دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

بازیابی سیستم قدرت با درنظر گرفتن خروج ترانس

مهدی شفیعی[۱]، معین سالاری[۲]

[۱]استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران m-shafiee@tvu.ac.ir

[۲]دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران moeinsalari2000@gmail.com

چکیده

جوامع مدرن به‌طور گسترده‌ای وابسته به انرژی الکتریکی هستند. تقاضا برای انرژی الکتریکی قابل‌اطمینان روزبه‌روز رو به افزایش است و این افزایش تقاضا بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت را پیچیده‌تر کرده و احتمال روی دادن خطا در شبکه را افزایش داده است. علاوه بر این، با انجام تجدید ساختار و مقررات زدایی در صنعت برق، احتمال روی دادن خاموشی‌های سراسری در شبکه‌های برق افزایش‌یافته است. اثرات منفی خاموشی‌های طولانی‌مدت بر جامعه، اقتصاد و خود سیستم قدرت باعث شده تا مسئله بازیابی سیستم قدرت پس از فروپاشی جزئی یا سراسری، از اهمیت ویژه ای برخوردار شود. به دلیل عملکرد غیرعادی شبکه پس از روی دادن خاموشی، بازیابی سیستم قدرت نیازمند برنامه‌ریزی دقیق می باشد. در مقاله حاضر با توجه به اهمیت موضوع بازیابی پس از وقوع حادثه به شبیه سازی مسئله بازیابی بر اثر خروج یکی از ترانس های شبکه پرداخته شده است. جهت تعیین بهینه عملیات بازیابی از نرم افزار دیگسایلنت استفاده گردیده است.

واژه‌های کلیدی

بازیابی سیستم قدرت، خاموشی سراسری، خروج ترانس.

۱. مقدمه

وقوع خاموشی سراسری، علاوه بر مشکلات فنی بسیاری که به وجود می‌آورد، صدمات اقتصادی و اجتماعی جبران‌ناپذیری دربر دارد خاموشی سراسری شبکه‌های قدرت همواره به‌عنوان یک چالش، فراروی مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان و اپراتورهای سیستم قدرت بوده است. وقوع چندین خاموشی سراسری در یک دهه اخیر در ایالات‌متحده، ایتالیا، روسیه، یونان، اتحادیه اروپا و ایران بیانگر افزایش احتمال خاموشی سراسری در سطح دنیا بوده است. این امر، لزوم توجه بیشتر بررسی و شناخت این پدیده پیچیده را نشان می‌دهد. به همین دلیل، پیش‌بینی امکان رخ دادن رویدادهای پشت سرهم، شناسایی خطاها، اجزای آسیب‌پذیر سیستم قدرت، خطوط دارای اضافه‌بار و بررسی محدودیت‌های ولتاژ همه از عواملی هستند که می‌تواند در شناسایی بخش های آسیب‌دیده سیستم قدرت و در تصمیم‌گیری برای جلوگیری از ناپایداری سراسری به ما کمک کند[۱-۳].

اکثر خاموشی‌های سراسری که در سال‌های اخیر رخداده به دلیل از مدار خارج شدن یک خط مهم در سیستم بوده است. این اتفاق باعث اضافه‌بار بر روی خطوط دیگر و عملکرد رله‌های اضافه‌بار آن‌ها می‌شود. با خارج شدن خطوط به‌صورت پشت سر هم، فرکانس سیستم تحت تأثیر قرارگرفته و اکثراً منجر به حذف بار خودکار و خاموشی سراسری در سیستم شده است [۴]. به‌عنوان نمونه می‌توان به خاموشی سراسری سال ۲۰۰۷ کلمبیا اشاره کرد که در این خاموشی، یک خط 280 kV به علت تعمیرات از مدار خارج شد و با خارج شدن آن چند خط دیگر دچار اضافه‌بار شده و از مدار خارج شدند در ادامه فرکانس سیستم کاهش یافت و باوجود حذف بار خودکار، سیستم دچار خاموشی سراسری شد [۵].

