

Bi-Level Network Reconfiguration Model to Enhance the Resilience of Distribution Systems Considering Risk-Based INDEX

Reza Yusefvand, Omid Safarzadeh*, Reza Rahimifard

Department of power system, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran.

E-mails: 987526506@shahed.ac.ir; safarzadeh@shahed.ac.ir; 4007526802@shahed.ac.ir

Short Abstract

The power grid is one of the most important infrastructures of modern societies, which requires safe and effective operation. In this regard, the design of power networks should be such that they can be resistant to power outages. In the meantime, the discussion of the resilience of the power grid is raised. The goal of the resilient grid is to adapt to high-risk events with a low probability of occurrence, such as severe natural disasters and human attacks. In this paper, a two-stage framework is proposed to improve the resilience of distribution systems using network rearrangement with risk-based quantitative methods. The conditional risk value to change the network topology in such a way as to reduce the probability of load interruption. In the second step, after the accident and the identification of the interrupted lines, another re-arrangement step should be done to minimize the interruption of the load, in which the genetic algorithm is used. The model is evaluated on a 33-bus distribution network and its results are presented.

Keywords

Power distribution system, resilience, reconfiguration, conditional value at risk and recovery

1- Short Paper

In contemporary era, electricity is a fundamental and influential part of human life. The power grid is one of the most important infrastructures of modern society, and its safe and effective operation is a prerequisite for social and economic life. Power networks are designed in such a way that they can withstand power outages due to the random component under the security index of 1-N (or 2-N). The resilience of the power grid indicates the ability of the system to resist, adapt, and recover at the right time when disturbances occur. In another definition, it is the ability of a system to recover quickly after a disturbance.

2- Proposed Work and Methodology

In this study, a two-stage framework based on the use of risk indicators is presented to improve the resilience of the distribution network (the two-stage method will definitely reduce the load compared to single-stage methods). In the first stage, the state of the network is determined using the Monte Carlo simulator, and the VaRa and CVaRa indicators and its minimization using network rearrangement changes the network topology, and in the second stage, which is after the accident, after it is determined. The severity of the damage and the state of outages, another stage of reorganization is done in order to reduce the interrupted loads, in this method, the genetic algorithm is used. But in the presented method, by using the failure curve and Monte Carlo simulation and weather forecasts, the network condition is predicted and corrective measures are taken to reduce the load.

3- Conclusion

After the explanations given in previous section, we came to the conclusion that by using this method it is possible to reduce the average power outage of the consumer and reduce the CVaR, which is the average of the worst case. Most of the resilience improvement methods are related to after the accident, but this method improves the condition of the network before the accident and reduces the probability of load interruption.

مدل بازآرایی دوسطحی شبکه توزیع برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن شاخص ریسک

رضا یوسفوند

کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

امید صفرزاده

استاد، دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

رضا رحیمی‌فرد

کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

چکیده

شبکه قدرت یکی از مهم‌ترین زیر ساخت‌های جوامع مدرن می‌باشد که نیازمند عملکرد ایمن و موثر است. به همین راستا، طراحی شبکه‌های قدرت باید بگونه‌ای باشد تا بتواند در برابر قطعی برق مقاوم باشد. در این میان، بحث تاب‌آوری شبکه قدرت مطرح می‌گردد که هدف شبکه تاب‌آور وفق یافتن با رویدادهای پر خطر با احتمال وقوع کم مانند بلایای طبیعی سهمگین و حملات انسانی است. در این مقاله چارچوبی دو مرحله‌ای برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع با استفاده از بازآرایی شبکه و روش‌های کمی مبتنی بر ریسک پیشنهاد می‌شود که در مرحله اول پیش از وقوع حادثه با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و محاسبه ارزش در معرض خطر^۱ و ارزش در معرض خطر مشروط^۲ توپولوژی شبکه را به گونه‌ای تغییر دهد که احتمال قطع بار را کاهش دهد. در مرحله دوم، پس از حادثه و مشخص شدن خطوط قطع شده یک مرحله بازآرایی دیگر انجام شود تا قطع بار را به حداقل برساند که در این روش از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مدل روی یک شبکه توزیع ۳۳ باسه ارزیابی شده است و نتایج آن ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی

سیستم توزیع برق، تاب‌آوری، بازآرایی، ارزش در معرض خطر مشروط و بازیابی.

