نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، (پیاپی ۵۱): صص ۱۰-۱

علمی- پژوهشی

بهبود تاب‌آوری شبکه قدرت در مواجهه با حملات متمرکز با استفاده از آنالیز پیشامد

مسعود میرصادقی[۱]، فرید موذن[۲]، رضا غفارپور*[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۷

چکیده

در جوامع امروزی سامانه‌های قدرت به‌عنوان یکی از زیرساخت حیاتی، علی‌رغم پیشرفت‌های وسیع، در معرض تهدیدات متعدد طبیعی و غیر طبیعی هستند. شبکه‌های قدرت در قدیم تنها به گونه‌ای طراحی می‌شدند که در برابر رخدادهای با احتمالات قابل پیش‌بینی (حوادث معمول) مقاوم باشند. این در حالی است که حوادث با احتمال رخداد کم و اثرات مخرب زیاد به‌عنوان یک چالش اساسی محسوب می‌شوند. انتظار می‌رود شبکه‌های قدرت در مواجهه با چنین حوادثی، انعطاف‌پذیری لازم را داشته باشند و به سرعت مختل نشوند. این مهم در قالب مفهوم تاب‌آوری مطرح می‌گردد. در این مقاله پس از بیان مفاهیم و مبانی تاب‌آوری با نگاهی بر سوابق پژوهش‌ها، به بررسی استراتژی‌های ارتقای تاب‌آوری و به‌طور خاص راهکار «زیرزمینی‌سازی خطوط» پرداخته می‌شود. همچنین در ادامه سناریوی کلی پژوهش، با فرض تهدید به‌صورت یک حمله فیزیکی خرابکارانه و متمرکز تعریف می‌شود. با درنظر گرفتن قیود محدودیت بودجه و هزینه‌های فراوان اجرایی شدن این راهکار، الگوریتمی جهت تعیین اولویت خطوط و باس‌های شبکه پیشنهاد می‌گردد. این الگوریتم با فرض شرایط ایستا برای پاسخ به مسئله، از دو رویکرد آنالیز پیشامد (به کمک معیار بار از دست رفته) و نظر خبرگان برای دریافت بهترین اولویت به‌منظور اجرای زیرزمینی خطوط بهره می‌گیرد. در پایان روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۹ باسه IEEE و به کمک نرم‌افزار دیگسایلنت اجرا و پس از دریافت داده‌های مورد نظر، نتایج ارائه و تحلیل می‌شوند تا توانایی‌های روش پیشنهادی اثبات گردد.

کلید واژه‌ها: تاب‌آوری شبکه قدرت، حوادث HILP، زیرزمینی‌سازی خطوط، شاخص بار از دست رفته، آنالیز پیشامد

---

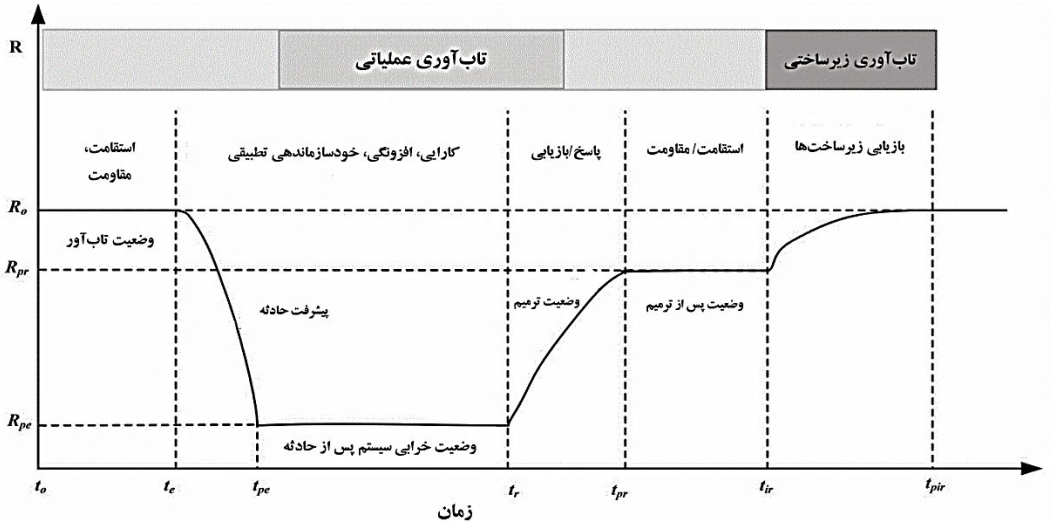
[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

[۲] دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

[۳] استادیار دانشگاه جامع امام حسین(ع) ، تهران، ایران- (rghaffarpour@ihu.ac.ir)- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، حوادث شدید طبیعی مانند طوفان، زلزله و سیل و همچنین حملات غیر طبیعی شامل حملات سایبری و فیزیکی، به طرز چشم‌گیری زیرساخت‌های انرژی را تحت تأثیر قرار داده است. حوزه تاب‌آوری و به‌کارگیری تمهیدات مرتبط، می‌تواند از خاموشی‌های متعدد ناشی از اینگونه تهدیدات بکاهد. این در حالی است که خاموشی‌های ناشی از قطع برق- هر چند کوتاه مدت - تبعات اجتماعی، سیاسی، اقتصادی سنگینی خواهد داشت و در صورت بروز اختلال در روند تأمین و توزیع برق به‌عنوان شریان حیاتی زندگی در جامعه، سایر فعالیت‌ها نیز تحت‌الشعاع قرار می‌گیرد. بنابراین تقویت زیرساخت شبکه‌های قدرت در مواجه با سناریوی حوادث مختلف بسیار حائز اهمیت است [۱]. به عبارت دیگر افزایش پیچیدگی و وابستگی متقابل بین زیرساخت‌های حیاتی و وابستگی روزافزون به زیرساخت‌های انرژی الکتریکی، "تاب‌آوری شبکه انرژی" را در اولویت اصلی در حراست از رشد اقتصادی و اجتماعی جوامع مدرن قرار داده است.



