	0
62	38	1	45	1	62	59	0	1	0	0	0
63	45	1	31	1	63	62	0	1	0	0	0
64	26	1	27	1	64	65	0	1	0	0	0
65	31	1	26	1	65	63	0	1	0	0	0

Table (6): Matrix A for the network of Fig. (14) after fault in the section 14

جدول (۶): ماتریس C برای شبکه شکل (۱۴) پس از خطا در سکشن ۱۴

56	-10	-1	917
53	-1	-37	725
56	-1	-10	725
52	-37	-37	1968
44	-37	-37	1968
53	-37	-1	1968

Table (5): Matrix B for the network of Fig. (14) after fault in section 14

جدول (۵): ماتریس B برای شبکه شکل (۱۴) پس از خطا در سکشن ۱۴

-10	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	28	29	22	23	24	25	26	27	41	51	56	57	58	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-37	59	47	62	39	63	65	20	38	64	18	61	15	16	17	21	40	43	44	45	46	48	49	50

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	917	56	15	16	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	725	53	56	0	0	0	0
60	14	52	53	54	55	42	33	34	35	32	36	37	31	30	19	1968	52	44	19	44	52	53

پی‌نوشت:

1- Restoration
2- Network tracing
3- Load Shedding
4- Non-dominated sorting genetic algorithm-II
5- Multi Agent System
6- Feeder Remote Terminal Unit
7- Geographical Information System
8- Sectionalizing switch

References

[1] R. E. Perez-Guerrero, G. T. Heydt, "Distribution system restoration via subgradient-based lagrangian relaxation", IEEE Trans. Power Sys., Vol. 23, No. 3, pp. 1162-1169, Aug. 2008.

[2] M.I. Uspensky, I.V. Kyzrodev, "Combined method of a distribution network reconfiguration for power supply restoration", In Proc. IEEE Power Tech Conf., pp. 1-7, June 2005.

[3] M. Kovac, P. Bracinik, M. Hoger, M. Roch, "Autonomous power restoration of medium voltage distribution network", In Proc. ELEKTRO Conf., pp. 212-215, May 2012.

[4] W. Zhenyuan, V. Donde, Y. Fang, J. Stoupis, "A deterministic analysis method for back-feed power restoration of distribution networks", In Proc. Power & Energy Society General Meeting, 2009.

[5] J. Inagaki, J. Nakajima, M. Haseyama, "A multi-objective service restoration method for power distribution systems", In Proc. IEEE Int. Symp. Cir. and Sys., pp. 1-4, May 2006.

[6] Y. Kumar, B. Das, J. Sharma, "Multi-objective, multi-constraint service restoration of electric power distribution system with priority customers", IEEE Trans. Power Deli., Vol. 23, No.1, pp. 261-270, Jan. 2008.

[7] M.S. Tsai, "Development of an object-oriented service restoration expert system with load variations", IEEE Trans. Power Sys., Vol. 23, No. 1, pp. 219-225, Feb. 2008.

[8] J. Ghorbani, M.A. Choudhry, A. Feliachi, "A MAS learning framework for power distribution system restoration", In Proc. IEEE PES T&D Conf. and Exposition, pp. 1-6, 14-17, April 2014.

[9] I.H. Lim, Y.I. Kim, H.T. Lim, M.S. Choi, S. Hong, S.J. Lee, S.I. Lim, S.W. Lee, B.N. Ha, "Distributed restoration system applying multi-agent in distribution automation system", In Proc. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-7, 20-24 July 2008.