

# الگوریتم ابتکاری کارآمد برای حل مساله بازیابی در شبکه‌های توزیع الکتریکی با در نظر گرفتن حذف بار

میثم غلامی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، جمال مشتاق<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - e\_m\_gholami@yahoo.com

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - moshtagh79@yahoo.com

**چکیده:** بازیابی شبکه‌های توزیع پس از وقوع خطای اتصال کوتاه جز شرایط اضطراری در این شبکه‌ها محسوب می‌شود. به همین دلیل، بازیابی سریع و البته کارآمد شبکه در اسرع وقت به منظور افزایش قابلیت اطمینان شبکه، رضایت مصرف‌کنندگان و کاهش انرژی توزیع نشده، یکی از نیازهای مهم شبکه‌های توزیع محسوب می‌شود. در این مقاله یک روش ابتکاری سریع و کارآمد به منظور بازیابی شبکه‌های توزیع الکتریکی با در نظر گرفتن حذف بار ارائه شده است. به همین منظور چهار تابع هدف مختلف در نظر گرفته شده است. بیشترین مقدار بازیابی بار، کمترین تعداد عملکرد ممکن در تغییر وضعیت کلیدها، در نظر گرفتن حق تقدم مصرف‌کنندگان و کمترین مقدار حذف بار این توابع هدف می‌باشند. به منظور اطمینان از درستی نتایج در شرایط مختلف کار شبکه، سه سطح مصرف بار، برای بارهای مصرفی در نظر گرفته شده است. سریع و کارآمد بودن روش ارائه شده در شبکه توزیع بزرگ ۱۱۹ باسه استاندارد IEEE، مورد آزمایش قرار گرفته است. کارآمد بودن روش ارائه شده کمک می‌کند تا بهترین انتخاب در برنامه بازیابی شبکه‌های توزیع صورت گیرد.  
واژه‌های کلیدی: بازیابی سریع، وزن‌دهی کلیدها، حذف بار، شبکه توزیع.

## A New Effective Heuristic Algorithm for Solving Service Restoration Problem in Distribution Networks Considering Load Shedding

M. Gholami<sup>1</sup>, J. Moshtagh<sup>2</sup>

1, 2- Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

**Abstract:** After fault occurrence, service restoration in Power Distribution Networks (PDNs) is an emergency condition. Therefore, immediate restoration of out-of-service areas requires fast evaluation and effectiveness solution for keeping customer's satisfaction and increasing network's reliability. This paper proposes a fast and effective method based on a new heuristic algorithm for service restoration implementation in PDNs considering Load Shedding. The proposed problem formulation consists of four different objective functions: First, maximizing the amount of total load restored, second, minimizing the number of the switching operations, third, considering customer's priority, and finally, minimizing total Load Shedding. For showing the validity of results in different condition, three levels for load demand have been considered. The fastness and effectiveness of this approach has been tested on the IEEE 119-bus PDN.

**Keywords:** Fast Service Restoration, switches weighting, Load Shedding, Distribution Network.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۹/۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱/۲۳

نام نویسنده مسئول: میثم غلامی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سنندج - بلوار پاسدارن - دانشگاه کردستان - دانشکده فنی و مهندسی

## ۱- مقدمه

طول قطعی برق هست، بنابراین بازیابی شبکه توزیع بایستی در سریع‌ترین زمان ممکن صورت گیرد.

در گذشته کارهای زیادی برای هرچه بهتر انجام دادن بازیابی شبکه‌های توزیع صورت گرفته است. در مراجع [۶-۴] از روش‌های ابتکاری استفاده شده است. در این مراجع، سعی شده است کلیدهای شبکه با استفاده از الگوریتمی ابتکاری انتخاب شوند. در [۷] از منطق فازی به منظور مدل کردن متغیرهای مساله استفاده شده است. در این مرجع، برای تبدیل مساله با چند تابع هدف، به یک مساله‌ی یک هدفه، از یک ضریب وزن استفاده شده است. در این مرجع، بازیابی با استفاده از ظرفیت فیذر و انشعابات مجاور خطا صورت می‌گیرد که خود باعث افزایش تعداد عملیات کلیدزنی می‌شود؛ از طرفی منطق فازی تضمینی برای پیدا کردن جواب بهینه را نمی‌دهد. در [۸] از روش ژنتیک الگوریتم با رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است و برای کاهش زمان اجرای برنامه از ورژن سریع‌تر همین روش استفاده شده است. در این مرجع، شبکه به صورت یک گراف مدل شده است و متناسب با یک راه حل ابتکاری، نواحی مختلف گراف دسته‌بندی شده‌اند. در [۹] به بررسی بازیابی شبکه توزیع با در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان پرداخته شده است. اما در این مرجع، برنامه بازیابی شبکه توزیع به صورت ساده در نظر گرفته شده است. در مراجع [۱۴-۱۰] از تولیدات پراکنده در کنار برنامه بازیابی استفاده شده است. در مرجع [۱۱]، برنامه بازیابی با توجه به رعایت محدوده مجاز برای عملکرد تجهیزات اجرا شده است و در صورتی که این محدودیت نقض شود، از الگوریتم ژنتیک برای جایابی محل مناسب منابع تولید پراکنده (DG) استفاده می‌شود. در مرجع [۱۲]، بازیابی حداکثری بارهای بی‌انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با هدف کم کردن تلفات، افت ولتاژ، تعداد کلیدزنی، هزینه، آلودگی انجام شده است. در مرجع [۱۳]، تاثیر مکان و اندازه‌ی DG نصب‌شده در شبکه، در طول برنامه بازیابی از طریق باز آرای شبکه، مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۱۴]، از الگوریتم جستجوی ممنوعه برای بازیابی بار، با حضور DG استفاده شده است. در این مرجع، شبکه به صورت

جزیره‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است؛ هم‌چنین فرآیند بارزدایی در مساله بازیابی بار اجرا شده است. در [۱۵] کلیدهای شبکه بر اساس چهار شاخص وزن‌دهی می‌شوند و مطابق الگوریتمی ابتکاری به منظور بازیابی بارهای بی‌انرژی در لیست انتخاب قرار می‌گیرند.