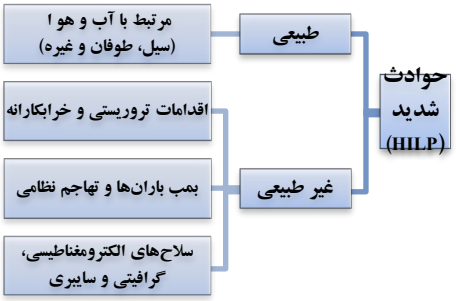
شکل (۲): منحنی جامع تاب‌آوری [۱۰]

۱-۱- پیش‌زمینه

تاب‌آوری از کلمه لاتین resiliō یا resiliere گرفته شده که به معنای پرش به عقب است و به معنای توانایی شیء در بازگشت به شکل یا موقعیت اصلی خود پس از استرس اشاره دارد. اولین بار مفهوم تاب‌آوری در سال ۱۹۷۳ توسط اکولوژیست کانادایی هولینگ[1] به‌عنوان معیار "پایداری سامانه‌ها و توانایی آن‌ها در جذب تغییر و آشفتگی و همچنان حفظ روابط مشابه بین جمعیت‌ها یا متغیرهای حالت" تعریف شد. از زمان این تعریف بنیادی، مفهوم تاب‌آوری به طرز چشمگیری در حوزه گوناگون مانند مدیریت ایمنی، سازمانی، اجتماعی - اکولوژیکی، اقتصادی و مهندسی تکامل یافته است [۲ و ۳]. مطابق با گزارش ژورنال Nature بالغ بر ۷۰ تعریف متفاوت از تاب‌آوری تاکنون ارائه شده است[۴].

شورای مشورتی زیرساخت‌های ملی ایالات متحده (NIAC) تاب‌آوری سامانه قدرت را آماده‌سازی[2] و برنامه‌ریزی[3]، جذب[4]، بازیابی[5] و انطباق[6] با حوادث ناگوار تعریف کرده است [۵].

اولین قدم در پیشبرد اهداف تاب‌آوری شناسایی تهدیدات، نقاط ضعف و پیش‌بینی نقاطی است که در صورت حمله احتمالی مورد تهاجم قرار خواهند گرفت. با وجود طبقه‌بندی‌های متفاوت حوادث شدید [۶] (HILP) مرتبط با شبکه‌های قدرت در مقالات، شکل (۱) به ارائه دسته‌بندی متداول در این خصوص اشاره می‌کند [۷ و ۸].



شکل (۱): دسته‌بندی حوادث شدید

[1] C.S. Holling
[2] Prepare
[3] Plan
[4] Absorb
[5] Recovery
[6] Adapt

تاکنون مدل‌های مختلفی جهت رسم نمودارهای تاب‌آوری برای درک بهتر این مفهوم پیشنهاد شده است. در ابتدا یک نمودار ساده به‌صورت مثلث پیشنهاد شد [۹]. با پیشرفت پژوهش‌ها شکل ذوزنقه به خود گرفت و در ادامه نیز مطابق با شکل (۲) به‌صورت منحنی جامع تاب‌آوری ارائه شد [۱۰]. پیش از وقوع رویداد در سامانه، یک سامانه قدرت بهره‌بردار باید استقامت لازم در برابر شوک اولیه را دارا باشد. در اینجا R_o به‌عنوان سطح ایده‌آل تاب‌آوری نشان داده شده است، (که R می‌تواند یک معیار مناسب مرتبط با سطح تاب‌آوری سامانه نیز باشد). پس از پیشرفت رویداد، سامانه به حالت تخریب پس از رویداد می‌رسد، جایی که افزونگی، کاردانی و سازماندهی سازگار، وضعیت عملیاتی اصلاحی را برای سازگاری و مقابله با شرایط در حال تغییر فراهم می‌کند (R_o - R_{pe}). پس از آن سامانه وارد حالت ترمیمی[1] می‌شود، به نحوی که باید ظرفیت ترمیمی لازم را برای امکان پاسخ سریع و بازیابی به حالت تاب‌آور در اسرع وقت نشان دهد.

با تحلیل صحیح نمودار جامع تاب‌آوری می‌توان دریافت که برای ارزیابی و ارتقای تاب‌آوری علاوه بر اینکه مقدار سطوح تاب‌آوری بسیار حائز اهمیت است، فاصله زمانی انتقال بین فازهای مختلف نیز نقش مهمی در این موضوع ایفاء می‌کند. به‌طور خاص، رویکردها برای افزایش تاب‌آوری باید در راستای موارد زیر باشد:

۱) کاهش تنزل سطح تاب‌آوری (R_o - R_{pe}).

۲) دستیابی به تنزل نسبتاً کند و یا کنترل شده (t_{pe} – t_e)، در نتیجه کاهش درجه ریزش آبشاری.

۳) کاهش زمان بازیابی (هم از نظر عملیاتی، t_{pr}-t_r، و هم از نظر زیرساخت‌ها، t_{pir} - t_{ir}).

