



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 14, No. 1, 2023
Research Paper

Implementation of Hour-by-Hour Restoration Plan for Electrical Distribution Networks to improve Network Resiliency

Sasan Ghasemi ¹, Jamal Moshtagh ², Fateh Abdi ^{3*}

¹ Postdoctoral Researcher, Dept. of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran

² Associate Professor, Dept. of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran

³ Deputy of Planning and Engineering, Electric power distribution company of Kurdistan province, Kurdistan, Iran

Abstract:

After extreme natural events like earthquakes, storms, and floods, the electrical distribution network may be isolated from the upstream grid. In such a situation, the electrical power of the upstream grid is lost and the available microgrids (MGs) are the only power sources. Since the power outputs of MGs are restricted, restoring all de-energized loads is impossible and restoring critical loads (CLs) becomes the most important concern of the distribution network operators. Therefore, in this paper, a new hour-by-hour restoration strategy for CLs restoration after a blackout is proposed. The desired objective functions include restored energy and switching operations. The proposed restoration strategy presents a restoration plan for each hour of the outage period. The efficiency of the proposed strategy is carried out on an IEEE 123-bus distribution network and the simulation results confirm the superiority of the proposed hour-by-hour restoration strategy over the other conventional restoration methods.

Keywords: Distribution network restoration, Resiliency, Critical load, Microgrid.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/isee.2022.123070.1421>

مقاله پژوهشی

ارائه برنامه بازیابی ساعت به ساعت شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی به منظور بهبود

تاب‌آوری شبکه

ساسان قاسمی^۱، جمال مشتاق*^۲، فاتح عبدی^۳

۱- پژوهشگر پسادکتری، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق- دانشگاه کردستان - کردستان- ایران

sasan.ghasemi@eng.uok.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق- دانشگاه کردستان- کردستان- ایران

j.moshtagh@uok.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش قدرت، معاونت برنامه‌ریزی و مهندسی، شرکت توزیع نیروی برق

استان کردستان- کردستان- ایران

fatehabdi123@gmail.com

چکیده: پس از وقوع بلاهای طبیعی مانند طوفان، سیل و زلزله ممکن است ارتباط شبکه توزیع با شبکه اصلی از بین برود. در این شرایط، توان شبکه اصلی در دسترس نیست و تنها منابع تولیدی موجود در شبکه، ریزشکده‌های سالم باقی مانده‌اند. با توجه به اینکه توان تولیدی این منابع محدود است، کل بارهای بی‌برق شبکه را نمی‌توان بازیابی کرد و بازیابی بارهای حساس در اولویت اپراتورهای شبکه قرار می‌گیرد؛ از این رو، در این مقاله یک استراتژی جدید برای بازیابی ساعت به ساعت بارهای حساس شبکه پس از خاموشی سراسری شبکه به منظور بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع ارائه شده است. توابع هدف در نظر گرفته شده شامل انرژی بازیابی شده و تعداد کلیدزنی‌های شبکه‌اند. استراتژی پیشنهادی، برنامه‌های بازیابی بارهای حساس شبکه را به صورت ساعت به ساعت ارائه می‌دهد. روش پیشنهادی روی شبکه ۱۲۳ باسه توزیع IEEE تست شده است و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند برنامه بازیابی ساعت به ساعت پیشنهادی، نتایج بهتری را نسبت به برنامه‌های بازیابی متداول ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بازیابی شبکه توزیع، بار حساس، تاب‌آوری، ریزشکده

۱- مقدمه

مقابله با آنها و ترمیم خود» تعریف می‌شود [۲]. در این میان، دپارتمان انرژی آمریکا پنج بخش مختلف را برای بهبود تاب‌آوری شبکه تعریف کرده است که شامل بهبود معیارهای تاب‌آوری، تقویت طراحی سیستم، بهبود پاسخ و بازیابی شبکه، آنالیز و مدیریت پاسخ‌های متقابل شبکه است [۳]. در این مقاله برای بهبود تاب‌آوری شبکه به مقوله بهبود پاسخ و بازیابی شبکه توزیع با کمک ریزشکده‌های موجود پرداخته شده است. با توجه به اینکه توان تولیدی ریزشکده‌ها محدود است و همچنین، توان قابل تحویل آنها به شبکه اصلی در شرایط بحرانی نیز بسیار محدودتر است، این منابع تولیدی توانایی بازیابی تمامی بارهای بی‌برق شبکه

تاب‌آوری^۱ شبکه در مقابل بلاهای طبیعی شدید همچون زلزله، طوفان و سیل یکی از مسائل بسیار مهم و اساسی مدنظر در شبکه‌های هوشمند آینده است [۱]. تاب‌آوری به «توانایی شبکه برای آماده‌شدن و تطابق با تغییرات شرایط و

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶

نام نویسنده مسئول: جمال مشتاق

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کردستان - سنندج - دانشگاه

کردستان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

به مقدار چشمگیری افزایش داده است [۱۰، ۱۵]. در زمان خاموشی شبکه، ریزشبکه‌ها می‌توانند علاوه بر تغذیه بارهای محلی خود، سایر بارهای حساس شبکه را نیز برق‌دار کنند. بسته به مکان و میزان انرژی در دسترس و بار محلی ریزشبکه‌ها، توان قابل تحویل ریزشبکه‌ها به شبکه اصلی متغیر است [۱۰]. یک ریزشبکه برای اینکه بتواند در بازیابی بارهای حساس شبکه شرکت کند، علاوه بر اینکه باید ارتباط آن به شبکه توزیع دچار آسیب نشده باشد، باید دارای توان اضافی نیز باشد [۱۴]. این بدین معنی است که توان تولیدی آن باید بیشتر از توان موردنیاز بارهای محلی خود باشد.

در مرجع [۱۶] یک روش بر مبنای ریزشبکه‌های شبکه‌شده^۶ برای بازیابی بارهای حساس شبکه ارائه شده است. در این تحقیق، سیستم‌های ذخیره انرژی و واحدهای تولید پراکنده در پروسه بازیابی در نظر گرفته شده‌اند. در مراجع [۱۷-۱۹] به منظور بازیابی بارهای شبکه، به صورت موقتی ریزشبکه‌هایی توسط منابع تولید پراکنده موجود ایجاد شده‌اند. در مرجع [۲۰] بازیابی بارهای شبکه با کمک ریزشبکه‌های موجود و با در نظر گرفتن قیود عملی انجام شده است. در مرجع [۲۱] از ریزشبکه‌ها به عنوان منابع تولید انرژی با سرعت بالا در بازیابی بارهای شبکه پس از رخداد بلاهای طبیعی استفاده شده است که می‌توانند به کمک شبکه آیند و روند بازیابی را تسریع بخشند. بازیابی بارهای شبکه با روش جستجوی درختی^۷ در مرجع [۸] ارائه شده است. در مرجع [۲۲] از سیستم مانیتورینگ ناحیه گسترده^۸ در پروسه بازیابی بارهای حساس به منظور کمک به اپراتورهای شبکه برای پیاده‌سازی نقشه بازیابی براساس شرایط به موقع^۹ شبکه استفاده شده است.

هنگامی که ریزشبکه‌ها برای بازیابی بارهای حساس در نظر گرفته می‌شوند، قیود مختلفی همچون حداکثر انرژی قابل تحویل ریزشبکه، قیود دینامیکی منابع تولید پراکنده و پایداری ریزشبکه‌های جزیره‌ای شده [۲۳] را می‌توان در نظر گرفت که در این مقاله تنها قید حداکثر انرژی قابل تحویل ریزشبکه در نظر گرفته شده است.

یکی از مواردی که تعیین‌کننده وضعیت در دسترس بودن ریزشبکه و توان قابل تحویل آنها است، مقدار ذخیره

را ندارند؛ بنابراین، در شرایط پس از وقوع خطاهای شدید در شبکه و وقوع خاموشی سراسری که توان شبکه اصلی در دسترس نیست، از ریزشبکه‌ها برای بازیابی بارهای حساس شبکه استفاده می‌شود. بارهای حساس بارهایی هستند که با آسایش، امنیت و سلامت مشترکین در ارتباطند. از جمله بارهای حساس شبکه، مراکز درمانی و بیمارستان‌ها، مراکز پمپاژ آب، روشنایی معابر و مراکز ارتباط مخابراتی هستند.

از خاموشی‌های سراسری اخیر در جهان می‌توان به خاموشی رخ داده در سال ۲۰۱۲ در هند اشاره کرد که ۲۲ ایالت این کشور را در بر گرفت و بیشتر از ۶۷۰ میلیون از جمعیت این کشور را درگیر قطعی برق کرد [۴]. این خاموشی سراسری^۳ حدود ۳۲ گیگاوات از توان تولیدی شبکه قدرت هند را از دسترس خارج کرد [۴]. برای مثال، از خاموشی‌های سراسری بزرگ در جهان می‌توان به زلزله شدید سال ۲۰۱۱ ژاپن اشاره کرد که سبب خاموشی چندروزه شد [۵]. در طی این زمین‌لرزه، خسارت زیادی به شبکه برق توکیو، وارد و شبکه برق آن دچار خاموشی سراسری شد. در این شرایط ریزشبکه سنندای^۴ که در محوطه دانشگاه فوکوشی^۵ توکیو قرار دارد، توانست بسیاری از بارهای محلی و نزدیک به ریزشبکه را در مدت‌زمان قطعی برق شبکه اصلی برق‌دار کند [۵].