در این مقاله، با الگوگرفتن از روش مطرح‌شده در مراجع [۴] و [۱۵]، از دو شاخص ابتکاری جدید برای وزن‌دهی به کلیدهای کاندیدا استفاده شده است. ویژگی‌های مهمی که در این مقاله در نظر گرفته شده است شامل: حذف بار، حق تقدم مصرف‌کنندگان، محدودیت ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط، متغیر بودن بار و کاهش زمان اجرای برنامه هست.

با توجه به گسترش روزافزون شبکه‌های توزیع در جهان، احتمال وقوع خطا و به دنبال آن وقوع خاموشی برای یک یا چند منطقه افزایش یافته است. سطح رضایت مصرف‌کنندگان انرژی و درآمد به دست آمده ناشی از فروش انرژی برای شرکت‌های توزیع کاملاً وابسته به قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع است. به منظور حفظ رضایت مصرف‌کنندگان انرژی و کاهش زیان ناشی از انرژی توزیع نشده برای شرکت‌های توزیع، بازیابی سریع پس از وقوع خطا در شبکه، امری ضروری محسوب می‌شود [۱]. تغییرات بار مصرفی در طول شبانه‌روز همواره وجود دارد که این موضوع در نحوه بازیابی شبکه‌های توزیع موثر خواهد بود. بنابراین، در طول بازیابی شبکه‌های توزیع تغییرات بار همواره بایستی در نظر گرفته شود. با توجه به تعداد زیاد کلید، خط و المان‌های مختلف در شبکه‌های توزیع، بازیابی بارهای بی‌انرژی با توجه به تجربیات گذشته امری مشکل و تقریباً نشدنی است [۲]. امروزه به منظور رفع مشکل فوق کامپیوترهای پیشرفته به کمک اپراتورهای شبکه‌های توزیع آمده‌اند [۳].

چگونگی اجرای سریع و البته کارآمد برنامه بازیابی بارهای بی‌انرژی با در نظر گرفتن حذف بار، هدف اصلی در این مقاله است. وقتی که خطای اتصال کوتاه در شبکه توزیع رخ می‌دهد، تجهیزات حفاظتی شبکه عمل می‌کنند و خطا را پاک‌سازی و سپس ایزوله می‌کنند. پس از ایزوله کردن خطا، شبکه توزیع به سه ناحیه متفاوت تقسیم می‌شود: ناحیه بالادست که از طریق همان فیذر اصلی تغذیه می‌شود. ناحیه پایین دست که طبق روش پیشنهادی از طریق فیذرها یا انشعابات مجاور مجدداً تغذیه می‌شود و ناحیه معیوب که پس از رفع خطا وارد شبکه می‌شود. در برنامه بازیابی همواره بایستی نکات مهمی در نظر گرفته شوند که خلاصه‌ای از این موارد در زیر آمده‌اند:

- مقدار بازیابی بارهای بی‌انرژی بایستی حداکثر شود.
- بازیابی شبکه‌های توزیع همواره با تغییر در وضعیت کلیدهای شبکه صورت می‌گیرد؛ بنابراین زمان اجرای برنامه بازیابی وابسته به تعداد کلیدزنی‌های شبکه می‌باشد. لذا برای اجرای سریع عملیات بازیابی، بایستی تعداد عملیات کلیدزنی در کم‌ترین تعداد ممکن باشد.
- بیمارستان‌ها، ایستگاه‌های آتش‌نشانی، پلیس و غیره، همواره از حق تقدم بالاتری در شبکه‌های توزیع برخوردار هستند. لذا در طول برنامه بازیابی این موضوع بایستی در نظر گرفته شود.
- مهم‌ترین قید شبکه‌های توزیع حفظ ساختار شعاعی شبکه با توجه به دلایلی مانند پیداشدن آسان محل خطا، ایزوله کردن راحت تر خطا و ایجاد هماهنگی بهتر بین تجهیزات حفاظتی است که این قید بایستی لحاظ شود.
- اندازه ولتاژ باس‌ها، جریان خطوط، و بارگذاری المان‌های شبکه توزیع در طول برنامه بازیابی دچار تغییر می‌شود. این قیود همواره بایستی در محدوده بهره‌برداری خود قرار گیرند.
- با توجه به اینکه سطح رضایت مصرف‌کنندگان وابسته به تعداد و

## ۲- توابع هدف مساله بازیابی

مساله بازیابی شبکه توزیع با در نظر گرفتن حذف بار به صورت یک مساله با چند تابع هدف و چند قید مدل سازی شده است. در این مقاله چهار تابع هدف در نظر گرفته شده است. بیشترین مقدار بازیابی بار، کمترین تعداد کلیدزنی، در نظر گرفتن حق تقدم مصرف کنندگان و کمترین مقدار حذف بار توابع هدف مساله می باشند که در زیر آمده است:

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

$$\max \sum_{k \in N_{HP}} L_k \quad (2)$$

$$\min N_{op} \quad (3)$$

$$\min \sum_{lsh \in N_p} L_{lsh} \quad (4)$$

که در آن:

- $L_k$  تعداد بارهای بازیابی شده؛
- $N_l$  تعداد باس های قابل بازیابی؛
- $N_{HP}$  باس های قابل بازیابی با حق تقدم بالا؛
- $N_{op}$  تعداد عملیات کلیدزنی؛
- $L_{lsh}$  مجموع مقدار حذف بار؛
- $N_{LP}$  باس ها دارای حق تقدم کم، می باشند.

## ۱-۲- قیود مساله بازیابی

(۱) حفظ ساختار شعاعی شبکه.

(۲) محدودیت ولتاژ باس ها:

$$V_{\min} < V_k < V_{\max} \quad (5)$$

در این رابطه  $V_k$  ولتاژ باس شماره  $k$  ام می باشد که بایستی در محدوده مجاز خود قرار گیرد.  
(۳) محدودیت جریان خطوط:

$$I_{\min} < I_j < I_{\max} \quad (6)$$

در این رابطه  $I_j$  جریان شاخه شماره  $j$  ام هست که بایستی در محدوده مجاز خود قرار گیرد.