وقوع خاموشی سراسری، علاوه بر مشکلات فنی بسیاری که به وجود می‌آورد، صدمات اقتصادی و اجتماعی جبران‌ناپذیری دربر دارد [۶]. به‌عنوان‌مثال در تابستان سال ۲۰۰۳ خاموشی سراسری بخش وسیعی از آمریکا و کانادا را در برگرفت. این خاموشی باعث بی‌برقی بیش از ۵۰ میلیون نفر در ایالات‌متحده و کانادا شد. [۷]. در این خاموشی سراسری نزدیک به ۶۲ هزار مگاوات توان از ۲۶۰ نیروگاه در کمتر از یک دقیقه از مدار خارج شد [۸]. همچنین خاموشی سراسری سال ۲۰۰۳ ایتالیا ازنظر چگونگی شروع و اتفاقات پشت سرهمی که باعث وقوع آن شد، قابل‌توجه است [۱ و ۹] .

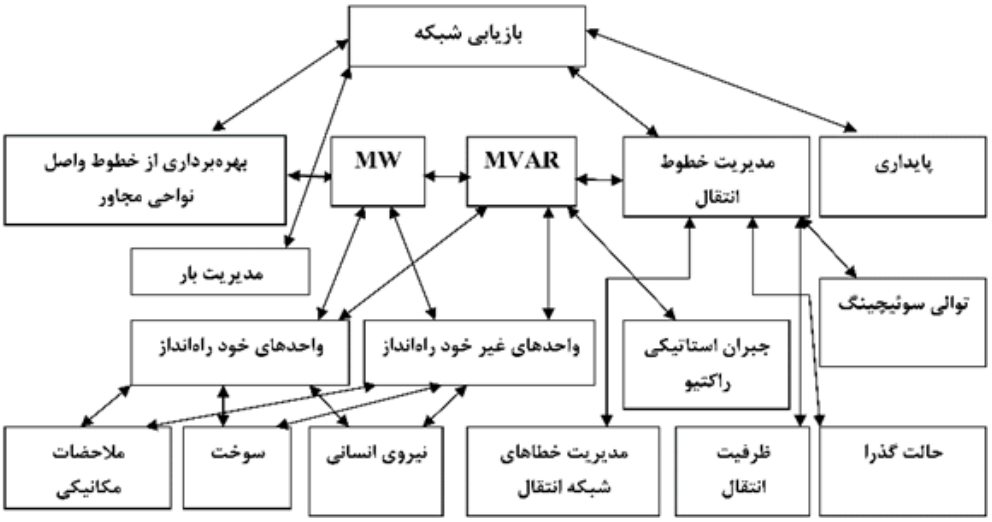
بازیابی سیستم قدرت بر روی سطوح و بخش‌های مختلف سیستم قدرت انجام می‌شود. برای مثال [۱۰] فرآیند بازیابی را در سیستم انتقال با در نظر گرفتن بهینه‌سازی در بخش‌های مختلف، اتصال بارها و پخش توان و باهدف یافتن یک توالی مناسب جهت حداقل کردن زمان خاموشی مورد بررسی قرار داده است. این مرجع برای حل مسئله ترتیب بازیابی از پخش بار DC و تقریب خطی پخش بار AC استفاده کرده و نشان داده است که پخش بار DC برای حل مسئله چندان دقیق نیست. در عوض مدل تقریب خطی پخش بار برای تعیین برنامه‌ی بازیابی به‌اندازه‌ی کافی دقیق است. در [۱۱] با بیان اینکه مسئله بازیابی سیستم قدرت یک مسئله بهینه‌سازی چند متغیره و چند قیدی است، یک مدل چند هدفه بر اساس ترکیب فناوری چندعاملی و روش جستجوی ممنوع برای بازیابی سیستم انتقال معرفی‌شده است. برخی از مراجع فرآیند بازیابی را در سیستم های توزیع مورد بررسی قرار داده‌اند. به‌عنوان‌مثال [۱۲] با بکارگیری الگوریتم ژنتیک، علاوه بر کاهش زمان موردنیاز برای انجام محاسبات، عملیات بریکر زنی در طی فرآیند بازیابی را به حداقل رسانده است. بعضی از پژوهش‌های انجام‌شده مانند کار انجام‌شده در مرجع [۱۰] بر مواردی که تنها بخش کوچکی از سیستم دچار قطعی می‌شود تمرکز دارند. برخی از مراجع دیگر نیز بر روی راه‌اندازی مجدد سیستم بعد از وقوع یک خاموشی سراسری متمرکز هستند. برای مثال مراجع [۱۳و۱۴] با فرض وقوع خاموشی سراسری، از یک طرح بهینه به روش بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO) برای ساختن مجدد شبکه استفاده کرده است. بعد از وقوع خاموشی، راه‌اندازی ژنراتورها با یک ترتیب مناسب، یکی از زیر مسئله های مهم بازیابی است. در [۱۵] با هدف حداکثر کردن مقدار بار بازیابی شده و با حل مسئله‌ی کوله‌پشتی در یک سیستم تست دارای ۱۵ ژنراتور، یک ترتیب بهینه برای راه‌اندازی ژنراتورهای سیستم ارائه شده است. در [۱۶] با معرفی یک روش مبتنی بر بررسی عددی ماتریس گره شبکه و به کمک یک رویکرد ابتکاری با در نظر گرفتن اولویت بارها، جزیره‌های مناسب برای راه‌اندازی مجدد شبکه را انتخاب نموده است. در ادامه به بیان چارچوب کلی فرآیند بازیابی پرداخته می شود.