مطالعات زیادی در سال‌های اخیر در زمینه بازیابی بارهای حساس شبکه پس از وقوع خطاهای شدید در شبکه انجام شده است؛ شامل در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده (DG)، منابع ذخیره انرژی، ماشین‌های الکتریکی و ریزشبکه‌ها در پروسه بازیابی [۶-۱۰]. در مرجع [۱۱] یک روش بر مبنای سیستم چندعامله برای بازیابی اتوماتیک شبکه توزیع ارائه شده و در یک تحقیق مشابه در مرجع [۱۲] از سیستم چندعامله غیرمتمرکز برای بازیابی اتوماتیک بارهای بی‌برق استفاده شده است.

پس از وقوع خطاهای شدید در شبکه توزیع، روش‌های مرسوم بازیابی توانایی کافی در حل مسئله بازیابی را ندارند [۱۳، ۱۴]. روش‌های پیشرفته امروزی به استفاده از ریزشبکه‌ها به عنوان یک منبع اضطراری روی آورده‌اند که توانایی شبکه توزیع در کاهش اثرات خطاهای شدید را

شبکه و استفاده از واحدهای تولیدی سیار در مقاله [۳۰] بررسی شده است.

در جدول ۱، مشخصات مربوط به روش استفاده شده، توابع هدف، قیود، منابع انرژی، نوع بارها و کلیدهای در نظر گرفته شده در مقالات مربوط به بهبود تاب‌آوری و بازیابی بارهای شبکه توزیع آورده شده است.

در تمامی مقالات بالا یک برنامه بازیابی برای تمام زمان خاموشی پیشنهاد شده است. ارائه یک برنامه بازیابی ممکن است به خوبی زمان تغذیه بارهای حساس را براساس درجه اهمیت آنها مشخص نکند. یک برنامه بازیابی شامل یک یا چند مسیر بازیابی است و هر مسیر بازیابی از یک ریزشبکه شروع می‌شود و یک یا چند بار حساس را بازیابی می‌کند. در این مقاله یک روش بازیابی ساعت به ساعت پیشنهاد شده است که به خوبی درجه اهمیت بارهای حساس شبکه را با توجه به توابع هدف مسئله در نظر می‌گیرد. به صورت کلی مشخصه‌های اصلی این مقاله به قرار زیرند:

۱. ارائه روش جدید بازیابی ساعت به ساعت بارهای

حساس شبکه؛

۲. بازیابی بارهای حساس شبکه به منظور افزایش

تاب‌آوری شبکه؛

۳. در نظر گرفتن درجه اهمیت بارهای

مختلف شبکه.

سوخت و وضعیت باتری‌های^۱ ریزشبکه است که تعیین مقادیر آنها دقیقاً بعد از وقوع خطا کاری دشوار است [۲۴].

در مرجع [۲۵] وضعیت در دسترس بودن ریزشبکه‌های DC با در نظر گرفتن انواع ساختارهای مبدل‌ها تحقیق شده است. در [۲۴] از نمودار طول عمر منابع DG به منظور مشخص کردن وضعیت در دسترس بودن منابع تولید پراکنده ریزشبکه در شرایط پس از پاکسازی خطا استفاده شده است. در این مقاله در دسترس بودن حداکثر انرژی قابل تحویل ریزشبکه‌ها به منظور تأمین بارهای محلی خود و شرکت در بازیابی بارهای حساس در سناریوهای مختلف تحقیق شده است.

وضعیت کلیدهای شبکه و نوع آنها (دستی یا کنترل از راه دور) به صورت مستقیم بر زمان پیاده‌سازی نقشه‌های بازیابی تأثیر می‌گذارد. در مرجع [۲۶]، تأثیر اضافه کردن کلیدهای کنترل از راه دور به شبکه بر پروسه بازیابی تحقیق شده است. در مرجع [۲۷] هزینه مربوط به کلیدزنی‌های شبکه در پروسه بازیابی در نظر گرفته شده است. جایابی بهینه کلیدهای شبکه به منظور بازآرایی و بازیابی بهینه در [۲۸] آمده است. در مرجع [۲۹] یک روش بر مبنای روش مونته کارلو برای بازیابی بارهای شبکه و همچنین، یک شاخص جدید برای محاسبه تاب‌آوری شبکه ارائه شده است. بازیابی بارهای حساس شبکه پس از وقوع رخداد شدید در

جدول (۱): دسته‌بندی مقالات ارائه شده در زمینه افزایش تاب‌آوری و بازیابی شبکه‌های توزیع

ردیف	الف) روش	ب) تابع هدف										ج) قیود										د) منبع انرژی				ه) نوع بار	
		HE	SO	LS	MCB	RI	PF	LC	BV	FL	RC	LP	DGL	DGU	DC	MGs	DGs	DEKs	RCS	MCS	NCL	CL					
[۹]	HE	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					
[۱۱]	HE	✓						✓												✓							
[۱۲]	MAS							✓																			
[۱۳]	LIP																										
[۱۴]	MIP																										
[۱۷]	-																										
[۲۹]	HE																										
[۳۰]	MIP																										

الف) LIP: برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی، HE: ابتکاری، MIP: برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته، GBA: روش مبتنی بر گراف، MCB: روش مبتنی بر مونته کارلو، MAS: سیستم چندعامله

ب) RL: بار بازیابی شده، SO: تعداد کلیدزنی، LS: قطع بار، SWC: هزینه کلیدزنی، RI: شاخص قابلیت اطمینان

ج) PF: پخش بار، LC: قید جریان خط، BV: قید ولتاژ باس، FL: قید فرکانس، RC: قیود قابلیت اطمینان، LP: اهمیت بار، DGL: قیود DG، DGU: عدم قطعیت‌های DG، DC: قیود دینامیکی

د) RCS: کلید کنترل از راه دور، MCS: کلید دستی، NCL: بار غیر حساس، CL: بار حساس

$$f_1(t,t+1) = \sum_{j \in \Omega(t,t+1)} w_j E_{L_j}(t,t+1) \quad t, t+1 \in (T_s, T_e) \quad (1)$$

که مقدار انرژی بازیابی شده وزن دار در بازه زمانی t و $t+1$ است. $E_{L_j}(t,t+1)$ انرژی بازیابی شده بار j ام در بازه زمانی t و $t+1$ است و w_j نیز وزن بار j ام است. $\Omega(t,t+1)$ نیز شامل دسته بارهای بازیابی شده است. T_s زمان شروع پروسه بازیابی و T_e نیز زمان اتمام خاموشی شبکه است. با فرض اینکه یک برنامه بازیابی در بازه زمانی t و $t+1$ به مدت T_j^r ساعت بارهای شبکه را بازیابی می‌کند، کل انرژی بازیابی شده $(E_{L(t,t+1)})$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{L(t,t+1)} = \sum_{j \in \Omega(t,t+1)} E_{L_j}(t,t+1) = \sum_{j \in \Omega(t,t+1)} \int_t^{t+1} P_j(t) dt = \sum_{j \in \Omega(t,t+1)} \left(\int_t^{t+T_j^r} P_{j,(t,t+1)}^N dt + \int_{t+T_j^r}^{t+1} P_{j,(t,t+1)}^N dt \right) = \sum_{j \in \Omega(t,t+1)} P_{j,(t,t+1)}^N T_j^r \quad (2)$$

که $P_j(t)$ توان اکتیو مصرفی بار j ام در بازه زمانی t و $t+1$ است. با توجه به اینکه در بازه زمانی t و $t+1$ بار j ام به مدت T_j^r ساعت بازیابی شده و با فرض اینکه در این بازه زمانی توان مصرفی آن ثابت و برابر $P_{j,(t,t+1)}^N$ است، انرژی بازیابی شده بار j ام در بازه $t \in (t, t+T_j^r)$ برابر $P_{j,(t,t+1)}^N T_j^r$ است و در بازه زمانی $t \in (t+T_j^r, t+1)$ نیز برابر صفر است. پس تابع هدف اصلی شبکه شامل کل انرژی بازیابی شده وزن دار در طول زمان خاموشی شبکه به صورت معادله (۳) بیان می‌شود:

$$f_1 = \sum_{t=T_s}^{T_e-1} f_1(t,t+1) \quad (3)$$

برنامه بازیابی پیشنهادی در این مقاله به صورت ساعت به ساعت مشخص می‌شود؛ از این رو، به منظور کاهش تعداد دفعات تغییر ساختار شبکه در پروسه بازیابی که با تغییر در وضعیت کلیدهای شبکه، ساختار آن نیز تغییر می‌یابد، تعداد

سایر بخش‌های ارائه شده در این مقاله به این شرح‌اند؛ در بخش ۲ به توضیح مسئله بازیابی، توابع هدف و قیود مسئله پرداخته شده است. در بخش ۳ روش پیشنهادی در این مقاله برای حل مسئله بازیابی ارائه شده است. نتایج و مقایسه شبیه‌سازی کامپیوتری روش بازیابی پیشنهادی در این مقاله در بخش ۴ آمده است. سرانجام در بخش ۵، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- بیان مسئله بازیابی

پس از وقوع خطاهای شدید در شبکه، علاوه بر قطع ارتباط شبکه توزیع با شبکه اصلی، ممکن است برخی از خطوط و تجهیزات شبکه توزیع نیز دچار آسیب و از مدار خارج شوند. پس از پاکسازی خطا، گروه‌های تعمیراتی برای تعمیر یا تعویض تجهیزات آسیب‌دیده شبکه کار خود را شروع می‌کنند. در مدت‌زمان بین پاکسازی خطا و تعمیر تجهیزات آسیب‌دیده شبکه، بازیابی بارهای حساس شبکه یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های اپراتورهای شبکه توزیع است. بارهای حساس شامل مصرف‌کننده‌هایی است که با امنیت و سلامت مردم در ارتباط‌اند؛ مانند بیمارستان‌ها، مراکز پمپاژ آب، سرویس‌های مخابراتی، روشنایی معابر و مراکز فرودگاهی. مدت‌زمان مطالعه شده در این مقاله شامل زمان بین پاکسازی خطا و تعمیر تجهیزات آسیب‌دیده شبکه و برگشت به شرایط عادی شبکه است و همچنین، فرض شده است توان مصرفی بارهای شبکه در طول پروسه بازیابی ثابت است و تغییر نخواهد کرد. در ادامه، توابع هدف و قیود حاکم بر مسئله بازیابی بارهای حساس شبکه آمده‌اند.