قیود بهره برداری شبکه پس از اجرای برنامه پخش بار در شبکه محاسبه می شوند. در عمل مقدار مینیمم برای جریان خطوط در نظر گرفته نمی شود اما در حقیقت این مقدار صفر در نظر گرفته می شود [۸]. نحوه عملکرد و تاثیر این قیود در برنامه بازیابی، در فلوچارت الگوریتم ارائه شده (شکل (۳))، نشان داده شده است. به منظور بازیابی بارهای بی انرژی در این مقاله دو شاخص مهم برای رتبه بندی کلیدها تعریف شده اند. در این مقاله تمامی کلیدهای شبکه توزیع هوشمند الکتریکی به صورت اتوماتیک و کنترل از راه دور در نظر گرفته شده اند.

## ۳- رتبه بندی کلیدها

به منظور بهترین انتخاب برای کلیدهای کاندیدا در امر بازیابی بارهای بی انرژی، دو شاخص مهم در شبکه تعریف می شوند. در مرجع [۱۵] از چهار شاخص برای حل مساله استفاده شده است. شاخص اول، مقدار باری است که هر کلید می تواند با تغییر وضعیت خود (باز شدن) از شبکه حذف کند. شاخص دوم، ظرفیت رزرو هر کلید (tie switch) شبکه برای تغذیه مجدد بارهای بی انرژی است. در شاخص سوم، امیدانس مسیر بین هر کلید ts و باس های دیگر محاسبه می شود. شاخص چهارم، مقدار باری است که هر کلید سکشنالایزر (SS) می تواند با تغییر وضعیت خود به خطوط دارای کلید ts منتقل کند. کلیدهای شبکه، با توجه به این چهار شاخص وزن دهی می شوند و در الگوریتم ابتکاری مطرح شده در مقاله، قرار می گیرند. در این مرجع، هدف کمینه کردن مقدار بار بی انرژی، تعداد عملکرد کلیدها، مقدار حذف بار و رعایت حق تقدم مصرف کنندگان است. روش مطرح شده در این مرجع، روی شبکه بزرگ ۴۱۶ باسه مورد آزمایش قرار گرفته است. با مقایسه نتایج ارائه شده در این مرجع و نتایج به دست آمده از این مقاله، کارایی الگوریتم ارائه شده اثبات می گردد.

هسته شاخص ها و الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، کاهش افت ولتاژ در شبکه با ساختار جدید تحت رعایت توابع هدف و قیود مساله است. اولین و مهم ترین شاخص مورد نظر VD می باشد که متناسب با افت ولتاژ بین باس ابتدایی فیدر (پست تغذیه) و سمت اولیه کلید موجود در tie line (یا ts) است.

$$VD = \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{V} \quad (7)$$

که در آن:

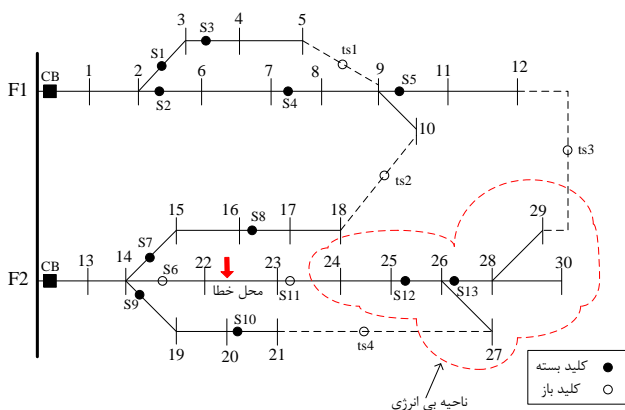
- $P_i$  مجموع بارهای اکتیو (پریونیت) بین باس ابتدایی و سمت اولیه ts ام؛
- $Q_i$  مجموع بارهای راکتیو (پریونیت) بین باس ابتدایی و سمت اولیه ts ام؛
- $R_i$  مجموع مقاومت خطوط (پریونیت) بین باس ابتدایی و سمت اولیه ts ام؛
- $X_i$  مجموع اندوکتانس خطوط (پریونیت) بین باس ابتدایی و سمت اولیه ts ام؛

این شاخص مربوط به ناحیه بالادست خطا می باشد و برای باس های (بارهای) مسیر بین منبع تغذیه و باس متصل به سمت اولیه کلید کاندیدا محاسبه می شود. نحوه عملکرد این شاخص در شکل (۱) نشان داده شده است. در صورت وقوع خطا در نقطه A، ناحیه area بی انرژی می شود. برای بازیابی بارهای بی انرژی، کلید ts1 یکی از کاندیدها محسوب می شود. برای این کلید، VD، برای باس های ۵ و ۶ محاسبه می شود (dir1). کلید ts3 یکی دیگر از کلیدهای کاندیدا است. برای این کلید، VD برای باس های ۱۰، ۱۲ و ۱۳ محاسبه می شود.

#### ۴-۱- مرحله اول (ایزوله کردن خطا)

در برنامه ارائه شده در این مقاله، پس از وقوع خطا در هر شبکه توزیع الکتریکی، خط خطا دیده، باس فرستنده و باس گیرنده خط مذکور مشخص می‌شوند. برای ایزوله کردن خطا، باس‌ها و خطوط مجاور خط دارای خطا در هر مسیر مجاور طی می‌شوند. با جستجو در مسیرهای مجاور طی شده، اولین کلیدها در هر مسیر به دست می‌آیند و باز می‌شوند. در نتیجه خطا ایزوله می‌شود و شبکه مورد مطالعه به سه ناحیه تقسیم می‌شود. ناحیه بالادست، که از طریق همان فیدر، با بسته شدن کلید مدارشکن (CB) ابتدای فیدر انرژی‌دار می‌شوند؛ ناحیه معیوب، که برای تعمیرات، از شبکه ایزوله می‌شود و ناحیه پایین دست، که مطابق الگوریتم پیشنهادی توسط فیدرها یا انشعابات مجاور (بسته به ساختار و توپولوژی شبکه مورد مطالعه) انرژی‌دار می‌شوند.

این مرحله در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل، یک شبکه توزیع ساده با دو فیدر را نشان می‌دهد. با وقوع خطا در محل مشخص شده، به هر دو سمت حرکت آغاز می‌شود و کلیدهای S6 و S11 برای ایزوله کردن خطا باز می‌شوند. با ایزوله کردن خطا بارهای متصل به باس‌های شماره ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹ و ۳۰ بی‌انرژی می‌شوند.