شکل (۳): استراتژی ارتقاء تاب‌آوری

[1] Restorative State

لازم به توضیح است پژوهش حاضر در راستای تحقق مورد اول انجام گرفته است. به نحوی که با مقاوم‌سازی شبکه و به‌کارگیری استراتژی‌های ارتقای تاب‌آوری سطح اولیه R_o (بخش استقامت[2]) در منحنی جامع افزایش می‌یابد و به‌تبع تنزل سطح تاب‌آوری کاهش می‌یابد.

۱-۲- ادبیات پژوهش

با بررسی سوابق پژوهش‌های تاب‌آوری و در مواجهه با تهدیدات مختلف، می‌توان به انواع استراتژی‌های ارتقای تاب‌آوری شبکه‌های قدرت دست یافت. استراتژی‌های ارتقای تاب‌آوری برای سامانه‌های توزیع و انتقال در حال افزایش چشمگیر هستند، گرچه افزایش تاب‌آوری در سطح توزیع مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱۱]. استراتژی‌های ارتقای تاب‌آوری را می‌توان به‌طور کلی در روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی[3] و مبتنی بر عملیات[4] طبقه‌بندی نمود [۱۲]. روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی بر ایجاد برنامه‌های توسعه شبکه برای سخت کردن سامانه‌های انتقال و توزیع در برابر حوادث شدید آینده متمرکز هستند، در حالی که روش‌های مبتنی بر عملیات، استراتژی بهینه‌سازی را برای استفاده از دارایی‌های موجود در برابر خرابی‌ها و حوادث شدید آب و هوایی توسعه می‌دهند. شکل (۳) خلاصه‌ای از دسته‌بندی استراتژی‌های ارتقای تاب‌آوری را ارائه می‌دهد.

الف) روش‌های مبتنی بر عملیات: ۱- روش‌های مبتنی بر پیکربندی مجدد [۱۳]. ۲- تشکیل میکروشبکه و تقسیم شبکه برق به ریزشبکه‌های مستقل و قابل اعتماد کوچک‌تر [۱۴]. ۳- برنامه زمان‌بندی قبل از ایجاد اختلال بر پایه میکروشبکه برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع [۱۵]. ۴- استراتژی جزیره‌ای دفاعی برای جلوگیری از حوادث آبشاری که می‌توانند به دلیل خطوط آسیب دیده توسط حوادث شدید آب و هوایی ایجاد شوند [۱۶]. ۵- برنامه پاسخگویی بار برای کاهش محدودیت بار در دوره‌های اضطراری در میکروشبکه‌ها [۱۷]. ۶- از ظرفیت استفاده نشده منابع در دسترس در حوادث شدید برای افزایش تاب‌آوری میکروشبکه‌ها استفاده شده است [۱۸]. ۷- استفاده از منابع متحرک اضطراری و ذخیره انرژی به‌طور گسترده‌ای برای بهبود تاب‌آوری سامانه‌های توزیع برق استفاده شده است [۱۹]. ۸- عملکرد بهینه‌ای از منابع انرژی سیار را در شرایط عادی و اضطراری در مرجع [۲۰]ذکر شده است. ۹- در مرجع [۲۱]، ذخایر انرژی قابل حمل، برنامه‌ریزی مجدد تولید و پیکربندی مجدد شبکه برای تقویت تاب‌آوری سامانه‌های توزیع نیروی الکتریکی یکپارچه شده است. ۱۰- اعزام خدمه تعمیر برای بهبود ترمیم عناصر شبکه [۲۱]. ۱۱- اثر DG برای تسریع روند ترمیم در طی و پس از حوادث شدید

[2] Robustness
[3] Planning-based Strategies
[4] Operation-based Strategies

[۲۲]. ۱۲- چارچوب پاسخ تاب‌آوری مبتنی بر آگاهی وضعیتی (به‌عنوان مثال، قطعی برق پیش‌بینی شده)، پاسخ پیشگیرانه و واکنش اضطراری (به‌عنوان مثال، تغییر توپولوژی و کاهش بار) برای افزایش تاب‌آوری شبکه [۲۳]. ۱۳- برنامه‌ریزی و مسیریابی دستگاه‌های یخزدایی سیار متحرک [1] برای بهبود تاب‌آوری سامانه‌های انتقال قدرت الکتریکی [۲۴].

ب) روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی: ۱- روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی در منابع مختلف بیان شده است [۱۰ و ۲۵]. ۲- زیرزمینی کردن خطوط توزیع و انتقال، ایجاد مسیرهای افزونه برای خطوط انتقال و توزیع و به‌روزرسانی تیرها و سایر سازه‌ها با مواد محکم‌تر [۲۶ و ۲۷] . ۳- ارتقای پست و تأسیسات، افزودن ژنراتورهای پشتیبان و نصب سوئیچ‌های کنترل از راه دور [۲۸]. ۴- افزایش مدیریت پوشش گیاهی [۲۹]. ۵- تعیین مکان و اندازه بهینه واحدهای ذخیره انرژی باتری و منابع انرژی تجدیدپذیر [2] [۳۰]. ۶- قرار دادن بهینه مکان رله‌های جداسازی و تخصیص بهینه منابع بلک استارت [۲۰]. ۷- تهیه پروتکل‌هایی برای ارتباط رمزگذاری شده داده‌های حیاتی [۳۱]. ۸- برنامه‌ریزی سامانه حمل و نقل برق و گاز طبیعی یکپارچه [۳۲].