۲-۱- توابع هدف

در شرایط بحرانی، به‌ویژه در زمان خاموشی شبکه، هدف اصلی اپراتورهای شبکه توزیع، بازیابی بیشترین مقدار ممکن بارهای حساس شبکه برای حداکثر زمان ممکن با در نظر گرفتن درجه اهمیت آنها است؛ از این رو، در این مقاله تابع هدف اصلی به صورت معادله (۱) پیشنهاد شده که در آن برای لحاظ کردن درجه اهمیت بارهای حساس مختلف شبکه از ضرایب وزنی استفاده شده است.

نشان‌دهنده حداکثر توان قابل عبور از فیدرهای شبکه است. قید (۱۲) شرط شرکت‌کردن ریزشبهه در پروسه بازیابی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در بخش مقدمه نیز بیان شد یک ریزشبهه زمانی می‌تواند در پروسه بازیابی شرکت کند که انرژی آن بیشتر از انرژی موردنیاز بارهای محلی خود $(E_{m,L}^{local})$ و انرژی رزرو (E_m^R) مدنظر آن باشد. قید دیگری که نیز باید در پروسه بازیابی لحاظ شود، قید شعاعی ماندن ساختار شبکه است. در این مقاله از روش ارائه‌شده در [۳۱] به‌منظور چک‌کردن وضعیت شعاعی ساختار شبکه استفاده شده است.

۳- حل مسئله بازیابی

در روش‌های متداول بازیابی بارهای حساس شبکه پس از وقوع خاموشی سراسری، یک برنامه بازیابی برای کل مدت خاموشی ارائه می‌شود [۶، ۸-۱۰، ۱۳-۱۵، ۲۸]. این برنامه بازیابی بر مبنای وضعیت ریزشبهه‌ها از لحاظ در دسترس بودن، توان قابل تحویل، ساختار شبکه و اهمیت بارهای حساس شبکه پس از پاکسازی خطا ارائه می‌شود. نقطه‌ضعف اصلی این دسته از روش‌های بازیابی زمانی مشخص می‌شود که در پروسه بازیابی، یک یا چند ریزشبهه به دلیل محدودیت در توان خروجی آنها نمی‌توانند در تمام مدت خاموشی در پروسه بازیابی شرکت کنند. در این شرایط، دیگر برنامه بازیابی که از ابتدای خاموشی ارائه شده است، برنامه بهینه نیست و به‌خوبی اهمیت بارهای حساس شبکه را در نظر نمی‌گیرد؛ از این‌رو، در این مقاله یک استراتژی بازیابی ساعت به ساعت ارائه شده است که ساعت به ساعت به‌روز می‌شود و اهمیت بارهای حساس شبکه را به‌خوبی در نظر می‌گیرد.

۳-۱- استراتژی بازیابی ساعت به ساعت

پیشنهادی

مراحل اصلی استراتژی پیشنهادی به شرح زیرند:
مرحله ۱: پیدا کردن تمام مسیرهای بازیابی: ابتدا تمامی مسیرهای بازیابی بین ریزشبهه‌ها و بارهای حساس شبکه با الگوریتم بلمن-فورد^[۳۲] محاسبه می‌شوند. این مرحله در

کلیدزنی‌های شبکه به‌عنوان تابع هدف کمکی در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اینکه با افزایش تعداد کلیدزنی، عمر مفید کلیدهای شبکه نیز کوتاه می‌شود، کاهش تعداد کلیدزنی‌های شبکه در پروسه بازیابی می‌تواند از لحاظ اقتصادی نیز برنامه بازیابی پیشنهادی را توجیه‌پذیر کند. تابع هدف ارائه‌شده در معادله (۴) تعداد کلیدزنی‌ها در هر بازه زمانی را محاسبه می‌کند.

$$f_2 = N_{sw}(t, t+1) \quad (4)$$

که $N_{sw}(t, t+1)$ بیان‌کننده تعداد کلیدزنی‌ها لازم برای پیاده‌سازی برنامه بازیابی پیشنهادی برای دوره زمانی t و $t+1$ است.

طبق توابع هدف ارائه‌شده با معادلات (۳) و (۴)، بهترین برنامه بازیابی برای بازه زمانی t و $t+1$ برنامه‌ای است که بیشترین انرژی بازیابی شده را با کمترین کلیدزنی در پی داشته باشد.

۲-۲- قیود مسئله

قیود حاکم بر مسئله بازیابی بارهای شبکه به قرار زیرند [۳۱]:

$$v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max} \quad \forall i \in N_b \quad (5)$$

$$|I_j| \leq |I_j^{\max}| \quad \forall j \in N_l \quad (6)$$

$$P_i = P_{i+1} + P_{d_{i+1}} + R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (7)$$

$$Q_i = Q_{i+1} + Q_{d_{i+1}} + X_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (8)$$

$$v_i^2 = v_{i+1}^2 + 2(R_i P_i + X_i Q_i) - (R_i^2 + X_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (9)$$

$$P_{DG} \leq P_{DG}^{\max}, \quad Q_{DG} \leq Q_{DG}^{\max} \quad (10)$$

$$P_k^2 + Q_k^2 \leq (S_k^{\max F})^2 \quad \forall k \in F \quad (11)$$

$$E_m(t+1) > E_{m,L}^{local}(t, t+1) + E_m^R(t+1), m \in M \quad (12)$$

قیود (۵) و (۶) مربوط به قیود ولتاژ باس‌ها و جریان مجاز خطوط شبکه است. قیود (۷) تا (۹) نیز معادلات پخش بار در شبکه را نشان می‌دهند. قید (۱۰) مربوط به حداکثر توان اکتیو و راکتیو قابل تحویل توسط منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبهه را نشان می‌دهد. قید (۱۱) نیز

مرحله ۳: پیداکردن ریزشبکه‌های فعال: در این مرحله امکان در دسترس بودن ریزشبکه‌های موجود در شبکه بررسی می‌شوند و ریزشبکه‌ای که توانایی شرکت در بازیابی را ندارد (همچنین مسیرهای وابسته به آن)، از پروسه بازیابی کنار گذاشته می‌شود و جدول مسیرهای بازیابی به‌روز می‌شود. شرایط در دسترس بودن ریزشبکه‌ها با قید (۱۲) بررسی می‌شوند.

مرحله ۴: ارزیابی مسیرهای بازیابی: در این مرحله، مقادیر توابع هدف برای مسیرهای بازیابی پذیرفتنی به دست آمده از مرحله ۳، محاسبه و در جدول مسیرهای بازیابی ذخیره می‌شوند.

مرحله ۵: انتخاب بهترین برنامه بازیابی: در میان مسیرهای بازیابی، آن دسته از مسیرهای بازیابی مشخص می‌شوند که به صورت هم‌زمان می‌توانند بیشترین بارهای حساس را با حفظ قیود بازیابی کنند و برنامه‌های بازیابی را تشکیل می‌دهند. سپس بهترین برنامه بازیابی براساس روش پرومته^{۱۲} مشخص می‌شود.

فلوجارت استراتژی بازیابی پیشنهادی در شکل ۱ آمده است.

۳-۲- روش پرومته ۲

در هر بازه زمانی از پروسه بازیابی، یک دسته از برنامه‌های بازیابی پذیرفتنی به دست می‌آید که باید از میان آنها بهترین برنامه انتخاب شود؛ از این رو، در این مقاله به منظور یافتن بهترین برنامه بازیابی برای هر بازه زمانی، از روش پرومته ۲ استفاده شده است. در مقایسه با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، فهم و کاربرد این روش به مراتب آسان‌تر است. پرومته با ارائه توابع ترجیحی، فرصت دستیابی به تعریفی واقعی‌تر از معیارهای تصمیم را فراهم می‌آورد. گام‌های اصلی روش پرومته به شرح زیرند:

۱- به ازای هر معیار j تابع ترجیح $p_j(d)$ تعیین شود.