شکل (۲): شبکه توزیع شعاعی نمونه

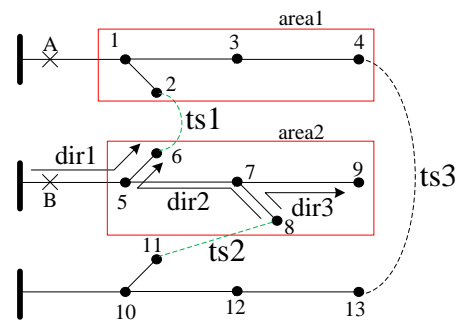
#### ۴-۲- مرحله دوم (ایجاد لیستی برای کلیدهای کاندیدا)

کلیدهای ts از کلیدهایی که مستقیماً به ناحیه بی‌انرژی متصل هستند انتخاب می‌شوند و کلیدهای سکشنالایزر از کلیدهای موجود در ناحیه پایین دست خطا انتخاب می‌شوند. در شکل (۲)، کلیدهای ts3، ts4، S12 و S13 کلیدهای کاندیدا برای اجرای برنامه بازیابی محسوب می‌شوند. برای هر کدام از کلیدهای ts انتخاب شده، VD و  $Z_{path}$  محاسبه می‌شوند. به منظور محاسبه VD برای کلید ts3، باس‌های ۱، ۲، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۱ و ۱۲ در رابطه (۷) قرار می‌گیرند. به منظور محاسبه  $Z_{path}$  برای همان کلید، مطابق رابطه (۸)، به طریق زیر عمل می‌شود.

$$Z_{path1} = Z(29-28) + Z(28-30)$$

$$Z_{path2} = Z(29-28) + Z(28-26) + Z(26-27)$$

$$Z_{path3} = Z(29-28) + Z(28-26) + Z(26-25) + Z(25-24)$$



شکل (۱): شبکه استاندارد ۱۶ باسه

شاخص دوم مربوط به ناحیه معیوب، بی‌انرژی یا پایین دست خطا است. این شاخص، امیدانس مسیر خطوط بین سمت ثانویه کلید ts کاندیدا و باس‌های انتهایی شبکه است (بر حسب پریونیت). این شاخص در رابطه (۸) تعریف شده است:

$$Z_{path} = \sum_{b \in N_{br}} Z_b \quad (8)$$

که در آن  $N_{br}$  معرف خطوط موجود در مسیر بین سمت ثانویه کلید ts کاندیدا و باس‌های انتهایی شبکه می‌باشد. نحوه عملکرد این شاخص نیز در شکل (۱) نشان داده شده است. در صورت وقوع خطا در نقطه B کلید ts2، یکی از کاندیداها برای بازیابی بارهای ناحیه area2 در این صورت شاخص دوم برای مسیرهای ۲ و ۳ (dir2 و dir3) محاسبه می‌شود. برای مسیر ۲، مجموع امیدانس خطوط ۷-۸، ۵-۶ و ۷-۹ برای مسیر ۳، مجموع امیدانس خطوط ۷-۸ و ۷-۹ در شاخص  $Z_{path}$  قرار می‌گیرند. استفاده از این دو شاخص به کاهش فضای جستجو و انتخاب بهترین برنامه بازیابی کمک بسیاری می‌کند. از طرفی هنگامی که فضای جستجو کاهش پیدا می‌کند، زمان اجرای برنامه بازیابی بارهای بی‌انرژی کاهش پیدا می‌کند. در واقع تفاوت اساسی، میان روش‌های ابتکاری و فراابتکاری در زمان اجرای برنامه هست. در روش‌های فراابتکاری، با توجه به گسترده بودن فضای جستجو، زمان بیش‌تری برای رسیدن به جواب مورد نیاز است. درحالی‌که روش ابتکاری ارائه شده در این مقاله، باعث کاهش فضای جستجو می‌شود. چگونگی استفاده از این دو شاخص در ادامه مقاله آمده است.

#### ۴- تشریح روش پیشنهادی

پس از وقوع خطای اتصال کوتاه در شبکه، کلید ابتدای فیدر به منظور پاک‌سازی خطا عمل می‌کند و پس از آن کلیدهای خطوط اطراف خطا به منظور ایزوله کردن خطا باز می‌شوند. سپس کلید ابتدای خط به منظور انرژی‌رسانی مجدد به ناحیه بالادست بسته می‌شود و برای ناحیه پایین دست خطا، از شاخص‌های تعریف شده در قسمت قبل استفاده می‌شود. این الگوریتم را می‌توان به صورت چهار مرحله در نظر گرفت که در زیر تشریح شده است.

که بعد از پایان اجرای آخرین کاندیدای حذف‌بار اهداف و قیود (حتی ولتاژ یکی از باس‌ها یا جریان یکی از خطوط) مساله رعایت نشوند، بایستی مرحله چهارم اجرا شود.

#### ۴-۴- مرحله چهارم (انتخاب کلید ts دیگر)

عضو بعدی لیست FI به منظور انتخاب کلید دیگر انتخاب می‌شود و بسته می‌شود. در این صورت یک حلقه در شبکه ایجاد می‌شود که باعث از بین رفتن ساختار شعاعی شبکه می‌شود. برای رفع مشکل فوق مسیری که باعث ایجاد حلقه در شبکه شده است شناسایی می‌شود و یک کلید SS در این مسیر انتخاب و باز می‌شود. در این صورت ساختار شعاعی شبکه نیز حفظ می‌شود. ساختار جدید شبکه شکل می‌گیرد و محاسبات پخش‌بار در شبکه جدید انجام می‌شود. در صورتی که تمام قیود مساله رعایت شوند برنامه بازبایی مشخص می‌شود. در غیر این صورت حذف بار مطابق مرحله قبل صورت می‌گیرد و دوباره پس از اجرای پخش‌بار اهداف و قیود شبکه، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در صورتی که تمام قیود مساله رعایت شوند برنامه بازبایی مشخص می‌شود؛ در غیر این صورت این مرحله برای انتخاب زوج کلید بعدی اجرا می‌شود. در صورتی که پس از انتخاب آخرین کلید ts از لیست FI و اجرای فرآیند حذف‌بار، اهداف و قیود مساله رعایت نشوند، هیچ برنامه‌ای برای بازبایی بار پیدا نخواهد شد. برای درک بهتر روش ارائه‌شده، فلوجارت الگوریتم مطرح‌شده در شکل (۳) نشان داده شده است.