نام نویسنده مسئول: دکتر امید صفرزاده

ایمیل نویسنده مسئول: safarzadeh@shahed.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳

۱- مقدمه

در دوران معاصر، برق یک بخش بنیادین و تأثیر گزار در زندگی بشر است. شبکه قدرت یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های جامعه مدرن است و عملکرد ایمن و مؤثر آن پیش‌نیاز زندگی اجتماعی و اقتصادی است. شبکه‌های قدرت به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند تا بتوانند در برابر قطعی برق به دلیل مؤلفه تصادفی، تحت شاخص امنیت ۱-N (یا ۲-N) مقاومت کنند. تاب‌آوری شبکه قدرت نشان‌دهنده توانایی سیستم برای مقاومت، سازگاری یافتن و بازیابی در زمان مناسب در هنگام بروز اختلالات است. در یک تعریف دیگر، توانایی یک سیستم برای بهبود سریع پس از اختلال است [3].

در گزارش ۲۰۱۲، هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^۳ تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم برای پیش‌بینی، تحمل کردن و بهبود یافتن از تأثیرات رویدادهای آسیب‌زا در زمان مناسب و به شکلی کارآمد تعریف کرده است [4].

در تعریف مشابهی که توسط دفتر هیئت دولت انگلستان ارائه شده، تاب‌آوری را توانایی شبکه برای پیش‌بینی، تحمل کردن، سازگاری و به‌سرعت بهبودی یافتن از رویدادهای مختل‌کننده دانسته‌اند [5]. هدف شبکه قدرت تاب‌آور، وفق یافتن با رویدادهای پرخطر مانند بلایای طبیعی سهمگین و حملات انسانی می‌باشد، پدیده‌هایی که با احتمال وقوع کم اما آسیب‌های شدید^۴ می‌توانند منشا تأثیرات مهمی بر روی شبکه‌های قدرت باشند که این پدیده‌ها را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد:

- ✓ **خطاهای آبشاری فنی:** شرکت قابلیت اطمینان الکتریکی آمریکای شمالی^۵ خطاهای آبشاری را به این صورت تعریف می‌کند: «از دسترس خارج شدن کنترل نشده‌ی عناصر سیستم به‌صورت متوالی که در اثر وقوع حادثه در هر قسمت از سیستم ایجاد شده است» [6].
- ✓ **رویداد های شدید طبیعی:** سیل، طوفان، کولاک، گردباد،

¹ Value-at-risk (VaR)

² Conditional Value-at-risk (VaR)

³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

⁴ High-impact rare (HR)

⁵ North American Electric Reliability Corporation

$$F_i^c(\omega) = \begin{cases} 0, & \text{if } P_i(\omega) < r_k \\ 1, & \text{if } P_i(\omega) > r_k \end{cases} \quad (1)$$

هنگامی که $Fic(\omega)=1$ است یعنی عضو c سیستم دچار خرابی شده است و $Pl(\omega)$ متناظر با هر جزء سیستم c بوده و یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت، $rk \sim u(0,1)$ است.

برای بازیابی شبکه را ضمن رعایت قیود عملکردی، با هدف حداقل سازی نواحی خارج از سرویس، تعداد عملیات‌های سوئیچینگ، انحراف ولتاژ باس و جریان فیدر فرمول‌بندی می‌کنیم. تابع هدف بازآرایی شبکه برای حداقل سازی نواحی خارج از سرویس به صورت زیر است:

$$\min f_1(\bar{x}) \quad (2)$$

که در آن $\bar{X}$ بیانگر بردار حالت سوئیچ‌ها، یعنی $\bar{X} = [S_1, S_2, \dots, S_{N_s}]$ بیانگر تعداد کل سوئیچ‌های سیستم مد نظر و S_i وضعیت سوئیچ i است (۰ و ۱ به ترتیب بیانگر وضعیت باز و بسته هستند) و $f_1(\bar{X})$ تعداد ناحیه‌های خارج از سرویس بدون خطا تحت وضعیت $\bar{X}$ را نشان می‌دهد. تابع هدف برای کمینه‌سازی تعداد کلید زنی به صورت زیر است:

$$\min f_2(\bar{x}) = \sum_{i=1}^{N_s} |S_i - S_{i0}| \quad (3)$$

که در آن $f_2(\bar{X})$ بیانگر تعداد عملیات سوئیچینگ تحت وضعیت $\bar{X}$ است و S_{i0} وضعیت اصلی سوئیچ (بعد از اینکه خطاها ایزوله شدند) را نشان می‌دهد. تابع هدف برای کمینه‌سازی میزان انحراف ولتاژ به صورت زیر است:

$$\min f_3(\bar{X}) = \max_i |V_i - 1.0|, i = 1.2, \dots, N_b \quad (4)$$

که N_b تعداد باس‌های سیستم، V_i ولتاژ باس i ام ام‌رحسب پریونیت است. تابع هدف برای کمینه‌سازی جریان خطوط (بارگذاری خطوط) به صورت زیر است:

$$\min f_4(\bar{x}) = \max \left\{ \frac{I_{iLoad}}{I_{iRated}} \right\} \quad i = 1.2, \dots, N_L \quad (5)$$

که N_L تعداد خطوط فیدر، I_{iLoad} میزان جریان خط i ام، I_{iRated} جریان نامی خط i ام است. جریان هر انشعاب با به دست آوردن معادلات پخش بار توزیع ارزیابی می‌شود. این معادلات با مجموعه‌ای از معادله‌های بازگشتی توصیف می‌شوند [۱۴].

قیود بازآرایی شبکه این است که ساختار شبکه پس از بازیابی سرویس باید به‌صورت شعاعی باقی بماند. الگوریتم پیشنهادی برای حفظ پیکربندی شعاعی شبکه شامل توالی عملیات سوئیچینگ زیر است:

- ✓ در ابتدا سوئیچی که باید (به‌عنوان سوئیچ ایزوله کننده یا بخش‌بندی کننده) باز شود، عمل می‌کند.
- ✓ اگر پس از بستن یک سوئیچ ساختار شعاعی نقض شود، آن سوئیچ نمی‌تواند به‌عنوان سوئیچ پشتیبان انتخاب شود. اینکار فیدری با دو منبع تغذیه در دو سمت ایجاد می‌کند.
- ✓ اگر همچنان پس از گام‌های بالا حلقه‌های داخلی ایجاد می‌شوند، یکی از سوئیچ‌های داخل حلقه باید به دلخواه باز شود.

- ✓ بنابراین مسئله چند هدفه‌ای را به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\min f_i(\bar{X}), i = 1.2, \dots, n_0 \quad (6)$$

به شرط آنکه قیود زیر نیز اعمال گردد

$$g_j(\bar{X}) = 0, j = 1.2, \dots, n_c \quad (7)$$

در مسئله چند هدفه دستبایی به جوابی مرغوب^۸ مهم است. از نظر کیفی، جواب بهینه مرغوب برای مسائل چند هدفه آن جوابی است که بهبود یک تابع هدف تنها در گرو تنزل تابع هدف دیگر باشد. جواب‌های بهینه مرغوب به‌طور کلی شامل تعداد نقاط نامحدودی هستند. شایان ذکر است که مقداری قضاوت ذهنی باید توسط تصمیم گیرنده به تحلیل‌های کمی اضافه شود (مثلاً اپراتورهای دیسپاچینگ در مرکز کنترل برای چندین هدف درباره برنامه بازیابی تصمیم

سونامی و زمین‌لرزه‌ها به‌طور روزافزون روی شبکه‌های قدرت در سال‌های اخیر تأثیر منفی گذاشته‌اند. در میان شدیدترین موارد، قطعی‌های طوفان کاترینا ۲۰۰۵، قطعی‌های طوفان سندی ۲۰۱۲ و قطعی‌های زمین‌لرزه ژاپن ۲۰۱۱ را می‌توان نام برد [۷].