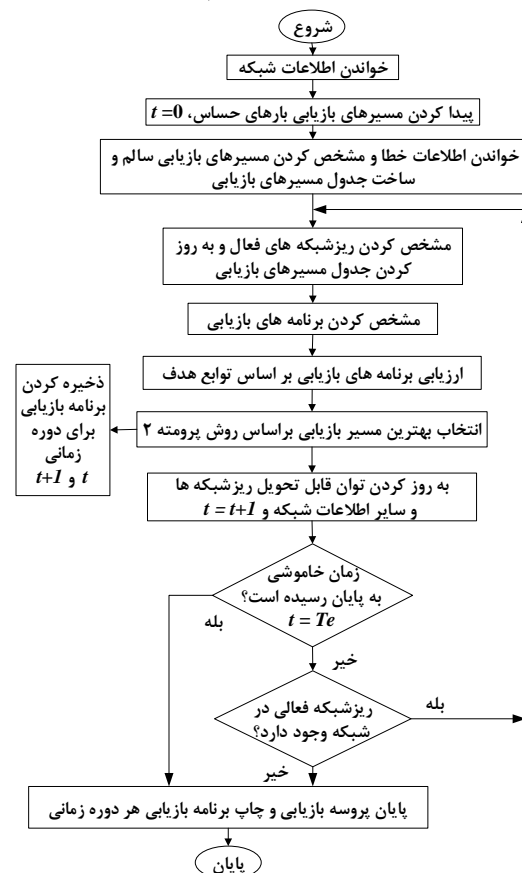
۲- تعریف بردار اهمیت نسبی $w^T = (w_1, \dots, w_k)$

برای معیارها مسئله. اگر اهمیت معیارها یکسان باشد، درایه‌های این بردار برابر خواهند بود؛ البته لزومی به

حالت عادی شبکه انجام می‌شود که هیچ خطایی رخ نداده است. سپس مسیرهایی که قیود شبکه را رعایت نکرده‌اند، حذف می‌شوند و سایر مسیرهای پذیرفتنی ذخیره می‌شوند. با توجه به اینکه این مرحله تا حدی زمان‌بر است، در شرایط کار عادی شبکه انجام می‌شود و در زمان حل مسئله بازیابی بارهای حساس که در زمان خاموشی شبکه انجام می‌شود، تأثیری ندارد.

مرحله ۲: استخراج مسیرهای کاندید: پس از رخداد خطا و وقوع خاموشی، آن دسته از مسیرهای بازیابی ذخیره شده در مرحله نخست که دارای امان خطادار نیستند، انتخاب می‌شوند و در جدول مسیرهای بازیابی کاندید ذخیره می‌شوند. منظور از امان خطادار شبکه، به هر تجهیز خطاداری اطلاق می‌شود که بین دو باس شبکه باشد. این امان ممکن است خط، باس، کلید یا هر تجهیز دیگری باشد که با رخداد خطا در آن، ارتباط الکتریکی بین دو باس از بین برود.

مراحل زیر ساعت به ساعت انجام می‌شوند.



شکل (۱): فلوجارت استراتژی پیشنهادی بازیابی

جریان منفی بیشتری نسبت به گزینه‌ی دیگری داشته باشد، به عبارت دیگر $\Phi^+(a_i) > \Phi^+(a_{i'})$ و همچنین، $\Phi^-(a_i) > \Phi^-(a_{i'})$ ، روش پرمته ۱ قادر به مقایسه این دو گزینه نخواهد بود؛ از این رو، پرمته ۱ یک روش رتبه‌بندی جزئی^{۱۳} تلقی می‌شود. برای رفع این اشکال، در نسخه پرمته ۲ خالص جریان‌های ورودی و خروجی گزینه‌ها که در رابطه (۱۴) و (۱۵) آمده‌اند، مبنای رتبه‌بندی آنها قرار می‌گیرد که در رابطه (۱۷) آمده است:

$$\Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i) \quad (17)$$

هرچه مقدار خالص جریان‌های ورودی و خروجی یک گزینه بیشتر باشد، آن گزینه برتری بیشتری دارد. پرمته ۲ امکان مقایسه همه گزینه‌ها را فراهم می‌کند؛ از این رو، یک روش رتبه‌بندی کامل محسوب می‌شود. توابع ترجیح در نظر گرفته شده برای توابع هدف مسئله در زیر آمده‌اند.

الف) تابع ترجیح انرژی بازیابی شده وزن دار $(\mu_{f_1}(x))$: هدف اصلی این تابع ترجیح، بازیابی حداکثر انرژی ممکن شبکه با در نظر گرفتن درجه اولویت بارهای شبکه است. معادله (۱۸) قواعد محاسبه این تابع ترجیح را نشان می‌دهد.

$$\mu_{f_1}(x) = \begin{cases} 0 & f_1(x) < f_1^{\min} \\ \frac{f_1(x) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} & f_1^{\min} \leq f_1(x) < f_1^{\max} \\ 1 & f_1(x) \geq f_1^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

که $\mu_{f_1}(x)$ ، تابع ترجیح $f_1(x)$ است، f_1^{\min} و f_1^{\max} نیز به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار ممکن $f_1(x)$ هستند. همچنین، $f_1^{\min} = 0$ و f_1^{\max} نیز برابر است با حداکثر مقدار انرژی قابل بازیابی در دوره بازیابی.

ب) توابع ترجیح تعداد کلیدزنی $(\mu_{f_2}(x))$: هدف اصلی این تابع ترجیح، کمینه‌کردن تعداد کلیدزنی تا حد امکان است. معادله (۱۹) قواعد محاسبه مقدار این تابع ترجیح را نشان می‌دهد. طبق معادله (۱۹) هرچه مقدار $f_2(x)$ کمتر باشد، به عبارتی، این توابع هدف بهینه‌تر

نرمال بودن مقادیر بردار اهمیت نسبی نیست؛ ولی در بیشتر موارد به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که جمع آنها برابر یک شود $(\sum_{k=1}^k w_k = 1)$.

۳- برای هر زوج از درایه‌های ماتریس A ($a_i, a_{i'} \in A$)، رابطه فرارته‌بندی π به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\pi = \begin{cases} A \times A \rightarrow [0, 1] \\ \pi(a_i, a_{i'}) = \sum_{k=1}^k w_k \cdot (p_k(f_k(a_i) - f_k(a_{i'}))) \end{cases} \quad (13)$$

$\pi(a_i, a_{i'})$ شاخصی است که شدت برتری گزینه a_i بر $a_{i'}$ را از نگاه تصمیم‌گیرنده، ضمن توجه هم‌زمان به همه معیارهای تصمیم‌گیری نشان می‌دهد. برای سنجش قدرت گزینه $a_i \in A$ ، جریان خروجی از این گزینه طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi^+(a_i) = \frac{1}{T-1} \sum_{\substack{i'=1 \\ i' \neq i}}^n \pi(a_i, a_{i'}) \quad (14)$$

برای سنجش ضعف گزینه $a_i \in A$ ، جریان ورودی به این گزینه طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi^-(a_i) = \frac{1}{T-1} \sum_{\substack{i'=1 \\ i' \neq i}}^n \pi(a_{i'}, a_i) \quad (15)$$

۴- با توجه به جریان‌های ورودی و خروجی به هر گزینه، آن گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند. اصولاً هرچه جریان‌های خروجی از یک گزینه بیشتر از جریان‌های ورودی به آن گزینه باشد، رتبه آن گزینه بالاتر خواهد بود.

در نسخه پرمته ۱، گزینه‌ی a_i زمانی بر گزینه $a_{i'}$ برتری دارد که یکی از شرایط رابطه (۲۱) برقرار باشد:

$$\begin{aligned} & \Phi^+(a_i) > \Phi^+(a_{i'}) \text{ and } \Phi^-(a_i) < \Phi^-(a_{i'}) \quad \text{یا} \\ & \Phi^+(a_i) > \Phi^+(a_{i'}) \text{ and } \Phi^-(a_i) = \Phi^-(a_{i'}) \quad \text{یا} \\ & \Phi^+(a_i) = \Phi^+(a_{i'}) \text{ and } \Phi^-(a_i) < \Phi^-(a_{i'}) \end{aligned} \quad (16)$$

با توجه به رابطه (۱۶)، اگر گزینه‌ای جریان مثبت و

فضای Matlab R2009b کد شده‌اند. برای شبیه‌سازی کامپیوتری از یک دستگاه کامپیوتر با مشخصات Intel(R), Core(TM) i5 CPU, 4 GB RAM استفاده شده است.

۴-۱- نتایج بازیابی توسط روش پیشنهادی

فرضیات در نظر گرفته شده در این مقاله به قرار زیرند:

(۱) در پروسه بازیابی، بارهای غیر حساس شبکه را می‌توان از طریق کلیدهای کنترل از راه دور یا دستی از مسیر بازیابی جدا کرد [۳۳]؛ اما بارهای غیر حساس مسیر اصلی بازیابی به شبکه متصل باقی می‌مانند.

(۲) در زمان پس از رخداد خطا تنها منابع تولیدی در دسترس شبکه، ریزشکته‌های موجود در شبکه است.

(۳) مدت زمان خاموشی شبکه ۲۰ ساعت است.

(۴) هر ریزشکته به ۲۰ درصد انرژی رزرو نیاز دارد [۳۳].

همچنین، در این مقاله فرض شده است در هر ریزشکته DG1 مسئول کنترل فرکانس شبکه است [۹-۱۰، ۳۳]. در ادامه این بخش، کارایی روش پیشنهادی در این مقاله به منظور بازیابی بارهای حساس شبکه در چهار سناریوی مختلف آزمایش شده است.