۲. چهارچوب کلی فرآیند بازیابی سیستم قدرت

فرآیند بازیابی سیستم قدرت فرآیند پیچیده چند مرحله‌ای است که شامل بسیاری از مطالعات مانند پخش بار، اتصال کوتاه، اعوجاج هارمونیکی، پایداری الکترومکانیکی و تحلیل گذرای الکترومغناطیسی است. شکل (۱) نمای کلی فضای بازیابی را نمایش می‌دهد.

چهارچوب کلی فرآیند بازیابی سیستم قدرت به‌طور خلاصه عبارت است از [۱۷]:

- بیان اهداف بازیابی
- رویکردهای متفاوت برای حل مسئله بازیابی سیستم های قدرت
- اقدامات اولیه در شرایط غیرعادی
- ترتیب اجرای عملیات بازیابی
- گام‌ها و اقداماتی در جهت افزایش آمادگی



شکل ۱. شمای کلی فضای بازیابی سیستم قدرت

۱.۲. اهداف بازیابی

هدف کلی بازیابی، ابتدا بازسازی شبکه قدرت به صورت پایدار و سپس وصل مجدد تمام بارهای قطع‌شده است. مطابق شکل زیر برای رسیدن به این اهداف باید ملزومات موردنظر برآورده شوند [۱۷].

۲.۲. رویکردهای متفاوت برای حل مسئله بازیابی سیستم‌های قدرت

اخیراً، ۴ روش برای حل مسئله بازیابی سیستم های قدرت برای جایگزینی دستورالعمل‌های از پیش تعیین‌شده معرفی‌شده است. این ۴ روش عبارت‌اند از [۱۷]:

- روش برنامه‌ریزی ریاضی
- روش‌های ابتکاری
- سیستمهای خبره
- محاسبات نرم (شبکه عصبی, الگوریتم ژنتیک, فازی و غیره)

۳.۲. اقدامات اولیه در شرایط غیرعادی

به دنبال وقوع یک اختلال بزرگ، سیستم باید مورد ارزیابی قرارگرفته و حاشیه پایداری کافی ایجاد شود. بنابراین لازم است اقدامات زیر انجام شود [۱۷]:

- ارزیابی و بازبینی شرایط
- محدود کردن قطعی توان بزرگ

۴.۲. ترتیب اجرای عملیات بازیابی

زمانی که یک قطعی توان بزرگ ارزیابی و سپس اقدامات اولیه برای پایدار شدن سیستم انجام می‌شود، دستیابی به اهداف بازیابی نیازمند اجرای اقدامات زیر است [۱۷]:

- شروع بازیابی
- آماده کردن منبع راه‌انداز اولیه
- آماده کردن مسیر بازیابی
- ساختن یک زیرسیستم پایدار
- اتصال جزیره‌ها به BPS
- اتصال جزیره‌های مجاور به یکدیگر
- بازیابی بارهای قطع‌شده
- پیگیری‌های لازم بعد از بازیابی

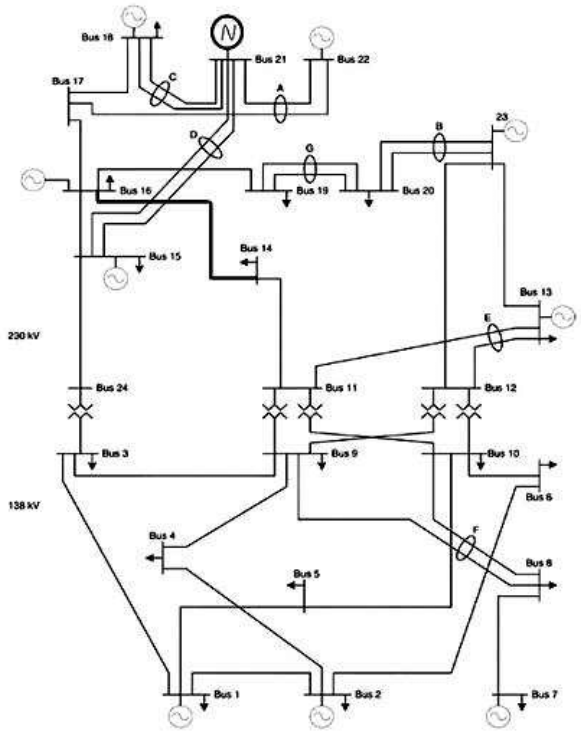
شکل ۲. اهداف و ملزومات بازیابی

۳. مطالعه موردی

در قسمت های قبل، به‌تفصیل به اهمیت بازیابی سیستم های قدرت پس از خاموشی های سراسری و جزئی و همچنین روش های بازیابی سیستم های قدرت پرداخته شد. در این قسمت قصد بررسی نمونه ای از رخدادهای ناخواسته (خروج ترانس) که منجر به خاموشی در سیستم قدرت خواهد شد و همچنین بازیابی سیستم در این شرایط می پردازیم.