۱-۳- نوآوری

مطابق آنچه پیرامون روش‌های ارتقای تاب‌آوری بیان شد یکی از راهکارهای مؤثر در برخورد با تهدیدات طبیعی و غیر طبیعی، اجرای زیرزمینی خطوط شبکه می‌باشد. در این راستا پژوهش حاضر با تعریف یک سناریو حمله خرابکارانه، به‌صورت متمرکز و هم‌زمان به بررسی اولویت خطوط/ باس‌های شبکه برای زیرزمینی شدن می‌پردازد. گرچه تاکنون پژوهش‌های متنوعی پیرامون خطوط زیرزمینی صورت گرفته است؛ همچون مسائل هزینه سود، مقایسه خطوط هوایی و زیرزمینی و بیان مزایا و معایب هر کدام [۳۳]. اما آنچه این مقاله را از سایرین مستثنی می‌کند آن است که این پژوهش با درنظر گرفتن قیود محدودیت مالی در مسئله بهبود تاب‌آوری شبکه برای پروژه‌های زیرزمینی‌سازی اولویتی از خطوط/ باس‌ها را ارائه می‌دهد که در حقیقت حالتی بهینه بین دو مقوله سطح تاب‌آوری و هزینه خواهد بود.همچنین به‌منظور دستیابی به حالت بهینه و انتخاب بهترین ترکیب از خطوط جهت زیرزمینی‌سازی، از روش آنالیز پیشامد استفاده شده است. اطلاعات کیفی جهت اتخاذ تصمیم نهایی با استفاده از نظر خبرگان نیز به‌دست آمده است.

۲- روش تحقیق

در این مقاله هدف دستیابی به یک اولویت بهینه از خطوط/ باس‌ها با درنظر گرفتن بیشترین میزان تاب‌آوری و کمترین میزان هزینه است. در واقع در شرایطی که بودجه پروژه به‌صورت محدود تعریف می‌شود، نیاز است تا در ابتدا به‌منظور شناسایی نقاط حساس و پراهمیت شبکه اولویتی از خطوط یا باس‌های شبکه ارائه شود. این اولویت‌بندی می‌تواند از مؤلفه‌های مختلفی همچون موارد زیر تأثیر گیرد:

- مجموع بار از دست رفته؛
- معیارهای اقتصادی (محدودیت بودجه و هزینه فراوان اجرای زیرزمینی خطوط)؛
- موقعیت و مقدار بارهای حیاتی؛
- معیارهای جغرافیایی (توپولوژی زمین، جنس خاک)؛
- دسترس‌پذیری خطوط؛
- و غیره

ی تا به کمک آنالیز پیشامد [3] حالات مختلف حمله به شبکه شبیه‌سازی گردد و پس از تعیین اجزای از دست رفته به ازای رخداد هر پیشامد مقادیر بار از دست رفته متناسب با آن محاسبه می‌شود.

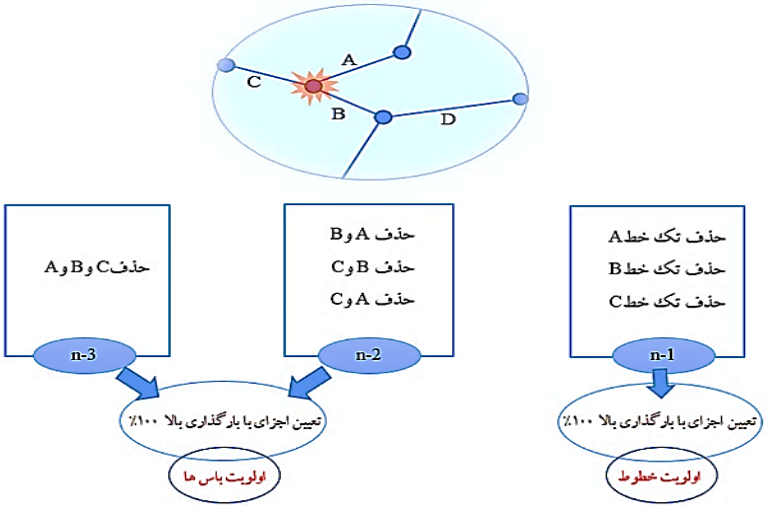
آنالیز پیشامد در حقیقت انجام دو مسئله پخش بار است که یکبار در حالت اولیه و قبل از رخداد حمله محاسبه می‌شود و بار دیگر پس از حمله و حذف خط (یا خط‌ها) صورت می‌گیرد. از مقایسه نتایج بارگذاری حاصل از پخش بار قبل و بعد از حمله، اجزایی از شبکه که دچار اضافه بار بالای صد در صد می‌شوند نمایان می‌شوند. با فرض اینکه بارگذاری بالای صد در صد منجر به عملکرد سامانه حفاظتی و خروج خط می‌شوند، می‌توان مجموع بار از دست رفته به ازای هر پیشامد را به‌دست آورد.

در مرحله اول پیشامدهای حذف تک خط (N-1) به‌دست می‌آید و مجموع بار از دست رفته به ازای حذف هر خط حاصل می‌شود. در مرحله بعد این فرآیند به ازای حذف دو/ سه/ بیشتر خط اجرا می‌گردد. گرچه محاسبات آنالیز پیشامد برای تمام پیشامدهای ممکن حذف خطوط قابل محاسبه است اما با توجه به آنکه حمله مورد نظر به‌صورت متمرکز در نظر گرفته شده است (مطابق آنچه در بخش ۱-۲ گفته شد). بنابراین حالات مختلف حذف خطوط تنها برای خطوطی که با هم در یک نقطه (در یک باس) مشترک‌اند محاسبه می‌شود به عبارت دیگر هر باس به‌طور جداگانه درنظر گرفته می‌شود و با حذف خطوط متصل به آن باس (حذف تک خط، دو خط و بیشتر) به آنالیز پیشامد پرداخته می‌شود.