به منظور محاسبه VD برای کلید ts4، باس‌های ۱۳، ۱۴، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ در رابطه (۷) قرار می‌گیرند. به منظور محاسبه  $Z_{path}$  برای همان کلید مطابق رابطه (۸)، به طریق زیر عمل می‌شود:

$$Z_{path1} = Z(27-26) + Z(26-25) + Z(25-24)$$

$$Z_{path2} = Z(27-26) + Z(26-28) + Z(28-29)$$

$$Z_{path3} = Z(27-26) + Z(26-28) + Z(28-30)$$

به منظور تبدیل این دو شاخص به یک شاخص نهایی از دو ضریب برای وزن‌دهی به هر کدام از شاخص‌ها استفاده شده است.

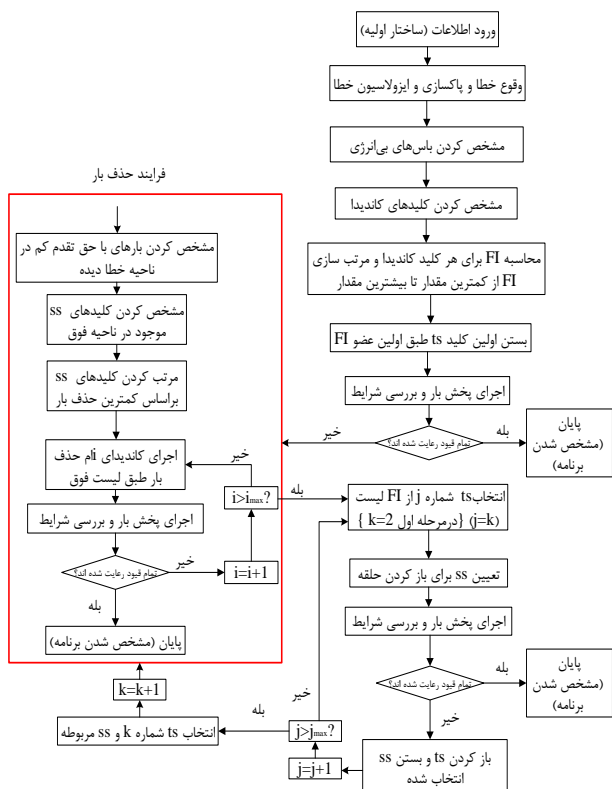
$$FI = \alpha VD + \beta \max(Z_{path}) \quad (9)$$

این دو ضریب مقداری بین صفر و یک دارند و می‌توانند توسط اپراتور شبکه توزیع مقادری شوند. در این مطالعه، به شاخص VD، ضریب ۰/۷ و به شاخص  $Z_{path}$  ضریب ۰/۳ اختصاص داده شده است. هر کلید ts تنها یک مقدار VD دارد در حالی که بسته به تعداد نقاط انتهایی ناحیه پایین‌دست خطا می‌تواند بیش از یک مقدار  $Z_{path}$  داشته باشد. لیست FI به ترتیب از کم‌ترین مقدار تا بیش‌ترین مقدار مرتب می‌شود.

#### ۴-۳- مرحله سوم (انتخاب اولین کلید ts)

اولین کلید ts با توجه به اولین عضو لیست FI که نشان‌دهنده کلید با کم‌ترین مقدار FI است انتخاب و بسته می‌شود. توپولوژی جدید شبکه شکل می‌گیرد و محاسبات پخش‌بار روی شبکه جدید صورت می‌گیرد. در این مقاله از پخش‌بار مطرح‌شده در مرجع [۱۶] استفاده شده است. در صورتی که بعد از اجرای پخش‌بار تمام توابع هدف و قیود مساله (مطابق آنچه که در قسمت دوم مطرح گردید) رعایت شوند، تعداد کلیدزنی‌های لازم و برنامه بازبایی مشخص می‌شود در غیر این صورت حذف‌بار صورت می‌گیرد. برای انجام فرآیند حذف‌بار، باس‌های با حق تقدم کم در ناحیه پایین‌دست شناسایی می‌شوند. در این مقاله، بارها به دو دسته با حق تقدم بالا و حق تقدم پایین، تقسیم شده‌اند. این دسته‌بندی در اطلاعات ورودی اولیه شبکه لحاظ گردیده است. بسته به میزان اهمیت بارها، نقاط مانور جهت اجرای برنامه حذف‌بار در نظر گرفته شده است. کلیدهای SS موجود در این ناحیه مشخص می‌شوند (با فرض اینکه تمام بارهای ناحیه بی‌انرژی حق تقدم پایین دارند، کلیدهای S12 و S13 برای خطای مشخص شده در شکل (۲) به دست می‌آیند). این کلیدها بر اساس کم‌ترین مقدار حذف‌بار مرتب می‌شوند. برای این منظور، مجموع مقدار بار متصل به باس‌های مابین کلید SS و نقاط انتهایی شبکه محاسبه می‌شود و در یک لیست ذخیره می‌شود.

بر اساس کم‌ترین مقدار حذف‌بار اولین کلید SS کاندیدا برای اجرای حذف‌بار باز می‌شود. مجدداً پخش‌بار در شبکه صورت می‌گیرد و اهداف و قیود مساله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که تمام اهداف و قیود شبکه رعایت شوند برنامه بازبایی مشخص می‌شود و در غیر این صورت کاندیدای بعدی حذف‌بار صورت می‌گیرد. در صورتی



شکل (۳): فلوجارت روش پیشنهادی

طبعاً وقوع خطا در شبکه در هر کدام از ساعات فوق، در نحوه اجرای برنامه بازیابی شبکه توزیع موثر خواهد بود. در این مقاله خطوط مهم شبکه برای هرچه بهتر نشان دادن الگوریتم پیشنهادی برای شبیه‌سازی خطا در نظر گرفته شده است. در این مقاله، تعداد کلیدزنی‌ها به منظور ایزوله کردن خطا و بازیابی بارهای بی‌انرژی، مقدار بارهای بی‌انرژی قبل و بعد از اجرای برنامه بازیابی و باس‌هایی که بی‌انرژی مانده‌اند به دست آمده‌اند. دیاگرام تک‌خطی شبکه مورد مطالعه (شبکه استاندارد ۱۱۹ باسه IEEE) در شکل (۴) نشان داده شده است. جدول (۲)، لیست مقادیر FI (برحسب پروینیت) را برای کلیدهای کاندیدای اجرای بازیابی، در محل‌های مختلف خطا نشان می‌دهد. در این مقاله، چهار محل خطا برای بررسی الگوریتم ارائه شده، در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): لیست مقادیر FI برای محل خطاهای مورد مطالعه