✓ **حملات سایبری و فیزیکی:** استفاده گسترده فناوری اطلاعات و ارتباطات^۶ در شبکه‌های برق بستر مناسبی را برای حملات سایبری ایجاد کرده است. ظهور ICT از یک‌سو باعث توسعه شبکه‌های هوشمند شده و از سوی دیگر، زمینه را برای اقدامات خرابکارانه فراهم نموده است. هک اخیر شبکه برق اوکراین در ۲۳ دسامبر ۲۰۱۵ نشان داد که فروبردن یک جامعه در تاریکی چقدر آسان است [۸].

✓ **تأثیرات آب و هوایی:** امروزه تهدیدات ایجادشده هوافضا (طوفان‌های خورشیدی) توجه جوامع علمی را به خود جلب کرده است. طوفان ژئومغناطیسی یک اختلال موقتی مگنتوسفر^۷ زمین است که از لرزش موج باد خورشیدی یا ابرمیدان مغناطیسی ایجاد می‌گردد و با میدان مغناطیسی زمین تعامل دارد [۹].

رویدادهای آب‌وهوایی سهمگین باعث قطعی‌های بزرگ و اختلالات گسترده شبکه‌های قدرت و به طبع آن منجر به زیان‌های اقتصادی و از آن مهم‌تر قطعی‌های طولانی‌مدت برق شده است. طوفان یخ چین در سال ۲۰۰۸ منجر به قطعی برق ۲۰۰ میلیون نفر شد و هزینه مستقیم این حادثه بیش از ۲/۲ میلیارد دلار تخمین زده شده است [۴]. زمین‌لرزه بزرگ در شرق ژاپن^۸ و سونامی متعاقب مارس ۲۰۱۱ منجر به قطع برق ۸.۵ میلیون مصرف‌کننده شد [۱۸]. همچنین پس از طوفان سندی در اکتبر ۲۰۱۲ هشت میلیون مصرف‌کننده در ۱۵ ایالت در ایالات متحده و با طوفان آیرین در سال ۲۰۱۱ شش و نیم میلیون نفر و پس از طوفان هاروی در سال ۲۰۱۷ بیش از ۲ میلیون مصرف‌کننده دچار قطع برق شدند [۲].

با آگاهی روزافزون از وجود چنین تهدیداتی، تاب‌آوری شبکه‌های قدرت تبدیل به یکی از برجسته‌ترین اولویت‌ها بسیاری از کشورها شده است.

در این مطالعه چارچوبی دو مرحله‌ای مبتنی بر استفاده از شاخص‌های ریسک برای بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع ارائه شده است (دومرحله‌ای بودن روش باعث کاهش قطعی بار نسبت به روش‌های تک‌مرحله‌ای می‌شود). در مرحله اول با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو وضعیت شبکه مشخص می‌شود و شاخص‌های $CVaR\alpha$ و $VaR\alpha$ و حداقل سازی آن با استفاده از باز آرای شبکه، توپولوژی شبکه را تغییر می‌دهد و در مرحله دوم که پس از حادثه است پس از مشخص شدن شدت آسیب و وضعیت قطعی‌ها یک مرحله دیگر باز آرای به منظور کاهش بارهای قطع شده انجام می‌شود که در این روش از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. اکثر روش‌های بازیابی پس از حادثه با مشخص شدن وضعیت شبکه اقدامات اصلاحی را انجام می‌دهند؛ اما در روش ارائه شده با استفاده از منحنی شکست و شبیه‌سازی مونت کارلو و پیش‌بینی‌های آب و هوایی وضعیت شبکه پیش‌بینی و اقدامات اصلاحی برای کاهش بار صورت می‌پذیرد.