۱.۳. شبکه مورد مطالعه

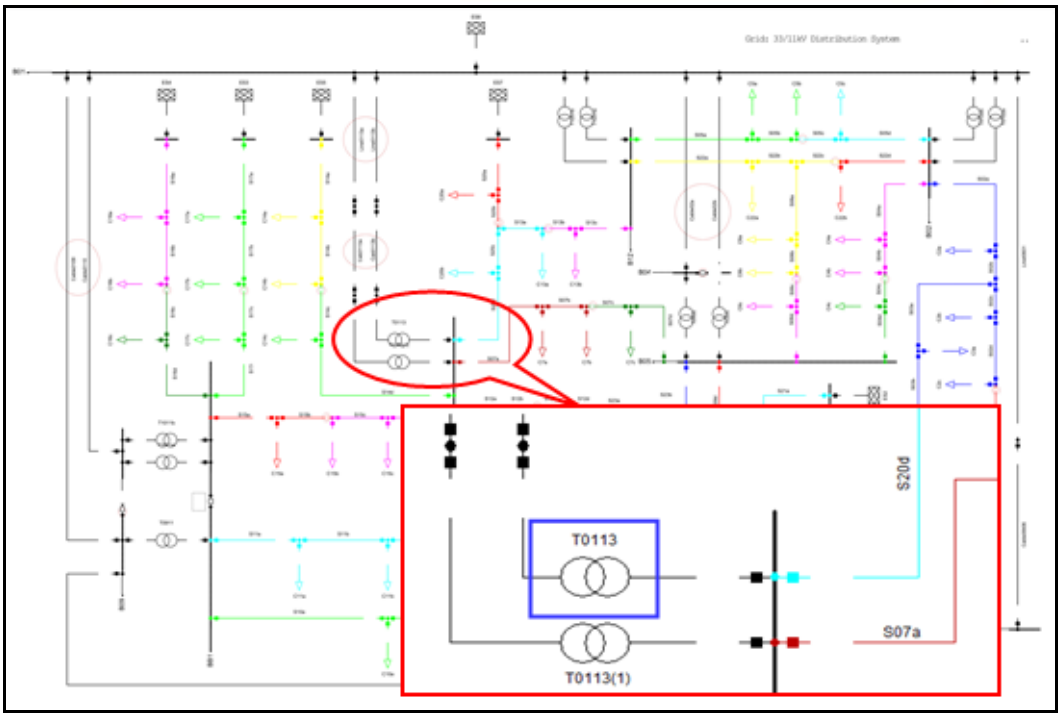
شبکه مورد مطالعه در این بخش، شبکه Reliability Test System (RTS) [۱۸] است که یکی از معروف ترین شبکه های مورد مطالعه در زمینه‌ی قابلیت اطمینان است. دیاگرام تک‌خطی این شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است جهت انجام مطالعات از نرم افزار دیگسایلنت منوی Optimal Power Restoration استفاده شده است.



شکل ۳. دیاگرام تک‌خطی شبکه [۱۸]

۲.۳. سناریو مورد مطالعه- خروج ترانس

در این سناریو ترانس T0113 مطابق شکل (۴) دچار خطا با نرخ پیش فرض شده است. نتایج مربوط به بازیابی شبکه برای هر مرحله در ادامه آورده شده است.



شکل ۴. شبیه سازی شبکه و ترانس موردنظر در نرم افزار دیگسایلنت

Contingency:	n-1		
Fault location (n-1)			
Component:	T0113	2-Winding Transformer	
Network:	33/11kV Distribution System		
Repair Duration:	343.00 h (20580 min)		
Failure frequency:	0.020 1/a		
Summary of failure effects			
	Power	Customers	
Interrupted:	0.0 kW	0	
Restored:	0.0 kW (0.0 %)	0 (0.0 %)	
Energy not supplied	0.0 kWh		
	1/failure	Yearly	Yearly (load state)
Interruption costs:	0.0 k$	0.000 k$/a	*100.00 % = 0.000 k$/a

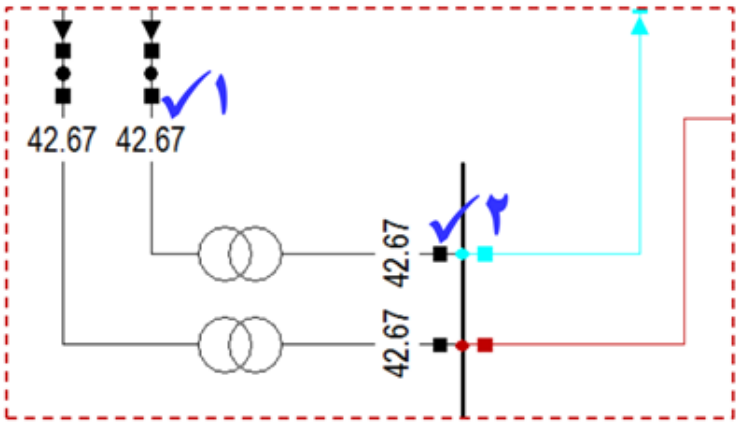
شکل ۵. نتایج کلی سناریو

Time [min]	Step	Action	Device	Station:		
0:00		Open	S0.3.1	Station4		
0:00		Open	Switch			
مرحله‌ی اول بازیابی					Interrupted:	0.0 kW
20580:00	Repair:					
مرحله‌ی دوم بازیابی					ENS: (0:00 - 20580:00)	0.0 kWh
					Total ENS:	0.0 kWh