همان‌طور که بیان شد شاخص مورد نظر در این تحلیل مقدار بار از دست رفته می‌باشد به عبارت دیگر هر باس بسته به مجموع

[1] Mobile Dc De-Icing Devices (MDIDs)
[2] RES
[3] Contingency Analysis

بار از دست رفته پیشامدهای مرتبط با آن اولویت‌بندی می‌شود. در حقیقت هر چه مقدار مجموع بار از دست رفته بیشتر باشد باس مورد نظر در اولویت بالاتری قرار می‌گیرد و اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از طرف دیگر با توجه به لزوم درنظر گرفتن امکان حمله گسترده به همه خطوط شبکه، غیر قابل پیش‌بینی بودن حمله و همچنین به‌منظور اولویت‌بندی اجزاء و مؤلفه‌های درونی هر باس، تحلیل کلی به‌دست آمده از آنالیز N-1 مفید و مؤثر خواهد بود. این مهم به ما کمک می‌کند تا دید بهتری به اهمیت هر خط نسبت به سایر خطوط داشته باشیم.



شکل (۴): گراف فرضی از شبکه قدرت و حمله متمرکز به خطوط

گراف فرضی شکل (۴) برای درک بهتر تحلیل ارائه شده است. در صورتی که حمله متمرکز در نقطه مشخص شده صورت گیرد حذف هر یک از خطوط A، B و C محتمل خواهد بود.

تاکنون اولویتی از باس‌ها و خطوط شبکه بر اساس بار از دست رفته[1] به‌دست آمده است در بخش بعد اولویت حاصل از نظر خبرگان و مسئولان ذی‌ربط پیرامون سایر مؤلفه‌های تأثیرگذار در تصمیم‌گیری به‌دست می‌آید.

۲-۱- استفاده از نظر خبرگان

همان‌طور که در بالا توضیح داده شد ممکن است شاخص‌های دیگری علاوه بر بار از دست رفته نیز برای اولویت‌بندی حائز اهمیت باشد (معیارهایی همچون؛ تعداد بارهای حیاتی در باس‌های مختلف، معیارهای جغرافیایی همچون توپوگرافی زمین و دسترس‌پذیری و غیره) بنابراین برای دریافت نتیجه دقیق‌تر، از نظر خبرگان استفاده می‌شود. روش مورد نظر بدین صورت است که با تدوین پرسشنامه‌هایی از افراد مطلع خواسته می‌شود تا هر باس/ خط را بر اساس معیار مورد نظر نمره‌دهی و وزن‌دهی کنند. این وزن‌دهی می‌تواند متناسب با شرایط شبکه به معیارها و زیرمعیارهای متنوعی اختصاص یابد. وزن‌های تخصیص یافته به کمک ضریب تأثیرگذاری مربوطه، در نتیجه حاصل از روش آنالیز پیشامد تأثیر داده می‌شوند. به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت در این مرحله اجزای شبکه بر اساس معیارهای بار حیاتی و اقتصادی وزن‌دهی می‌شوند و اولویت مورد نظر حاصل می‌شود.

موارد زیر را می‌توان به‌عنوان مزیت‌های این روش تشریح نمود:

الف) بسیاری از اطلاعات بارها، موقعیت مکانی بارهای حیاتی، سیاست‌های تصمیم‌گیری و غیره جزء داده‌های طبقه‌بندی شده هستند و دستیابی به این اطلاعات ممکن نیست بنابراین روش پرسشنامه‌ای می‌تواند تنها با دریافت نظر کلی نخبگان و مسئولان مربوطه، به بهترین اولویت برای تصمیم‌گیری دست یابد.

ب) نحوه طرح سؤالات می‌تواند به گونه‌ای باشد که معیار و زیرمعیارهای مختلفی بسته به شرایط خاص شبکه مورد نظر در تصمیم‌گیری نهایی تأثیر داده شود. به‌طور مثال در حوزه اقتصادی می‌توان متناسب با در نظر گرفتن بودجه کلی پروژه و مسافت هر خط اولویت نهایی را تغییر داد.

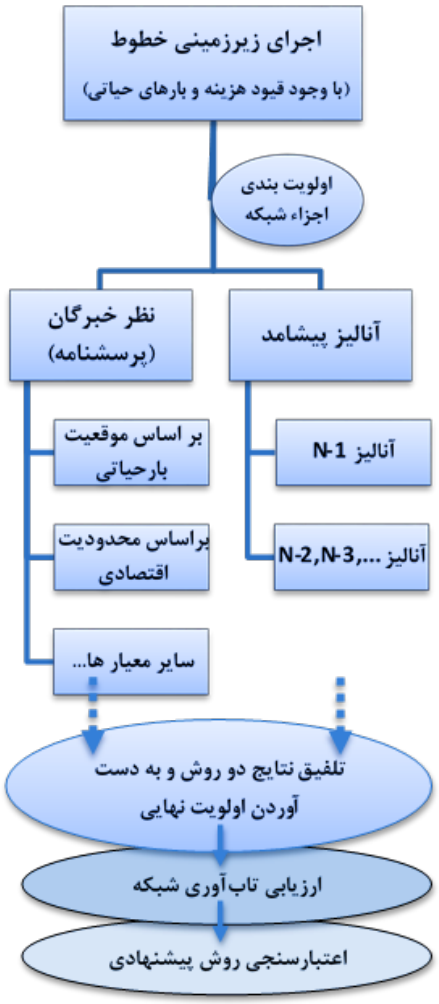
پس از به‌دست آمدن خروجی اولویت حاصل از بار از دست رفته و همچنین نظر خبرگان، به‌منظور رسیدن به یک اولویت واحد از خطوط و یا باس‌ها، از وزن‌دهی معیارها و انتخاب ضرایب تأثیرگذاری مناسب استفاده می‌شود [۳۴]. لازم به توضیح است ضرایب تأثیرگذاری نهایی توسط فرد پاسخگو و متناسب با شرایط پروژه تعیین می‌گردد.