۲- تابع هدف و قیود

بازیابی سرویس در سیستم‌های توزیع به معنای راه‌اندازی سوئیچ‌های شبکه به منظور بازیابی حداکثری بار در قسمت‌هایی است که پس از رخداد خطا از سرویس خارج شده‌اند. احتمال شکست وابسته به رویداد اجزای سیستم توزیع (استراکچر یا جزئی از سازه) توسط رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

^۸ The Great East Japan Earthquake (GEJE)

^۹ Non-inferior

^۶ Information and communications technology

^۷ Magnetosphere

می گیرند). در این بخش، روش مطلوبیت فازی تعاملی را برای تعیین معیوب یا مطلوب بودن جواب تصمیم گیرنده پیشنهاد می کنیم.

کران های پایین و بالا پنج تابع هدف مختلف حداقل سازی (۱) نواحی خارج از سرویس، (۲) تعداد عملیات سوئیچینگ، (۳) جریان فیدرها، (۴) انحراف ولتاژ باس به صورت جدول ۱ در نظر گرفته می شود.

جدول ۱ پارامترهای توابع هدف

تابع هدف	پارامتر
تعداد نواحی خارج از سرویس	$f_1^{\max} = 102, f_1^{0.2} = f_1^{\min} = 0, f_1(X_0)$
تعداد عملیات سوئیچینگ	$f_2^{\max} = 100 f_2^{\min} = 0$
انحراف ولتاژ باس	$f_3^{\max} = 0.1 \text{ pu}, f_3^{\min} = 0.05 \text{ pu}$
جریان فیدر	$f_4^{\max} = 1.25 \text{ pu}, f_4^{\min} = 1 \text{ pu}$

۳- الگوریتم ژنتیک

هالند پیشگام استفاده از الگوریتم ژنتیک بود که از آن در طیف وسیعی از تحقیقات و مسائل بهینه سازی استفاده می شود [۱۶]. الگوریتم ژنتیک ساز و کار جستجوی مبتنی بر اصل انتخاب طبیعی و ژنتیک های جمعیت است. متغیرهای مورد نیاز برای طراحی به صورت رشته های محدودی کدگذاری می شوند که متناظر با کروموزوم ها در یک سیستم بیولوژیکی هستند. عملیات اصلی عبارتند از تولید مثل، تقاطع و جهش که وظایف کپی رشته ها، تبادل جایگاه رشته ها و همچنین تغییر برخی از بیت های رشته ها را انجام می دهند. در آخر هم رشته با بزرگ ترین (یا کوچک ترین) مقدار تابع برازش از آخرین مخزن رشته های بالغ پیدا شده و رمزگشایی می شود. چون الگوریتم ژنتیک بر خلاف جستجو برای یک نقطه، جمعیتی از نقاط را جستجو می کند، می تواند خیلی سریع به نقطه بهینه سراسری برسد و در عین حال از جستجوی نقاط بهینه محلی دوری کند. بعلاوه، چون بر خلاف خود پارامترها، با کدگذاری مجموعه پارامترها کار می کند، می تواند محدودیت های تحلیلی مثل ناپیوستگی های فضای جستجو را از بین ببرد. الگوریتم ژنتیک به صورت زیر تشریح می شود.

گام ۱) پارامترهای الگوریتم ژنتیک و داده های سیستم را وارد کنید.

گام ۲) اولین جمعیت کروموزوم ها را تولید کنید.

گام ۳) تمام مقادیر برازش کروموزوم ها در جمعیت را ارزیابی کنید.

گام ۴) تولید مثل.

در این عملیات، تعداد تولید مثل یک کروموزوم به صورت زیر مشخص می شود:

$$n_i = G \left[N \times \frac{C_i}{\sum_{i=1}^N C_i} \right] \quad (8)$$

$$C_i = \frac{1}{1 + \max[u_{fi} - u_{fi}(\bar{X})]} \quad (9)$$

که در آن N بیانگر اندازه جمعیت است، C_i مقدار برازش کروموزوم i را نشان می دهد، $G[X]$ نیز درایه های X را به صورت عدد صحیح گرد می کند.