محل خطا	مقدار FI		
	ts(91-73)	ts(99-77)	ts(88-75)
66-67	FI=0.0371	FI=0.0651	FI=0.0482
	ts(25-35)	ts(49-62)	ts(43-54)
31-32	FI=0.0493	FI=0.0477	FI=0.0559
	ts(83-108)	ts(118-110)	-
103-104	FI=0.0240	FI=0.0208	-
	ts(58-96)	ts(73-91)	ts(77-99)
89-90	FI=0.0368	FI=0.0336	FI=0.0621

به منظور نشان دادن سریع و کارآمد بودن روش پیشنهادی، شبکه استاندارد ۱۱۹ باسه IEEE مورد مطالعه قرار گرفته است که در قسمت بعدی آمده است.

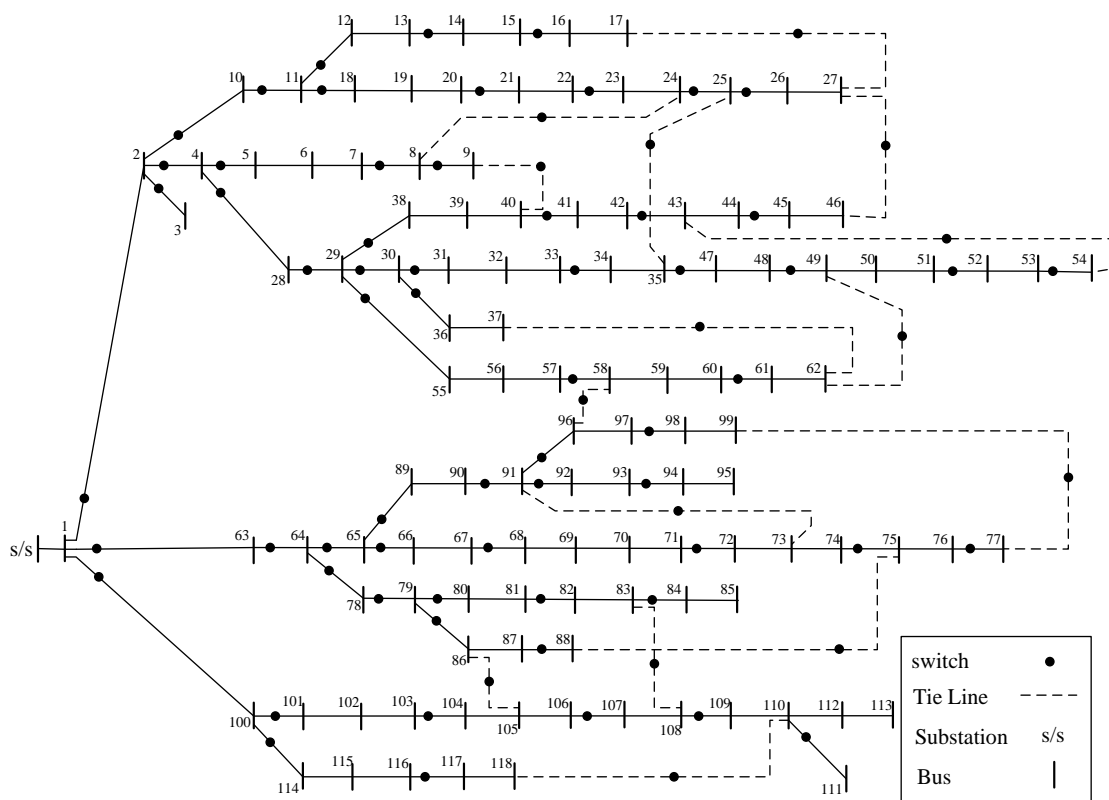
## ۵- مطالعه عددی

به منظور نشان دادن کارآمدی روش ابتکاری ارائه شده، شبکه توزیع بزرگ و استاندارد ۱۱۹ باسه IEEE مورد مطالعه قرار گرفته است. جزئیات شبکه توزیع مذکور در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): جزئیات شبکه توزیع مورد مطالعه

توان نامی (KV)	ولتاژ نامی (MVA)	مجموع بار شبکه (kw, kvar)		
		کم‌باری	پایه	پیک
۱۱	۱۰	۶۱۴۳،۴۷۳۵	۸۹۴۷،۶۸۴۴	۱۱۶۱۲،۸۹۸۴
۱۵	۶۳			

الگوریتم ارائه شده در این مقاله، در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده است. الگوی بار مصرفی به صورت سه سطح کم‌باری، بار پایه و پرباری یا بار پیک در نظر گرفته شده است. اولین سطح نشان‌دهنده ساعتی از شبانه‌روز است که مقدار مصرف توسط مصرف‌کنندگان در کم‌ترین حد خود قرار دارد. دومین سطح معرف ساعتی از شبانه‌روز است که مقدار بار مصرفی در حالت متوسط قرار دارد و سومین سطح معرف ساعات اوج مصرف انرژی می‌باشد.