باشند، مقدار تابع ترجیح بیشتری به آن تعلق می‌گیرد و برعکس.

$$\mu_{f_2}(x) = \begin{cases} 1 & f_2(x) \leq f_2^{\min} \\ \frac{f_2^{\max} - f_2(x)}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} & f_2^{\min} < f_2(x) < f_2^{\max} \\ 0 & f_2(x) \geq f_2^{\max} \end{cases} \quad (19)$$

که $\mu_{f_2}(x)$ تابع ترجیح $f_2(x)$ است، f_2^{\min} و f_2^{\max} .

نیز به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار ممکن $f_2(x)$ است. همچنین، $f_2^{\min} = 0$ و f_2^{\max} برابر است با تعداد کلیدزنی‌های طولانی‌ترین برنامه بازیابی.

۴- نتایج شبیه‌سازی

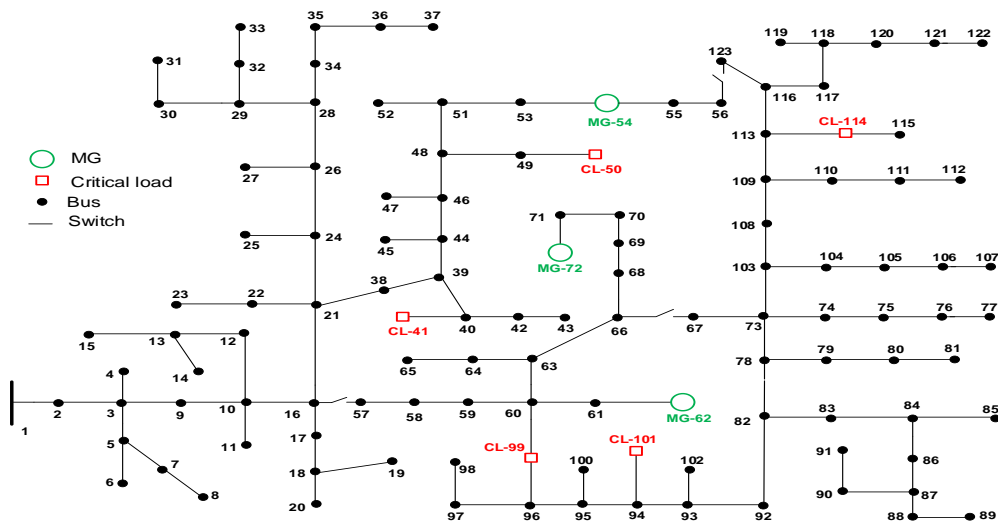
به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی از شبکه ۱۲۳ باسه IEEE [۳۳] استفاده شده که دیاگرام تک‌خطی آن در شکل ۲ آمده است. اینگونه در نظر گرفته شده است که پنج بار حساس در باس‌های ۴۱، ۵۰، ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ وجود دارند. سه ریزشکته نیز به باس‌های ۵۴، ۶۲ و ۷۲ وصل شده‌اند که پارامترهای ریزشکته‌ها در جدول ۲ آمده‌اند [۳۳]. هر ریزشکته از یک ژنراتور دیزلی (DG1)، دو توربین بادی، دو منبع ذخیره باتری و چهار بار محلی تشکیل شده است. مشخصات شبکه ذکر شده و نیز روش پیشنهادی در

جدول (۲): مشخصات المان‌های ریزشکته

پارامترها	المان
$S^N = 500kVA, V = 1.0pu, f = 60Hz, E^M = 6000kWh$	DG1
$S^N = 100kVA, P = 20kW, Q = 10kVar, E^M = 3000kWh$	باتری ۱ و ۲
$P^N = 100kW, P = 40/50kW, p_f = 0.95$	توربین بادی ۱ و ۲
$P = 50/25/36/20kW, Q = 20/5/11/15kVar$	بارهای محلی ۱، ۲، ۳ و ۴

جدول (۳): نتایج بازیابی برای سناریوی اول

تعداد کلیدزنی	انرژی بازیابی شده (MWh) وزن دار	مسیر بازیابی	بار حساس	ریزشکته	بازه زمانی (ساعت)
۶	۱/۰۸۱۹	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰ و ۴۱	۵۴	۱۰-۰
۵	۰/۶۶۱۸	۶۲،۶۱،۶۰،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱ و ۹۹	۶۲	
۷	۰/۳۴۱۲	۷۲،۷۱،۷۰،۶۹،۶۸،۶۶،۶۷،۷۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴	۱۱۴	۷۲	
۲	۰/۲۵۷۶	۵۴،۵۵،۵۶،۱۲۳،۱۱۶،۱۱۳،۱۱۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۹،۵۰،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱	۱۱۴ و ۵۰، ۴۱	۵۴	۱۲-۱۰
۰	۰/۱۳۲۴	۶۲،۶۱،۶۰،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱ و ۹۹	۶۲	
۱	۰/۱۰۸۲	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰ و ۴۱	۵۴	
۸	۰/۰۸۹۷	۶۲،۶۱،۶۰،۶۳،۶۶،۶۷،۷۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱، ۹۹ و ۱۱۴	۶۲	۱۳-۱۲
۰	۰/۳۵۸۸	۶۲،۶۱،۶۰،۶۳،۶۶،۶۷،۷۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱، ۹۹ و ۱۱۴	۶۲	۱۷-۱۳



شکل (۲). نمودار تک خطی شبکه ۱۲۳ باسه [۳۳]

جدول (۴): نتایج بازیابی برای سناریوی دوم

تعداد کلیدزنی	انرژی بازیابی شده وزن دار (MWh)	مسیر بازیابی	بار حساس	ریزشبکه	بازه زمانی (ساعت)
۶	۵/۳۰۶	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰ و ۴۱	۵۴	
۵	۰/۶۶۲	۶۲،۶۱،۶۰،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱ و ۹۹	۶۲	۱۰-۰
۷	۰/۲۴۱	۷۲،۷۱،۷۰،۶۹،۶۸،۶۶،۶۷،۷۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴	۱۱۴	۷۲	
۰	۲/۱۲۲۴	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰، ۴۱	۵۴	
۳	۰/۳۵۸۸	۶۲،۶۱،۶۰،۶۳،۶۶،۶۷،۷۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۱۴ و ۱۰۱، ۹۹	۶۲	۱۴-۱۰

همچنان به تغذیه بارهای ۹۹ و ۱۰۱ می‌پردازد. در بازه زمانی ۱۲-۱۳، علاوه بر بارهای ۹۹ و ۱۰۱، تغذیه بار ۱۱۴ نیز به عهده ریزشبکه ۶۲ خواهد بود و ریزشبکه ۵۴ تنها بارهای ۵۰ و ۴۱ را تغذیه می‌کند. پس از گذشت ۱۳ ساعت از پروسه بازیابی، انرژی ریزشبکه ۵۴ به پایان می‌رسد و تنها ریزشبکه در دسترس، ریزشبکه ۶۲ خواهد بود. با توجه به ساختار شبکه پس از وقوع خطا در خط ۵۷-۵۸، ریزشبکه ۶۲ تنها قادر خواهد بود بارهای ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ را بازیابی کند؛ زیرا تنها مسیر بازیابی ممکن بارهای ۴۱ و ۵۰ با ریزشبکه ۶۲ از بآس ۵۴ می‌گذرد که ریزشبکه ۵۴ به آن متصل است. با توجه به قید شعاعی ارائه شده در بخش ۲،۲، بازیابی بارهای ۴۱ و ۵۰ با ریزشبکه ۶۲ امکان پذیر نخواهد بود؛ از این رو، بارهای ۴۱ و ۵۰ دیگر بازیابی نمی‌شوند و تنها بارهای ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ با ریزشبکه ۶۲ در بازه زمانی ۱۳-۱۷ بازیابی می‌شوند.

به صورت کلی، در این سناریو بارهای حساس ۴۱ و ۵۰

سناریوی اول: فرض کنید در خط ۵۷-۵۸ خطا اتفاق افتاده باشد و با بازکردن کلیدهای دو طرف این خط، خطا پاکسازی شده باشد. در این سناریو فرض شده است که تمامی منابع ریزشبکه‌ها در دسترس باشند و ضریب اهمیت بارهای حساس شبکه، یکسان و برابر ۱ و ضریب بارهای غیر حساس شبکه برابر ۰/۱ باشد. برای این سناریو، جدول ۳ نتایج بازیابی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۳، در ده ساعت اولیه بازیابی، ریزشبکه ۵۴ بارهای حساس ۴۱ و ۵۰ را با انجام ۶ کلیدزنی، ریزشبکه ۶۲ بارهای حساس ۹۹ و ۱۰۱ را با انجام ۵ کلیدزنی و ریزشبکه ۷۲ نیز بار ۱۱۴ را با انجام ۷ کلیدزنی بازیابی کرده‌اند. تمام انرژی ریزشبکه ۷۲ در ده ساعت اولیه بازیابی صرف بازیابی بار ۱۱۴ شده است و دیگر قادر به شرکت در پروسه بازیابی نیست. در بازه زمانی ۱۰-۱۲ ریزشبکه ۷۲ دیگر در دسترس نیست و بار حساس ۱۱۴ با ریزشبکه ۵۴ بازیابی می‌شود. در این بازه زمانی ریزشبکه ۶۲

ساعت افزایش یافته است و زمان تغذیه بارهای حساس ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ که اهمیت کمتری دارند، از ۱۷ ساعت به ۱۴ ساعت کاهش یافته است.