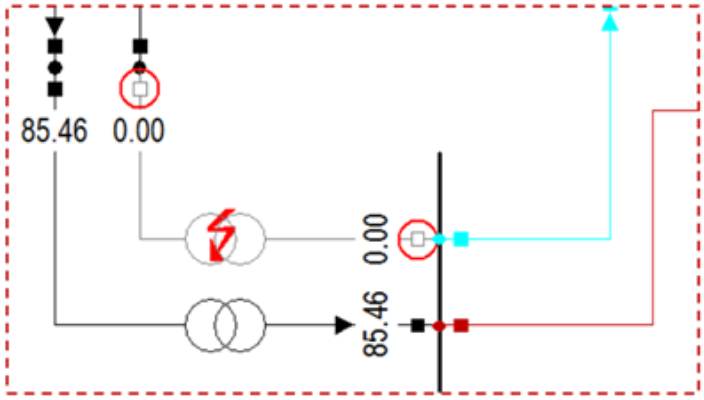
شکل ۶. نتایج جزئی سناریو

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می شود مدت زمان تعمیر این تجهیز برابر ۳۴۳ ساعت بوده است. از جهت دیگر و به دلیل وجود ترانسفورماتور موازی با این تجیهز، میزان بار از دست رفته و انرژی تامین نشده برابر صفر بوده است. در زمان کارکرد موازی این دو تجهیز، میزان بارگذاری هر یک از ترانسفورماتورها برابر ۴۲.۶۷٪ می باشد اما پس از خروج ترانسفورماتور T0113، میزان بارگذاری

ترانسفورماتور موازی با آن برابر ۸۵.۴۶٪ می شود (این اعداد در شکل های (۷) و (۸) به خوبی مشهود می باشد.). در این سناریو به دلیل وجود تجهیز موازی با تجهیز مورد خطا، بر شبکه مورد مطالعه هزینه ای تحمیل نشده است و هیچ مشترکی بی بار نمانده است.



شکل ۷. مرحله اول، حالت عادی شبکه و اجرای پخش بار



شکل ۸. مرحله دوم، رخداد خطا در ترانسفورماتور T۰۱۱۳ و خروج این تجهیز

۴. نتیجه گیری

گسترش شبکه‌های قدرت و رشد قابل‌ملاحظه بار، برنامه ریزی و بهره‌برداری از آن‌ها را با مشکلات متعددی مواجه نموده است. این عوامل به همراه فرسودگی تجهیزات، باعث افزایش پتانسیل وقوع خاموشی‌های سراسری و ناحیه‌ای شده است. پس از حادث شدن یک خاموشی گسترده در شبکه قدرت، موضوعی که از اهمیت فراوانی برخوردار است بازیابی هرچه سریع‌تر سیستم می‌باشد. در سال‌های اخیر در این زمینه تلاش‌های گسترده‌ای صورت گرفته که منجر به ایجاد ابتکارات جدیدی در برنامه‌ریزی بازیابی شده است. باوجود تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه، همچنان بهره‌برداران سیستم برای اجرای این برنامه‌ها با مشکلات فراوانی روبرو هستند. در مقاله حاضر به بررسی مسئله بازیابی شبکه با وجود خطا در یکی از ترانس های شبکه پرداخته شد. در ادامه به نکات قابل توجه در این زمینه اشاره می شود:

- ✓ همان‌طور که در سناریوی خروج ترانس مشاهده گردید، وجود تجهیزات موازی در مواقع رخداد خاموشی بسیار مفید است.
- ✓ وجود مسیرهای متعدد به‌منظور تأمین بارهای مختلف شبکه یکی از راهکارهای بسیار مطلوب به‌منظور تأمین سریع بارها می باشد.
- ✓ با توجه به نرخ خرابی تجهیزات و نیز اهمیت هر تجهیز بایستی صورت های مختلف بازیابی از قبل اعمال و ازنظر اقتصادی سنجیده شوند.