شکل (۴): شبکه استاندارد ۱۱۹ باسه IEEE

بازیابی بارهای بی‌انرژی، سه عملیات کلیدزنی که در جدول نشان داده شده است مورد نیاز است. در مرحله اول، کلید ۶۲-۴۹، که کم‌ترین مقدار FI را مطابق جدول (۲) دارد، برای بسته‌شدن انتخاب می‌شود. با اجرای پخش‌بار در شبکه بازیابی شده، مشاهده می‌شود که باس‌های ۵۱، ۵۲، ۵۳ و ۵۴، دچار افت ولتاژ زیادی می‌شوند. با توجه به این که فرآیند حذف‌بار در این سناریو صورت نمی‌گیرد، کلید ts بعدی (کلید ۳۵-۲۵)، مطابق لیست FI در جدول (۲)، برای بسته شدن انتخاب می‌شود. با اجرای پخش‌بار در شبکه، مجدداً افت ولتاژ در باس‌های ۵۲، ۵۳ و ۵۴ مشاهده می‌شود. لذا این کلید به حالت قبلی خود (وضعیت باز) باز می‌گردد و کلید ts بعدی (کلید ۴۳-۵۴) که بزرگ‌ترین مقدار FI را مطابق جدول (۲) دارد، برای بسته‌شدن انتخاب می‌شود. در این شرایط، کلید ss موجود در خط ۵۲-۵۱ برای حفظ ساختار شعاعی شبکه، باز می‌شود. با اجرای برنامه پخش‌بار در شبکه بازیابی شده و بررسی اهداف و قیود شبکه، مشاهده می‌شود که برنامه بازیابی، به درستی اجرا شده است. زمان اجرای برنامه در این حالت (۱/۲۸ ثانیه)، نشان از سرعت اجرای برنامه دارد.

در این مطالعه، سه سناریو برای نشان دادن کارآمد بودن برنامه بازیابی ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفته است. سناریوی اول بررسی بازیابی شبکه‌های مورد مطالعه با الگوریتم پیشنهادی بدون در نظر گرفتن حذف‌بار است و بار شبکه در حالت پایه در نظر گرفته شده است. در سناریوی دوم بازیابی بارهای بی‌انرژی با در نظر گرفتن حذف‌بار مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی سوم بازیابی با در نظر گرفتن و حذف‌بار و سطوح مختلف بار، اجرا شده است. هر کدام از سناریوهای مذکور، نتایج قابل تامل و متفاوتی را ارائه می‌دهند که مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۵-۱- سناریوی اول

نتایج حاصل از این سناریو در جدول (۳) آمده است. چهار محل خطا برای بررسی الگوریتم بررسی شده‌اند. با وقوع خطا در خط بین باس‌های ۳۱ و ۳۲، ۱۸۶۳ کیلووات و ۱۴۶۰ کیلووار بار بی‌انرژی شده و دچار خاموشی می‌شوند. در این شرایط برای ایزوله کردن خطا دو کلید واقع در خطوط ۳۰ به ۳۱ و ۳۳ به ۳۴ باز می‌شوند. برای

جدول (۳): بازیابی بدون در نظر گرفتن حذف‌بار

حالات مورد بررسی	محل خطا	مقدار بار بی انرژی (kw, kvar)		تعداد کلیدزنی برای بازیابی	تعداد کلیدزنی برای ایزوله کردن خطا	کلیدهای مورد نیاز برای بازیابی	وضعیت بار	کلید برای حذف‌بار	زمان اجرا (S)
		قبل از بازیابی	بعد از بازیابی						
1	66-67	942, 638	0, 0	1	2	91-73	پایه	-	0.75
2	31-32	1863, 1460	0, 0	3	2	49-62, 43-54, 50-51	پایه	-	1.28
3	103-104	2006, 1397	0, 0	1	2	110-118	پایه	-	0.51
4	89-90	810, 668	0, 0	3	2	91-73, 58-96, 91-96	پایه	-	1.23

جدول (۴): بازیابی با در نظر گرفتن حذف‌بار

حالات مورد بررسی	محل خطا	مقدار بار بی انرژی (kw, kvar)		تعداد کلیدزنی برای بازیابی	تعداد کلیدزنی برای ایزوله کردن خطا	کلیدهای مورد نیاز برای بازیابی	وضعیت بار	کلید برای حذف‌بار	زمان اجرا (S)
		قبل از بازیابی	بعد از بازیابی						
1	66-67	942, 638	0, 0	1	2	91-73	پایه	-	0.75
2	31-32	1863, 1460	650, 425	2	2	49-62	پایه	51-52	0.93
3	103-104	2006, 1397	0, 0	1	2	110-118	پایه	-	0.53
4	89-90	810, 668	251, 205	2	2	91-73	پایه	91-92	1.34

جدول (۵): بازیابی با در نظر گرفتن حذف‌بار و شرایط مختلف کاری

حالات مورد بررسی	محل خطا	مقدار بار بی انرژی (kw, kvar)		تعداد کلیدزنی برای بازیابی	تعداد کلیدزنی برای ایزوله کردن خطا	کلیدهای مورد نیاز برای بازیابی	وضعیت بار	کلید برای حذف‌بار	زمان اجرا (S)
		قبل از بازیابی	بعد از بازیابی						
1	66-67	1436, 1208	0, 0	1	2	91-73	پیک	-	0.66
2	31-32	2442, 1878	825, 590	4	2	25-35, 35-47, 62-49	پیک	51-52	1.28
3	103-104	1650, 1110	0, 0	1	2	110-118	کم‌باری	-	0.65
4	89-90	530, 425	0, 0	1	2	91-73	کم‌باری	-	0.62

### ۵-۲- سناریوی دوم

نتایج حاصل از این سناریو در جدول (۴) آمده است. در این سناریو، فرآیند حذف بار صورت می‌گیرد. در صورت وقوع خطا در همان خط مورد بررسی در سناریوی اول، این بار با اجرای دو عملیات کلیدزنی و حذف مقدار ۷۵۳ کیلووات و ۵۲۷ کیلووار بار، می‌توان برنامه بازیابی را اجرا کرد. در این شرایط کلید واقع در خط بین باس‌های ۵۱ و ۵۲ به منظور حذف بار عمل می‌کند.

### ۵-۳- سناریوی سوم

نتایج حاصل از این سناریو در جدول (۵) آمده است. با بررسی همان محل مورد مطالعه در دو سناریوی قبلی، با این تفاوت که خطا در زمانی رخ دهد که مقدار مصرف در حالت اوج خود قرار دارد، تعداد عملیات کلید زنی افزایش می‌یابد. در این سناریو، بعد از انتخاب کلید ts اول و اجرای محاسبات پخش بار، مشاهده می‌شود که افت ولتاژ در تعدادی از باس‌های شبکه (۵۱، ۵۲، ۵۳ و ۵۴) وجود دارد؛ لذا کلید ts دوم، مطابق با دومین مقدار FI در جدول (۲) (کلید ۲۵-۳۵)، برای بسته شدن، انتخاب می‌شود. در این سناریو، فرآیند حذف بار صورت می‌گیرد. با اجرای فرآیند حذف بار در شبکه، تحت شرایط فوق و بررسی مجدد وضعیت شبکه، مشخص می‌شود که تمامی قیود شبکه رعایت شده‌اند، لذا برنامه بازیابی مشخص می‌شود.