سناریوی سوم: در این سناریو علاوه بر شرایط سناریوی دوم، عدم قطعیت در انرژی در دسترس ریزشکبه‌ها نیز در نظر گرفته شده است. اینگونه فرض شده است که پس از رخداد خطا، به ترتیب ۸۰، ۶۰ و ۷۰ درصد از منابع انرژی ریزشکبه‌های ۵۴، ۶۲ و ۷۲ در دسترس خواهد بود. زمان اجرای محاسبات کامپیوتری برای این سناریو ۱۸/۳ ثانیه است که نتایج آن در جدول ۱۹/۶ آمده‌اند.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵ دیده می‌شود که ریزشکبه ۵۴ بارهای حساس ۴۱ و ۵۰ را به مدت ۱۱ ساعت بازیابی کرده است. در ۷ ساعت اولیه بازیابی، ریزشکبه ۶۲ بارهای ۹۹ و ۱۰۱ و ریزشکبه ۷۲ بار ۱۱۴ را بازیابی کرده است. پس از گذشت ۷ ساعت، انرژی ریزشکبه ۷۲ به پایان رسیده است و دیگر در بازیابی نمی‌تواند شرکت کند. در بازه زمانی ۷-۹، بارهای ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ با ریزشکبه ۶۲ بازیابی خواهند شد. پس از گذشت ۹ ساعت، ریزشکبه ۶۲ دیگر قادر نخواهد بود بارهای ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ را به صورت هم‌زمان بازیابی کند؛ از این‌رو، در بازه زمانی ۹-۱۰ تنها بارهای ۹۹ و ۱۰۱ با ریزشکبه ۶۲ بازیابی می‌شوند. پس از گذشت ۱۰ ساعت از زمان بازیابی، ریزشکبه ۶۲ دیگر نمی‌تواند بارهای ۹۹ و ۱۰۱ را به صورت هم‌زمان تغذیه کند و تنها به بازیابی بار ۹۹ به مدت یک ساعت می‌پردازد. برای این سناریو، بارهای ۴۱، ۵۰ و ۹۹ به مدت ۱۱ ساعت، بار ۱۰۱ به مدت ۱۰ ساعت و بار ۱۱۴ به مدت ۹ ساعت بازیابی شده‌اند.

همان‌گونه که دیده می‌شود کاهش منابع انرژی ریزشکبه‌ها به صورت چشمگیری سبب کاهش در زمان بازیابی بارهای شبکه شده است؛ به گونه‌ای که زمان تغذیه بارهای ۴۱، ۵۰ و ۹۹ به میزان ۳ ساعت و زمان تغذیه بار ۱۰۱ به میزان ۴ ساعت و زمان تغذیه بار ۱۱۴ به میزان ۵ ساعت کاهش یافته است. همان‌گونه که دیده می‌شود بارهای ۴۱، ۵۰ کمترین کاهش در زمان تغذیه را دارند؛ زیرا ضریب بارهای ۴۱ و ۵۰ بیشتر از سایر بارهای حساس است (ضریب بارهای ۴۱ و ۵۰ برابر ۵ و ضریب سایر

به مدت ۱۳ ساعت و بارهای حساس ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ به مدت ۱۷ ساعت تغذیه شده‌اند. زمان انجام محاسبات کامپیوتری برای سناریوی اول ۱۶/۴ ثانیه است.

سناریوی دوم: در این سناریو علاوه بر شرایط سناریوی اول، اینگونه در نظر گرفته شده است که ضریب بارهای حساس شبکه دیگر یکسان نیست و برخی از بارهای حساس از اهمیت بیشتری برخوردارند. در این سناریو فرض شده است بارهای حساس ۴۱ و ۵۰ از اهمیت بیشتری نسبت به سایر بارهای حساس برخوردارند و دارای ضریب اهمیت ۵ و سایر بارهای حساس شبکه دارای ضریب اهمیت ۱ هستند. برای سایر بارهای غیر حساس شبکه نیز ضریب اهمیت ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. زمان اجرای محاسبات کامپیوتری برای این سناریو ۱۸/۳ ثانیه است که نتایج آن در جدول ۴ آمده است.

با توجه به جدول ۴، در ده ساعت اولیه بازیابی، ریزشکبه ۵۴ بارهای ۴۱ و ۵۰، ریزشکبه ۶۲ بارهای ۹۹ و ۱۰۱ و ریزشکبه ۷۲ نیز بار ۱۱۴ را بازیابی کرده است. همانگونه که در سناریوی اول نیز توضیح داده شد ریزشکبه ۷۲ تنها قادر به بازیابی بار ۱۱۴ برای ۱۰ ساعت خواهد بود و پس از آن دیگر نمی‌تواند در پروسه بازیابی شرکت کند. در بازه زمانی ۱۰-۱۴، ریزشکبه ۵۴ بارهای ۴۱ و ۵۰ و ریزشکبه ۶۲ نیز بارهای ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ را بازیابی کرده‌اند. با مقایسه جدول‌های ۳ و ۴ به خوبی می‌توان تأثیر درجه اهمیت متفاوت بارهای حساس شبکه بر پروسه بازیابی را درک کرد. زمانی که بارهای ۴۱ و ۵۰ اهمیت بیشتری نسبت به سایر بارهای حساس شبکه داشته باشند و امکان بازیابی آنها تنها با ریزشکبه ۵۴ مقدور باشد (با توجه به قید شعاعی شبکه، سایر ریزشکبه‌ها نمی‌توانند بارهای ۴۱ و ۵۰ را بازیابی کنند)، ریزشکبه ۵۴ دیگر در بازیابی سایر بارهای حساس شبکه شرکت نمی‌کند و تنها به بازیابی بارهای ۴۱ و ۵۰ می‌پردازد؛ از این‌رو، تمام انرژی ریزشکبه ۵۴ صرف بازیابی بارهای حساس ۴۱ و ۵۰ می‌شود تا به مدت ۱۴ ساعت برق دار شوند. در این سناریو تمام بارهای حساس شبکه به مدت ۱۴ ساعت بازیابی شده‌اند. با مقایسه نتایج جدول‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود زمان تغذیه بارهای حساس ۴۱ و ۵۰ که اهمیت بالاتری دارند، از ۱۳ ساعت به ۱۴

بارهای حساس برابر ۱ در نظر گرفته شده است). بار ۹۹ نیز کمترین کاهش زمان تغذیه را نسبت به بارهای ۱۰۱ و ۱۱۴ دارد؛ زیرا بار ۹۹ نزدیکترین بار به ریزش شبکه ۶۲ است و توان مصرفی آن نیز کوچکتر از بارهای ۱۰۱ و ۱۱۴ است. سناریوی چهارم: در این سناریوی علاوه بر شرایط موجود در سناریوی سوم، امکان قطع بارهای محلی ریزش شبکه نیز در نظر گرفته شده است. نتایج بازیابی برای این سناریو در جدول ۶ آمده‌اند.

جدول (۵). نتایج بازیابی برای سناریوی سوم

تعداد کلیدزنی	انرژی بازیابی شده (MWh) وزن دار	مسیر بازیابی	بار حساس	ریزش شبکه	بازه زمانی (ساعت)
۶	۳/۷۱۴۱	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰ و ۴۱	۵۴	۷-۰
۵	۰/۴۶۳۲	۶۲،۶۱،۶۰،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱ و ۹۹	۶۲	
۷	۰/۱۶۸۸	۷۲،۷۱،۷۰،۶۹،۶۸،۶۶،۶۷،۶۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴	۱۱۴	۷۲	
۰	۱/۰۶۱۲	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰، ۴۱	۵۴	۹-۷
۳	۰/۱۷۹۵	۶۲،۶۱،۶۰،۶۳،۶۶،۶۷،۶۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱، ۹۹ ۱۱۴	۶۲	
۰	۰/۵۳۰۶	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰، ۴۱	۵۴	۱۰-۹
۱	۰/۰۶۶۲	۶۲،۶۱،۶۰،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱ و ۹۹	۶۲	
۰	۰/۵۳۰۶	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰، ۴۱	۵۴	۱۱-۱۰
۱	۰/۰۱۹۹	۶۲،۶۱،۶۰،۹۹	۹۹	۶۲	

جدول (۶). نتایج بازیابی برای سناریوی چهارم

تعداد کلیدزنی	انرژی بازیابی شده (MWh) وزن دار	مسیر بازیابی	بار حساس	ریزش شبکه	بازه زمانی (ساعت)
۶	۵/۳۰۵۹	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰ و ۴۱	۵۴	۱۰-۰
۵	۰/۶۶۱۸	۶۲،۶۱،۶۰،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱ و ۹۹	۶۲	
۷	۰/۲۴۱۲	۷۲،۷۱،۷۰،۶۹،۶۸،۶۶،۶۷،۶۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴	۱۱۴	۷۲	
۰	۲/۱۲۲۴	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰، ۴۱	۵۴	۱۴-۱۰
۳	۰/۳۵۹۰	۶۲،۶۱،۶۰،۶۳،۶۶،۶۷،۶۳،۱۰۳،۱۰۸،۱۰۹،۱۱۳،۱۱۴،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۱۴ و ۱۰۱، ۹۹	۶۲	
۰	۱/۵۹۱۸	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۶،۴۴،۳۹،۴۰،۴۱،۴۹،۵۰	۵۰، ۴۱	۵۴	۱۷-۱۴

جدول (۷). خلاصه شرایط و نتایج سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده

سناریو	شرایط سناریو	میانگین زمان تغذیه بارهای حساس (ساعت)	انرژی بازیابی شده (MWh) وزن دار	تعداد کلیدزنی
۱	خطا در خط ۵۷-۵۸، ضریب اهمیت بارهای حساس و غیر حساس به ترتیب برابر است با ۱ و ۰/۰۱	۱۵/۴	۲/۹۳۱۶	۲۹
۲	شرایط سناریو ۱ + افزایش ضریب بارهای ۴۱ و ۵۰	۱۴	۸/۶۹۰۲	۲۱
۳	شرایط سناریوی ۲ + عدم قطعیت در انرژی در دسترس ریزش شبکه‌ها	۱۰/۴	۶/۷۳۴	۲۳
۴	شرایط سناریوی ۳ + امکان قطع بارهای محلی ریزش شبکه‌ها	۱۵/۲	۱۰/۲۸۲۱	۲۱

جدول (۸): نتایج بازیابی با روش ارائه‌شده در مرجع [۱۰] برای خطای رخ داده در خط ۳۹-۴۴

تعداد کلیدزنی	زمان تغذیه (ساعت)	انرژی بازیابی شده وزن‌دار (MWh)	مسیر بازیابی	بار حساس	ریزشبکه
۳	۲۳/۵	۱/۴۳۲۲	۵۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۹،۵۰	۵۰	۵۴
۴	۲۲/۴	۰/۴۳۲۹	۵۴،۵۵،۵۶،۱۲۳،۱۱۶،۱۱۳،۱۱۴	۱۱۴	۵۴
۱۰	۱۵/۹	۱/۷۴۴۶	۶۲،۶۱،۶۰،۵۹،۵۸،۵۷،۱۶،۲۱،۳۸،۳۹،۴۰،۴۱،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱ و ۹۹، ۴۱	۶۲

جدول (۹): نتایج بازیابی به دست آمده با روش پیشنهادی در این مقاله برای خطای رخ داده در خط ۳۹-۴۴

تعداد کلیدزنی	انرژی بازیابی شده وزن‌دار (MWh)	مسیر بازیابی	بار حساس	ریزشبکه	بازه زمانی (ساعت)
۵	۱/۴۰۸۸	۵۴،۵۵،۵۶،۱۲۳،۱۱۶،۱۱۳،۱۱۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۹،۵۰	۱۱۴ و ۵۰	۵۴	۱۷-۰
۷	۱/۱۵۲۱	۶۲،۶۱،۶۰،۵۹،۵۸،۵۷،۱۶،۲۱،۳۸،۳۹،۴۰،۴۱،۹۹	۹۹ و ۴۱	۶۲	
۷	۰/۸۶۸۵	۷۲،۷۱،۷۰،۶۹،۶۸،۶۶،۶۷،۷۳،۷۸،۸۲،۹۲،۹۳،۹۴،۱۰۱	۱۰۱	۷۲	
۰	۰/۳۳۱۵	۵۴،۵۵،۵۶،۱۲۳،۱۱۶،۱۱۳،۱۱۴،۵۳،۵۱،۴۸،۴۹،۵۰	۱۱۴ و ۵۰	۵۴	۲۱-۱۷
۳	۰/۴۵۶۱	۶۲،۶۱،۶۰،۵۹،۵۸،۵۷،۱۶،۲۱،۳۸،۳۹،۴۰،۴۱،۹۹،۹۶،۹۵،۹۴،۱۰۱	۱۰۱ و ۹۹، ۴۱	۶۲	
۸	۰/۲۶۹۹	۵۴،۵۵،۵۶،۱۲۳،۱۱۶،۱۱۳،۱۱۴،۱۰۹،۱۰۸،۱۰۳،۷۳،۷۸،۸۲،۹۲،۹۳،۹۴،۱۰۱، ۵۳،۵۱،۴۸،۴۹،۵۰	۱۱۴ و ۱۰۱، ۵۰	۵۴	۲۳-۲۱
۱	۰/۱۳۵۵	۶۲،۶۱،۶۰،۵۹،۵۸،۵۷،۱۶،۲۱،۳۸،۳۹،۴۰،۴۱،۹۹	۹۹ و ۴۱	۶۲	
۰	۰/۱۳۴۶	۵۴،۵۵،۵۶،۱۲۳،۱۱۶،۱۱۳،۱۱۴،۱۰۹،۱۰۸،۱۰۳،۷۳،۷۸،۸۲،۹۲،۹۳،۹۴،۱۰۱، ۵۳،۵۱،۴۸،۴۹،۵۰	۱۱۴ و ۱۰۱، ۵۰	۵۴	۲۴-۲۳
۱	۰/۰۴۸۶	۶۲،۶۱،۶۰،۵۹،۵۸،۵۷،۱۶،۲۱،۳۸،۳۹،۴۰،۴۱	۴۱	۶۲	

۲۹ کلیدزنی نیاز است که در مجموع سبب بازیابی ۲/۹۳۱۶ مگاوات ساعت انرژی شبکه شده است. در این سناریو، به صورت میانگین بارهای حساس شبکه به مدت ۱۵/۴ ساعت تغذیه شده‌اند. با افزایش ضریب اهمیت دو بار حساس ۴۱ و ۵۰ (سناریوی ۲)، همان‌گونه که انتظار می‌رود انرژی وزن‌دار بازیابی شده نسبت به سناریوی اول که تمامی بارهای حساس ضریب یکسان ۱ دارند، به میزان درخور توجهی افزایش یافته است؛ اما میانگین زمان تغذیه بارهای حساس شبکه کاهش پیدا کرده است. دلیل این کاهش نیز افزایش زمان تغذیه دو بار حساس ۴۱ و ۵۰ و کاهش زمان تغذیه سایر بارهای حساس شبکه نسبت به سناریوی اول است. در سناریو ۳، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در انرژی در دسترس ریزشبه‌ها، میزان انرژی بازیابی شده و میانگین زمان تغذیه بارهای حساس شبکه نسبت به سناریوی دوم به ترتیب به میزان ۱/۹۵۶۲ مگاوات ساعت و ۳/۶ ساعت

در این سناریو ضرایب اهمیت متفاوت بارهای حساس شبکه، عدم قطعیت در انرژی در دسترس ریزشبه‌ها و امکان قطع بارهای محلی ریزشبه‌ها به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول ۶ دیده می‌شود بارهای ۴۱ و ۵۰ که درجه اهمیت بیشتری دارند، برای بیشترین زمان ممکن، یعنی ۱۷ ساعت بازیابی شده‌اند. بارهای ۹۹، ۱۰۱ و ۱۱۴ نیز به مدت ۱۴ ساعت بازیابی شده‌اند. زمان انجام محاسبات کامپیوتری برای سناریوی چهارم ۱۷/۳ ثانیه است.

با مقایسه جدول‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود قطع بارهای محلی ریزشبه‌ها سبب افزایش در زمان تغذیه تمامی بارهای حساس شبکه شده است.

در جدول ۷ خلاصه شرایط هر سناریو و نتایج شبیه‌سازی آن آمده‌اند. با توجه به جدول ۷ دیده می‌شود برای پیاده‌سازی برنامه بازیابی پیشنهادی در سناریوی اول به

ساعت تغذیه کند. کل انرژی وزن‌دار بازیابی شده با روش پیشنهادی در این مقاله برابر $4/8056$ مگاوات ساعت است. در این مقاله برای بازیابی بارهای حساس شبکه ۳۲ کلیدزنی انجام داده است.

با مقایسه جدول‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود روش پیشنهادی در این مقاله از توان تمامی ریزشبه‌های موجود در بازیابی استفاده کرده است؛ در حالی که روش ارائه شده در [۱۰] از توان ریزشبه ۷۲ در پروسه بازیابی استفاده نکرده است. هرچند تعداد کلیدزنی در مرجع [۱۰] کمتر از روش پیشنهادی در این مقاله است، زمان تغذیه تمامی بارهای حساس توسط روش پیشنهادی در این مقاله بیشتر از روش ارائه شده در مرجع [۱۰] است. همچنین، انرژی وزن‌دار بازیابی شده با روش پیشنهادی در این مقاله نیز به مقدار $1/1959$ مگاوات ساعت بیشتر از مقدار مشابه به دست آمده با روش ارائه شده در مرجع [۱۰] است. علت اصلی برتری روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به روش ارائه شده در مرجع [۱۰] تفاوت در نحوه حل مسئله بازیابی شبکه است؛ به گونه‌ای که مقاله [۱۰] تنها یک برنامه بازیابی را برای کل زمان خاموشی پیشنهاد می‌دهد و این سبب شده است از توان ریزشبه ۷۲ در بازیابی استفاده نشود. این در حالی است که روش پیشنهادی در این مقاله به صورت ساعت به ساعت بازیابی شبکه را انجام داده و از تمام توان در دسترس ریزشبه‌ها استفاده کرده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک استراتژی جدید برای بازیابی ساعت به ساعت بارهای حساس شبکه پس از رخداد خطا و به خاموشی رفتن کامل شبکه به منظور افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع ارائه شده است. استراتژی پیشنهادی در این مقاله مسئله بازیابی را به صورت ساعت به ساعت حل می‌کند و برای هر ساعت از خاموشی بهترین برنامه بازیابی را براساس توابع هدف مسئله پیشنهاد می‌دهد. در این مقاله، ضریب اهمیت بارهای شبکه، عدم قطعیت در منابع انرژی ریزشبه‌ها و امکان قطع بارهای محلی ریزشبه‌ها در پروسه بازیابی نیز در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده

کاهش یافته است. دلیل این کاهش نیز کاهش در میزان انرژی در دسترس ریزشبه‌ها است. در سناریوی چهارم، علاوه بر شرایط سناریوی سوم، امکان قطع بارهای محلی ریزشبه‌ها نیز در نظر گرفته شده که باعث افزایش میانگین زمان تغذیه بارهای حساس از $10/4$ به $15/2$ ساعت، افزایش انرژی وزن‌دار بازیابی شده از $6/734$ به $10/2821$ مگاوات ساعت و همچنین، کاهش تعداد کلیدزنی‌های شبکه از ۲۳ به ۲۱ شده است. سناریوی ۴ نشان می‌دهد در نظر گرفتن امکان قطع بارهای محلی ریزشبه‌ها به میزان درخور توجهی سبب بهبود در توابع هدف مسئله و افزایش میانگین زمان تغذیه بارهای حساس شبکه خواهد شد.