✓ اگر مجموع n_i ها کمتر از N باشد، کمبودها با مشتق گیری های بهترین کروموزوم جبران می شوند (یعنی صرفاً تغییر وضعیت یک سویچ کلی و یک سویچ اتصالی به صورت تصادفی).

گام ۵) جهش. تعداد جهش ها، یعنی n ، برابر با حاصل ضرب N در احتمال جهش است.

گام ۶) تقاطع.

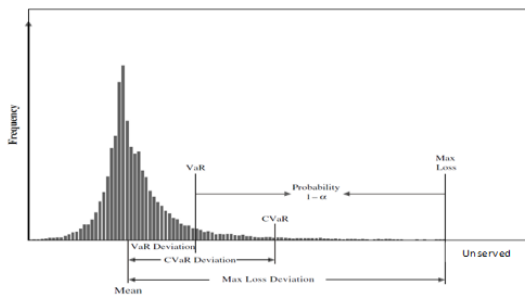
✓ تعداد تقاطع برابر با ضرب $(N/2)$ در احتمال تقاطع (هر تقاطعی دو کروموزوم تولید می کند) است.

✓ کروموزوم های انتخاب نشده در جمعیت باقی می ماند.

گام ۷) بررسی معیار توقف عملیات. اگر الگوی بهینه $\bar{X}$ بعد از تعداد مشخص شده ای از تکرارها بدون تغییر باقی بماند، در این صورت جواب در خروجی به نمایش در می آید. در غیر این صورت، به گام ۴ می رود.

پایه ی روش بازیابی ما از مقاله [۱۳] برداشت شده است. برای حل مسئله بازیابی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. این مسئله یک مسئله چندهدفه می باشد که توابع هدف در ادامه شرح داده خواهد شد. ارزش در معرض خطر مشروط^{۱۰} که توسط روکافلار و اوریاسف معرفی شد، یک ابزار محبوب برای مدیریت ریسک است. CVaR تقریباً (یا دقیقاً، در شرایط خاص) برابر با میانگین درصدی از بدترین حالت های ضرر است. VaR به شدت در برنامه های مختلف مهندسی، از جمله موارد مالی مورد استفاده قرار می گیرد.

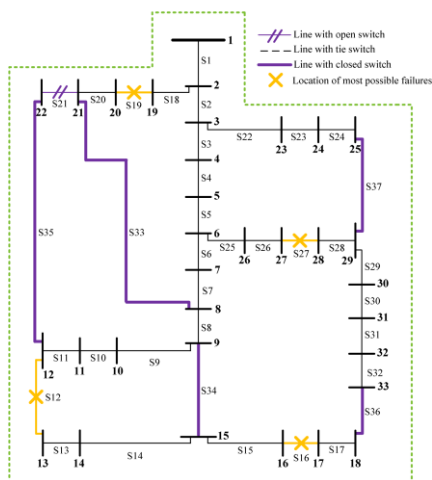
برای محاسبه CVaR ابتدا ما باید میزان بار از دست رفته (برحسب کیلووات) را محاسبه کنیم (شکل ۱). در این تحقیق میزان بار از دست رفته U در هر سناریو توسط نرم افزار OpenDss محاسبه می شود. در بسیاری از مطالعات مالی CVaR دقیقه مساوی با میانگین α در صد بدترین شرایط (دم توزیع) می شود. در مطالعات $\alpha = 99.9\%$ و 95% در صد بسته به شرایط استفاده می شود ما در این تحقیق از $\alpha = 95\%$ استفاده کرده ایم.