[1] Loss of Load

۲-۲- ارزیابی تاب‌آوری

تاکنون پس از ارائه زیرزمینی‌سازی خطوط به‌عنوان راهکاری بر ارتقای تاب‌آوری، الگوریتمی برای انتخاب بهینه خطوط و شناخت باس‌های حساس و با اولویت بیشتر ذکر شد. در گام آخر به کمک نسبت بار حفظ شده به ازای زیرزمینی شدن (L_S) به کل بار (L_T) (بر حسب درصد)، ارزیابی تاب‌آوری شبکه و سنجش عملکرد نهایی صورت می‌گیرد. در این راستا تاب‌آوری شبکه قبل و بعد از انجام عملیات زیرزمینی‌سازی خطوط مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\rho = \frac{L_S}{L_T} \quad (۱)$$



شکل (۵):روش پیشنهادی

در این پژوهش ارزیابی تاب‌آوری شبکه در دو حالت صورت می‌گیرد که درنهایت یک پاسخ واحد و مشخص حاصل می‌گردد.

الف) با فرض حمله به یکی از باس‌های شبکه، تاب‌آوری به کمک شاخص ρ قبل از زیرزمینی‌سازی و پس از آن و همچنین در شرایط مقاوم‌سازی تک خط/ دو خط/ یا بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ب) با افزایش تعداد خطوطی که به زیرزمین منتقل می‌شوند نمودار پیشرفت تاب‌آوری بر اساس شاخص ρ به‌دست می‌آید.

به‌طور خلاصه، آنچه پیرامون روش پیشنهادی تشریح شد در شکل (۵) به‌صورت گرافیکی بیان می‌گردد.

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش در راستای صحت‌سنجی، روش پیشنهادی فوق مطابق مراحل ذیل، بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE پیاده‌سازی و پس از شبیه‌سازی شبکه در نرم‌افزار دیگسایلنت نتایج نهایی مستند می‌گردد.

شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE با ۳۴ خط، ۳۹ باس، ۱۰ ژنراتور، ۱۹بار و ۱۲ ترانسفورماتور مجزا در محیط نرم‌افزار دیگسایلنت طراحی و پیاده‌سازی می‌گردد. در ادامه محاسبه پخش بار اولیه برای استخراج بارگذاری خطوط صورت می‌گیرد.

به کمک سربرگ‌های "Contingency Analysis" و "Contingency Definition" نرم‌افزار، پیشامدهای N-1 و N-2 و N-3 و غیره اعمال می‌شود و از آنجایی که بارگذاری بالاتر از حد مجاز برای خطوط منجر به عملکرد سامانه حفاظتی و خروج خط از مدار می‌شوند بنابراین در هر مرحله پیشامدهایی که موجب بارگذاری بیش از حد مجاز می‌شوند فیلتر شده و خروجی تحلیل در قالب "Loading Violation" استخراج می‌گردد.

با اختصاص و دسته‌بندی داده‌های به‌دست آمده مرتبط با خطوط مشترک در یک باس مجموع بار از دست رفته (LOL) به ازای باس‌ها و همچنین خطوط مطابق شکل (۶) به‌دست می‌آید. پر واضح است که از بین خطوط به ترتیب خط ۱۶-۱۹ بیشترین و خط ۱۴- ۱۵ کمترین بار از دست رفته را دارد و همچنین از باس‌ها، باس ۱۶ بیشترین و باس ۱۲ کمترین بار از دست رفته را دارد.