- ✓ بازیابی در سیستم های قدرت بایستی با سرعت هرچه‌تمام‌تر انجام شود تا بتوان هزینه های ناشی از خاموشی را کاهش داد.

منابع

[1] Berizzi A. The Italian 2003 blackout. In IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. 2004 Jun 6 (pp. 1673-1679). IEEE.
[2] Bialek JW. Why has it happened again? Comparison between the UCTE blackout in 2006 and the blackouts of 2003. In2007 IEEE Lausanne Power Tech 2007 Jul 1 (pp. 51-56). IEEE.
[3] . Fathi R, Tousi B, Galvani S. Allocation of renewable resources with radial distribution network reconfiguration using improved salp swarm algorithm. Applied Soft Computing. 2023 Jan 1;132:109828.
[4] Wong JJ, Su CT, Liu CS, Chang CL. Study on the 729 blackout in the Taiwan power system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2007 Oct 1;29(8):589-99.
[5] Ruiz CA, Orrego NJ, Gutierrez JF. The Colombian 2007 black out. In2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America 2008 Aug 13 (pp. 1-5). IEEE.
[6] ICF Consulting, The Economic Cost of the Blackout; An Issue Paper on the Northeastern Blackout, August 14, 2003, Oct. 1999.
[7] Joo SK, Kim JC, Liu CC. Empirical analysis of the impact of 2003 blackout on security values of US utilities and electrical equipment manufacturing firms. IEEE Transactions on Power Systems. 2007 Jul 30;22(3):1012-8.
[8] Maldonado GI. The performance of North American nuclear power plants during the electric power blackout of August 14, 2003. InIEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004. 2004 Oct 16 (Vol. 7, pp. 4603-4606). IEEE.
[9] Andersson G, Donalek P, Farmer R, Hatziargyriou N, Kamwa I, Kundur P, Martins N, Paserba J, Pourbeik P, Sanchez-Gasca J, Schulz R. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance. IEEE transactions on Power Systems. 2005 Oct 31;20(4):1922-8.
[10] Van Hentenryck P, Coffrin C. Transmission system repair and restoration. Mathematical Programming. 2015 Jun;151:347-73.
[11] He X, Liao Z, Guo W, Wen F, Liang J, Fu J. A multi-objective model for transmission network restoration based on multi-agent and tabu search. In2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2008 Apr 6 (pp. 2392-2397). IEEE.
[12] Iwasaki K, Aoki H. Service restoration problem in distribution power system using improved ga. Electrical Engineering in Japan. 2009 Jan 15;166(1):10-9.
[13] Gu X. Reconfiguration of network skeleton based on discrete particle-swarm optimization for black-start restoration. In2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006 Jun 18 (pp. 7-pp). IEEE.
[14] Faraby MD, Sofyan S, Idris AR, Fitriati A. Optimization of Network Reconfiguration in the ULP Way Halim Distribution System, Bandar Lampung City Considering the Use of Nonlinear Loads. In2023 International Conference On Cyber Management And Engineering (CyMaEn) 2023 Jan 26 (pp. 486-491). IEEE.
[15] Liu Q, Shi L, Zhou M, Li G, Ni Y. A new solution to generators start-up sequence during power system restoration. In2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2008 Apr 6 (pp. 2845-2849). IEEE.
[16] Mota AA, Mota LT, Morelato A. Restoration building blocks identification using a heuristic search approach. In2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006 Jun 18 (pp. 7-pp). IEEE.

[17] Muir A, Lopatto J. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations.

[18] Pinheiro JM, Dornellas CR, Schilling MT, Melo AC, Mello JC. Probing the new IEEE reliability test system (RTS-96): HL-II assessment. IEEE Transactions on Power Systems. 1998 Feb;13(1):171-6.