۴-۲- مقایسه روش پیشنهادی با روش

پیشنهاد شده در مرجع [۱۰]

به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی در این مقاله، روش پیشنهادی با روش ارائه شده در مرجع [۱۰] مقایسه شده است. جدول‌های ۸ و ۹ به ترتیب نتایج بازیابی به دست آمده با روش ارائه شده در مرجع [۱۰] و این مقاله را برای خطای رخ داده در خط ۳۹-۴۴ نشان می‌دهد. در این بخش، همانند آنچه در مرجع [۱۰] فرض شده، مدت زمان خاموشی شبکه ۲۴ ساعت، ضریب بارهای حساس برابر ۱ و سایر بارهای غیر حساس برابر $0/01$ و همچنین میزان رزور مورد نیاز هر ریزشبه ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است

با توجه به جدول ۸، روش ارائه شده در [۱۰] بارهای حساس ۵۰ و ۱۱۴ را با ریزشبه ۵۴ به ترتیب به مدت $23/5$ و $22/4$ ساعت بازیابی کرده است. بارهای حساس ۴۱، ۹۹ و ۱۰۱ نیز با ریزشبه ۶۲ به مدت $15/9$ ساعت تغذیه شده‌اند. در نتایج به دست آمده با روش ارائه شده در مرجع [۱۰]، از ریزشبه ۷۲ در پروسه بازیابی استفاده نشده و کل انرژی بازیابی شده وزن‌دار شبکه برابر $3/6097$ مگاوات ساعت است. روش ارائه شده در مرجع [۱۰] بازیابی بارهای حساس شبکه را با انجام ۱۷ کلیدزنی به اتمام رسانیده است. با توجه به جدول ۹، روش پیشنهادی در این مقاله توانسته است بارهای حساس ۵۰، ۴۱، ۱۰۱ و ۱۱۴ را برای مدت زمان ۲۴ ساعت و بار حساس ۹۹ را به مدت زمان ۲۳

- [13] L. Tao, J. He, Y. Wang, Y. Xu, and X. Wang, "Service restoration to critical loads using microgrids considering dynamic performance of DGs", *The Journal of Engineering*, Vol. 2018, No. 15, 812-817, 2018.
- [14] Y. Xu, C.-C. Liu, K. P. Schneider, F. K. Tuffner, and D. T. Ton, "Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 1, 426-437, 2016.
- [15] H. Jia, X. Jin, Y. Mu, and X. Yu, "A multi-level service restoration strategy of distribution network considering microgrids and electric vehicles", 2014 International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), IEEE, 1-4, 2014.
- [16] A. Arif and Z. Wang, "Networked microgrids for service restoration in resilient distribution systems", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 14, 3612-3619, 2017.
- [17] M. E. Nassar and M. M. Salama, "Adaptive self-adequate microgrids using dynamic boundaries", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 1, 105-113, 2015.
- [18] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, and D. Zhao, "Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters", *IEEE Transactions on smart grid*, Vol. 7, No. 2, 958-966, 2015.
- [19] Z. Wang and J. Wang, "Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No. 6, 3139-3149, 2015.
- [20] B. Ansari and S. Mohagheghi, "Electric service restoration using microgrids", 2014 IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition, IEEE, 1-5, 2014.
- [21] A. Castillo, "Microgrid provision of blackstart in disaster recovery for power system restoration", 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), IEEE, 534-539, 2013.
- [22] W. Liu, Z. Lin, F. Wen, and G. Ledwich, "A wide area monitoring system based load restoration method", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, 2025-2034, 2013.
- [23] A. Alsubaie *et al.*, "A platform for disaster response planning with interdependency simulation functionality", *International Conference on Critical Infrastructure Protection*, Springer, 183-197, 2013.
- [24] A. Kwasinski, V. Krishnamurthy, J. Song, and R. Sharma, "Availability evaluation of micro-grids for resistant power supply during natural disasters", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, 2007-2018, 2012.
- [25] A. Kwasinski, "Quantitative evaluation of DC microgrids availability: Effects of system architecture and converter topology design choices", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 3, 835-851, 2010.
- [26] Y. Xu, C.-C. Liu, K. P. Schneider, and D. T. Ton, "Placement of remote-controlled switches to enhance distribution system restoration capability", *IEEE Transactions on Power Systems*,
- با روش پیشنهادی در این مقاله با یک روش ارائه شده در این زمینه مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از مقایسه نشان می‌دهند استراتژی پیشنهادی در این مقاله، کارایی و قدرت بیشتری برای بازیابی بارهای حساس شبکه دارد.

مراجع

- [1] Y. Y. Hong, "Electric Power Systems Research", MDPI AG, 2018.
- [2] N. N. Taleb, "Antifragile: Things that gain from disorder", Random House Incorporated, 2012.
- [3] D. T. Ton and W. P. Wang, "A more resilient grid: The US department of energy joins with stakeholders in an R&D plan", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 13, No. 3, 26-34, 2015.
- [4] S. Qazi, "Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas" (No. 1), pp. 1-30, Elsevier, 2017.
- [5] K. Hirose, J. Reilly, and H. Irie, "The sendai microgrid operational experience in the aftermath of the tohoku earthquake: a case study", *New Energy and Industrial Technology Development Organization*, Vol. 308, 2013.
- [6] A. Sharma, D. Srinivasan, and A. Trivedi, "A Decentralized Multiagent System Approach for Service Restoration Using DG Islanding", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 6, 2784-2793, 2015.
- [7] I.-K. Song, W.-W. Jung, J.-Y. Kim, S.-Y. Yun, J.-H. Choi, and S.-J. Ahn, "Operation schemes of smart distribution networks with distributed energy resources for loss reduction and service restoration", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 1, 367-374, 2012.
- [8] J. Li, X.-Y. Ma, C.-C. Liu, and K. P. Schneider, "Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29, No. 6, 3021-3029, 2014.
- [9] S. Ghasemi, A. Khodabakhshian, and R.-a. Hooshmand, "New multi-stage restoration method for distribution networks with DGs", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 13, No. 1, 55-63, 2018.
- [10] Ghasemi, A. Khodabakhshian, and R.-A. Hooshmand, "Decision-making method for critical load restoration by using MGs", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 13, No. 20, 4630-4641, 2019.
- [11] R. F. Sampaio, L. S. Melo, R. P. Leão, G. C. Barroso, and J. R. Bezerra, "Automatic restoration system for power distribution networks based on multi-agent systems", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 2, 475-484, 2017.
- [12] A. A. Hafez, W. A. Omran, and Y. G. Hegazy, "A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 3, 1911-1919, 2018.

- [30]. Yan, M., Shahidehpour, M., Paaso, A., Zhang, L., Alabdulwahab, A., & Abusorrah, A. (2020). Distribution system resilience in ice storms by optimal routing of mobile devices on congested roads. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 12, No. 2, 1314-1328, 2020.
- [31] S. Ghasemi and R. Hooshmand, "Active Distribution Networks Restoration after Extreme Events", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, Vol. 2019.
- [32] R. Bellman, "On a routing problem", *Quarterly of applied mathematics*, Vol. 16, No. 1, 87-90, 1958.
- [33] H. Gao, Y. Chen, Y. Xu, and C.-C. Liu, "Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 6, 2837-2848, 2016.
- Vol. 31, No. 2, 1139-1150, 2015.
- [27] S. Dimitrijevic and N. Rajakovic, "Service Restoration of Distribution Networks Considering Switching Operation Costs and Actual Status of the Switching Equipment", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 3, 1227-1232, 2015.
- [28] J. C. López, J. F. Franco, and M. J. Rider, "Optimisation-based switch allocation to improve energy losses and service restoration in radial electrical distribution systems", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 11, 2792-2801, 2016.
- [29]. Arjomandi-Nezhad, Ali, Mahmud Fotuhi-Firuzabad, Moein Moeini-Aghaie, Amir Safdarian, Payman Dehghanian, and Fei Wang. "Modeling and Optimizing Recovery Strategies for Power Distribution System Resilience." *IEEE Systems Journal*, 1-10, 2020.

¹ Resiliency

² U.S. Department of Energy (DOE)

³ Blackout

⁴ Sendai Microgrid

⁵ Fukushi University

⁶ Networked Microgrids

⁷ Spanning tree search

⁸ Wide area monitoring system

⁹ Real-time

¹⁰ Battery state of charge (SOC)

¹¹ Bellman Ford algorithm

¹² PROMOTHEE II Method

¹³ Partial ranking