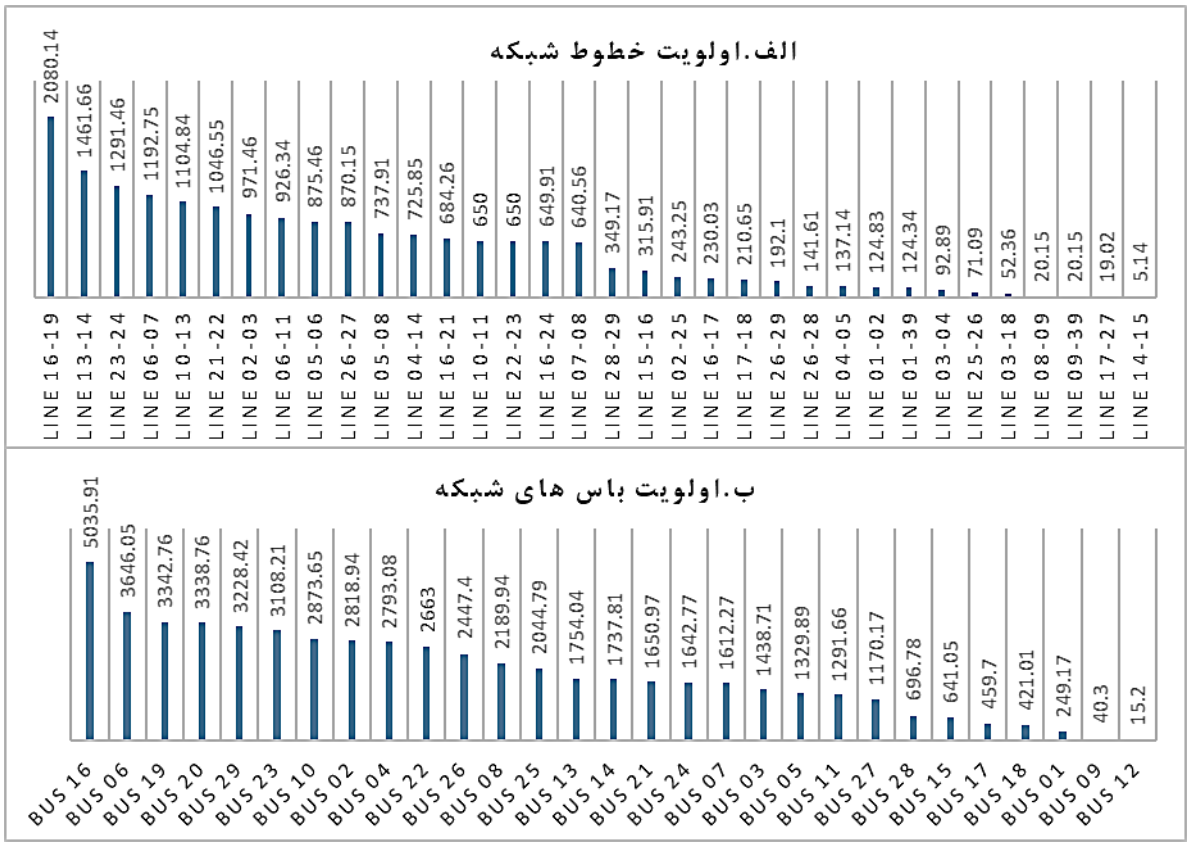
۳-۱- ارزیابی تاب‌آوری برای شبکه ۳۹ باسه IEEE

به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری شبکه ۳۹ باسه، از دو زاویه به مسئله نگاه می‌شود که در ادامه تشریح می‌گردد.

الف) در بخش اول با فرض حمله به باس ۸ تاب‌آوری قبل و بعد از مقاوم‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد؛

- **قبل از مقاوم‌سازی**

با توجه به اینکه قبل از مقاوم‌سازی امکان حذف تمامی خطوط مشترک در این باس وجود دارد مجموع بار از دست رفته با درنظر گرفتن تمامی حالات تک خط، دو خط، سه خط برابر ۲۱۸۹/۹۴ MW می‌باشد.



شکل (۶): الف. اولویت خطوط شبکه بر اساس بار از دست رفته و **ب.** اولویت باس‌های شبکه بر اساس بار از دست رفته

- **بعد از مقاوم‌سازی تک خط**

مقاوم‌سازی خط ۰۸- ۰۵: در این شرایط تنها حذف خطوط ۰۸- ۰۷ و ۰۹- ۰۸ ممکن است؛

$$\rho = \frac{L_S}{L_T} = \frac{317.29 + 420.62 + 124.83 + 20.15}{2189.94} = \frac{1007.23}{2189.94} = 46\%$$

مقاوم‌سازی خط ۰۸- ۰۷: در این شرایط تنها حذف خطوط ۰۸- ۰۷ و ۰۹- ۰۸ ممکن است؛

$$\rho = \frac{185.72 + 454.84 + 124.83 + 124.34 + 20.15}{2189.94} = \frac{909.88}{2189.94} = 41.5\%$$

مقاوم‌سازی خط ۰۹- ۰۸؛ در این شرایط تنها حذف خطوط ۰۸- ۰۵ و ۰۸- ۰۷ ممکن است؛

$$\rho = \frac{20.15}{2189.94} = 0.1\%$$

- **بعد از مقاوم‌سازی دو خط**

مقاوم‌سازی دو خط ۰۸- ۰۵ و ۰۸- ۰۷:

$$\rho = \frac{1647.79}{2189.94} = 75\%$$

مقاوم‌سازی دو خط ۰۹- ۰۸ و ۰۸- ۰۷:

$$\rho = \frac{930.03}{2189.94} = 42.5\%$$

مقاوم‌سازی دو خط ۰۸-۰۵ و ۰۹-۰۸:

$$\rho = \frac{1027.38}{2189.94} = 47\%$$

- **بعد از مقاوم‌سازی همه خطوط**

در این شرایط فقط امکان از دست رفتن بار ۸ وجود دارد و سایر اجزاء در مقابل تهدید مقاوم شده‌اند؛