با توجه به نتایج جدول‌های (۳)، (۴) و (۵)، و مقایسه این نتایج (زمان اجرای برنامه و تعداد کلیدزنی)، با نتایج ارائه شده در مراجع [۱]، [۲]، [۷]، [۸] و [۱۵]، کارایی الگوریتم ارائه شده مشخص می‌شود. هم‌چنین، نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی (از نظر زمان اجرای برنامه بازیابی) با نتایج تعدادی از مراجع در جدول (۶) مقایسه شده است.

جدول (۶): مقایسه زمان اجرای روش پیشنهادی و تعدادی از مراجع

روشنی	شبکه مورد بررسی	میانگین زمان اجرای برنامه (s)
مرجع [۲]	شبکه عمومی تایوان	۹/۰۵
مرجع [۸]	۳۲ باسه	۱۲/۴۶
	۱۷۳ باسه	۳۳/۴۴
مرجع [۱۷]	۳۷ باسه نامتعادل	۸۷/۸۵
روش پیشنهادی	۱۱۹ باسه	۱/۰۵

### ۶- نتیجه

در این مقاله، یک الگوریتم ابتکاری برای بازیابی سریع و کارآمد شبکه‌های توزیع پس از وقوع خطا و با در نظر گرفتن فرآیند حذف بار ارائه گردید. بیشینه کردن بارهای انرژی‌دار شده، کم‌ترین تعداد عملکرد برای کلیدها، در نظر گرفتن حق تقدم مصرف‌کنندگان و کم‌ترین مقدار حذف بار، جزء توابع هدف مساله مورد بررسی بودند. اساس روش ارائه

شده برای بازیابی شبکه، کاهش افت ولتاژ در ساختار نهایی شبکه بود. نهایتاً روش ارائه شده در شبکه توزیع بزرگ و استاندارد ۱۱۹ باسه IEEE مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج حاکی از سرعت مناسب و جواب بهینه برای برنامه بازیابی بارهای بی‌انرژی می‌باشد. نتایج به دست آمده از این روش به صورت خلاصه در زیر آمده است.

- ✓ مقدار بارهای بی‌انرژی قبل و بعد از اجرای برنامه بازیابی؛
- ✓ تعداد کلیدزنی‌های مورد نیاز برای ایزولاسیون خطا و اجرای برنامه بازیابی؛
- ✓ باس‌های بی‌انرژی ناشی از حذف بار.

### مراجع

- [1] L. Zhang and L. Sun, "Multi-Objective service restoration for blackout of distribution system with Distributed Generators based on multi-agent GA," ELSEVIER, Energy Procedia, Vol. 12, pp. 253-262, 2011.
- [2] C. Ming Huang, C. Tao Hsieh and Y. Shan Wang, "Evolution of radial basic function neural network for fast restoration of distribution systems with load variations," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 33, pp. 961-968, 2011.
- [3] S. Dimitrijevic and N. Rajakovicb, "An innovative approach for solving the restoration problem in distribution networks," Electric Power Systems Research, Vol. 81, pp. 1961-1972, 2011.
- [4] K. N. Miu, H.-D. Chiang, B. B. Yuan, and G. Darling, "Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 13, No. 3, pp. 789-795, Aug. 1998.
- [5] S. Toune, H. Fudo, T. Genji, Y. Fukuyama, and Y. Nakanishi, "Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems," IEEE Trans. Power Del., Vol. 17, No. 1, pp. 173-181, Jan. 2002.
- [6] K. Miu, H.-D. Chiang, and R. J. McNulty, "Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution systems," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 15, No. 3, pp. 1001-1007, Aug. 2000.
- [7] C. M. Huang, "Multi-objective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 18, No. 2, pp. 867-874, May 2003.
- [8] Y. Kumar, B. Das, and J. Sharma, "Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers," IEEE Trans. Power Del., Vol. 23, No. 1, pp. 261-270, Jan. 2008.
- [9] W. Li, P. Wang, Z. Li and Y. Liu, "Reliability evaluation of complex radial distribution systems considering restoration sequence and network constraints," IEEE Trans. Power Del., Vol. 19, No. 2, pp. 753-758, April. 2004.
- [10] T. T. H. Pham, Y. Bésanger, and N. Hadjsaid, "New challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 24, No. 1, pp. 398-406, Feb. 2009.
- [11] V. Kumar, R. H. C. Kumar, I. Gupta, and H. O. Gupta, "DG integrated approach for service restoration under cold load pickup," IEEE Trans. Power Del., Vol. 25, No. 1, pp. 398-406, Jan. 2010.



[۱۲] دارابی و نیاستی، بازیابی بار در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC)، تهران، ۱۴-۱۶م آبان ۱۳۹۲.

[13] Z. M. Yasin, T. K. Abdul Rahman and F. Kejuruteraan, "Service restoration in distribution network with distributed generation," IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED) , 27-28 June, 2006.

[۱۴] مرادخانی، حقی‌فام و محمدیان، بازیابی بار شبکه‌های توزیع در حضور تولید پراکنده با در نظر گرفتن منابع انرژی ذخیره‌ای، نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران، سال ۸م، شماره ۲م، تابستان ۱۳۸۹.

[15] M. R. Kleinberg, K. Miu and H. D. Chiang, "Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 3, pp. 1110-1117, Aug. 2011.

[16] P. M. De Oliveira-De Jesus, M. A. Alvarez and J. M. Yusta, "Distribution power flow method based on a real quasi-symmetric matrix," ELSEVIER, Electric Power Systems Research, Vol. 95, pp. 148-159, 2013.

[17] S. Khushalani, J. Solanki and N. Schulz, "Optimized restoration of unbalanced distribution systems," IEEE Trans. on Power Syst. Vol. 22, pp. 624-630, 2007.