شکل ۱- محاسبه VaR و CVaR

۴- نتایج

یکی از تحقیقات خوبی که در زمینه تاب آوری و تغییر وضعیت شبکه با استفاده از بازآرایی پیش از حادثه انجام شده مقاله [21] می باشد. در این مقاله در حقیقت پیش از حادثه شبکه را یک مرحله بازآرایی قرار داده (شکل ۲) و متناسب با منحنی های شکست، توابع احتمال طبق الگوریتم پیش بینی و موقعیت خط و فیدر آسیب دیده بازیابی می گردد و پس از عبور از حادثه یک مرحله دیگر بازآرایی انجام می شود که پیرو این رویداد بازیابی خط شبکه و فیدر مرتبط با هدف کمترین قطعی بار و کاهش هزینه انجام می گردد.



شکل ۲- شبکه بازآرایی شده مقاله [۲۱]

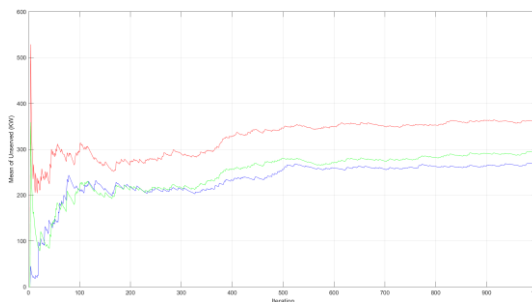
¹⁰ Conditional value at risk (CVaR)

بهبود تاب‌آوری مربوط به پس از حادثه می‌باشد اما می‌توان پیش از حادثه وضعیت شبکه را بهبود می‌دهد و باعث کاهش احتمال قطعی بار می‌شود.

مراجع:

- [1] A. Gholami, T. Shekari, M. H. Amiroun, F. Aminifar, M. H. Amini, and A. Sargolzaei. "Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience." *IEEE Access*. vol. 6. pp.32035-32053. 2018
- [2] N. Bhusal, M. Abdelmalak, M. Kamruzzaman, and M. Benidris. "Power system resilience: Current practices, challenges, and future directions." *IEEE Access*. vol. 8. pp. 18064-18086. 2020.
- [3] E. O. o. t. P. o. t. U. States. "Economic benefits of increasing electric grid resilience to weather outages." *Exec Off Pres*. August 2013.
- [4] S. Küfeoğlu, S. Pritinen, and M. Lehtonen. "A summary of the recent extreme weather events and their impacts on electricity." *Int. Rev. Electr. Eng*. vol. 9. no. 4. pp. 821-828. 2014.
- [5] NERC. "Hurricane Harvey Event Analysis Report." March 2018. [Online]. Available: <https://www.lamar.edu/files/documents/resilience-recovery/grant/recovery-and-resiliency/north-american-electric-reliability-corporation-nerc-harvey-event-analysis-report-1.pdf>
- [6] M. Vaiman et al.. "Risk assessment of cascading outages: Methodologies and challenges." *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 27. no. 2. p. 631. 2012.
- [7] Y. Wang, C. Chen, J. Wang, and R. Baldick. "Research on resilience of power systems under natural disasters—A review." *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 31. no. 2. pp.1604.1613.2015
- [8] D. U. Case. "Analysis of the cyber attack on the Ukrainian power grid." *Electricity Information Sharing and Analysis Center (E-ISAC)*. vol. 388. 2016
- [9] M. Panteli, C. Pickering, S. Wilkinson, R. Dawson, and P. Mancarella. "Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures." *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 32. no. 5. pp.3747-3757. 2016.
- [10] 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. pp.3021.3029.2014.
- [11] R. Pérez-Guerrero, G. T. Heydt, N. J. Jack, B. K. Keel, and A. R. Castelano. "Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming." *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol.23. no. 3. pp. 1589-1596. 2008.
- [12] S. Poudel, A. Dubey, and A. Bose. "Risk-based probabilistic quantification of power distribution system operational resilience." *IEEE Systems Journal*. vol. 14. no. 3. pp. 3506-3517. 2019.
- [13] Y.-T. Hsiao and C.-Y. Chien. "Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method." *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 15. no. 4. pp.1394-1400. 2000.
- [14] M. E. Baran and F. F. Wu. "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing." *IEEE Power Engineering Review*. vol. 9. no. 4. pp. 101-102. 2019
- [15] L. Davis. "Handbook of Genetic Algorithms. Van Norstrand Reinhold. 1991." *New York*.
- [16] Y. Fukuyama, H.-D. Chiang, and K. N. Miu. "Parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. vol. 18. no. 2. pp. 111-119. 1996.

با مقایسه این شبکه و شبکه اصلی این پژوهش اطلاعات زیر به دست می‌آید.



شکل ۳- بار ازدست رفته در شبکه اصلی (نمودار قرمز)، شبکه بازآرایی شده توسط روش مقاله [۲۱] (نمودار سبز) و شبکه بازآرایی شده توسط روش پیشنهادی (نمودار آبی)

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود میانگین بار ازدست‌رفته در این پژوهش نسبت به مقاله [۲۱] کاهش داشته که در حقیقت طبق الگوریتم انجام شده هنگامی که یک بلای طبیعی در یک شبکه توزیع برای چند روز رخ دهد. این الگوریتم یک مدل مبتنی بر بهینه‌سازی دو سطحی را برای پیکربندی مجدد شبکه توزیع به منظور بهبود انعطاف‌پذیری شبکه توزیع برق در برابر حوادث آب و هوایی شدید مانند طوفان با هدف به حداقل رساندن هزینه قطع بار ارائه می‌کند که در پیکربندی و بازآرایی اولیه با توجه به پیش‌بینی خطوط شکست احتمالی از استراتژی پیکربندی مجدد شبکه برای به حداقل رساندن هزینه مورد انتظار قطع بار استفاده گردیده است و در پیکربندی و بازآرایی ثانویه، پیکربندی مجدد جدیدی برای بازیابی بارهای سیستم و به حداقل رساندن هزینه قطع بار پس از طوفان انجام گردیده است. مدل پیشنهادی بهبودی و اثربخش بودن نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی را در افزایش انعطاف‌پذیری شبکه با توجه به پیکربندی مجدد شبکه را در مواجهه با بلایای طبیعی شدید نشان می‌دهد.

جدول ۲ مقایسه شاخص‌های CVaR، VaR و بار ازدست رفته

مورد	VaR (kw)	CVaR (kw)	میانگین بار ازدست رفته (kw)
شبکه اصلی	1935	2149.2	360.41
نتایج مقاله [۲۱]	1460	1901.3	292.4
روش پیشنهادی	1495	1899.7	268.31

با توجه به اطلاعات بالا شبکه این پژوهش در دو شاخص CVaR و بار ازدست رفته^{۱۱} کاهش داشته و از شبکه مقاله یادشده عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

نتیجه‌گیری

پس از توضیحات ارائه‌شده در بخش قبل، به این نتیجه رسیدیم که با استفاده از این روش می‌توان میانگین قطعی برق مصرف‌کننده را کاهش داد و CVaR را که میانگین بدترین حالت است را نیز کم کرد. اکثریت روش‌های

¹¹ Mean of Unserved

- [20] R. T. Rockafellar and S. Uryasev. "Optimization of conditional value-at-risk." *Journal of risk*. vol. 2, pp. 21-42. 2000.
- [21] M. S. Khomami, K. Jalilpoor, M. T. Kenari, and M. S. Sepasian, "Bi-level network reconfiguration model to improve the resilience of distribution systems against extreme weather events," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 15, pp. 3302–3310, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6971>.
- [17] S .A. Taher and M. H. Karimi. "Optimal reconfiguration and DG allocation in balanced and unbalanced distribution systems." *Ain Shams Engineering Journal*. vol. 5. no. 3. pp. 735-749. 2014.
- [18] H. Aki. "Demand-side resiliency and electricity continuity: experiences and lessons learned in Japan." *Proceedings of the IEEE*. vol. 105. no. 7. pp. 1443-1455. 2017.
- [19] R. T. Rockafellar and S. Uryasev. "Conditional value-at-risk for general loss distributions." *Journal of banking & finance*. vol. 26. no.7. pp. 1443-1471. 2002.