$$\rho = \frac{1667.94}{2189.94} = 76\%$$

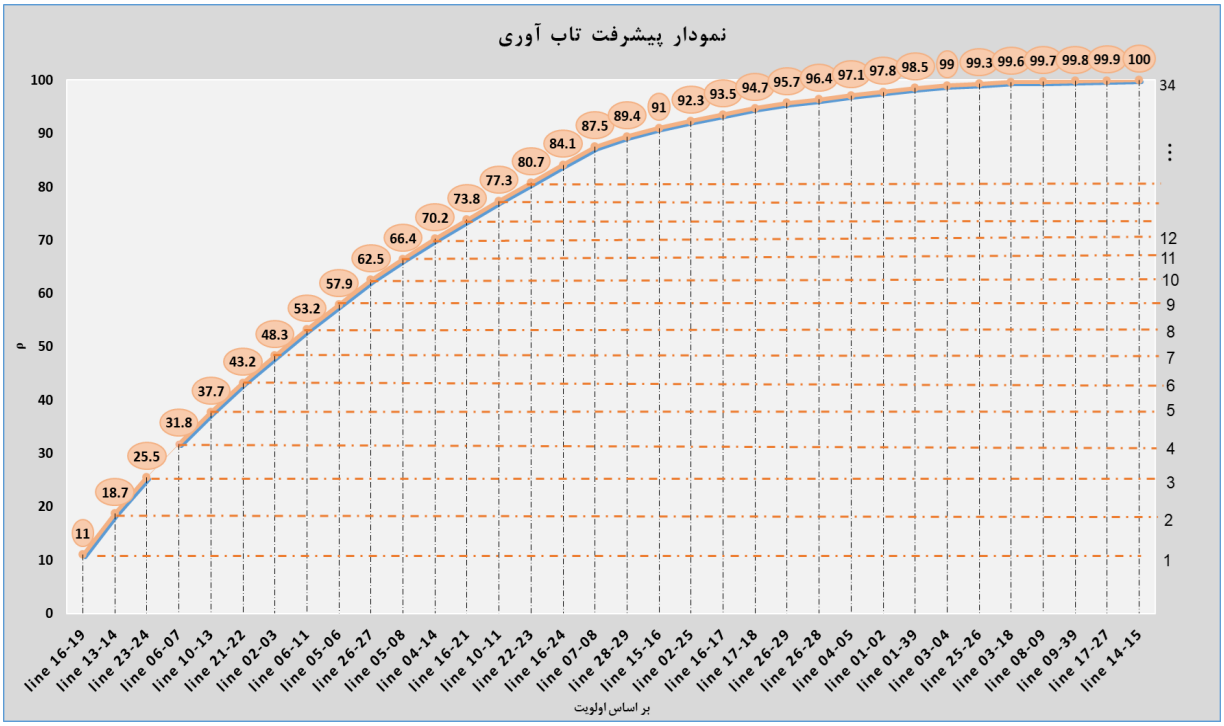
به کمک ارزیابی‌های فوق می‌توان دریافت زیرزمینی نمودن هر کدام از خطوط در حالات مختلف به چه میزان به ارتقای تاب-آوری کمک می‌کند.

ب) در بخش دوم تاب‌آوری به ازای اضافه شدن تعداد خطوطی که به زیرزمین منتقل می‌شوند (از یک تا ۳۴ خط) بررسی می‌شود.

نتایج ارزیابی شبکه به‌عنوان یک شیوه بهینه برای تصمیم‌گیری در مورد زیرزمینی‌سازی شبکه ۳۹ باسه به‌صورت

نمودار پیشرفت تاب‌آوری (شکل ۷) ارائه شده است. محور افقی این نمودار به ترتیب اولویت خطوط، محور عمودی (سمت چپ) بر اساس شاخص تاب‌آوری مفروض (ρ) رسم شده است. محور عمودی (سمت راست) نیز نشان دهنده تعداد خطوط زیرزمینی شده متناسب با افزایش بودجه پروژه می‌باشد.

نمودار پیشرفت تاب‌آوری درحقیقت نمایانگر ارتقای تاب‌آوری شبکه متناسب با افزایش تعداد خطوطی است که به زیرزمین منتقل می‌شوند. هر چقدر بودجه تخصیص یافته به پروژه بیشتر باشد تعداد خطوط زیرزمینی شده افزایش و متعاقباً سطح تاب‌آوری شبکه نیز بالاتر می‌رود. قابل توجه است که در این مطالعه موردی تنها می‌توان با سرمایه‌گذاری بر روی ۱۵ خط به سطح بالای ۸۰ درصد از شاخص تاب‌آوری دست یافت. این تعداد از خطوط (۱۵ خطِ در اولویت) مسافتی در حدود ۷۳۰km دارند که تنها ۳۰ درصد از مسافت کل خطوط شبکه می‌باشد.



شکل (۷): نمودار پیشرفت تاب‌آوری

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌طور خاص راهکار زیرزمینی‌سازی خطوط در مواجهه با تهدیدات فیزیکی (حملات متمرکز خرابکارانه) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به قیود محدودیت بودجه که برای اجرای این راهکار فرض شد، یک روش پیشنهادی در راستای اولویت‌بندی اجزای شبکه (خطوط و باس‌ها) ارائه گردید. روش مذکور از دو رویکرد کلی آنالیز پیشامد و نظر خبرگان برای رسیدن به اولویت بهینه بهره می‌گیرد. در این روش نخست محاسبات آنالیز پیشامد با استفاده از شاخص بار از دست رفته و با درنظر گرفتن شرایط ایستا برای شبکه اولویتی از اجزاء را ارائه می‌دهد؛ در ادامه با استخراج نتایج حاصل از نظر خبرگان و تلفیق آن‌ها به کمک وزن‌دهی معیارها، پاسخ نهایی حاصل می‌شود. در پایان روش پیشنهادی بر روی شبکه مورد مطالعه پیاده‌سازی شد و پس از ارزیابی تاب‌آوری قبل و بعد از مقاوم‌سازی، نتایج بهبود تاب‌آوری به اثبات رسید. با توجه به آنچه تشریح گردید، در پژوهش‌های آتی می‌توان با درنظر گرفتن دو پارامتر غیر هم‌راستا و به‌دست آوردن تابع هزینه مسئله بهینه‌سازی را در راستای این پژوهش مطرح نمود. همچنین با توجه به اینکه مسئله مطروحه در این مقاله با درنظر گرفتن قید ایستا بودن تحلیل حل شده است بنابراین می‌توان در راستای انجام تحقیقات آینده، شبکه را به‌صورت پویا نیز مورد بررسی قرار داد.

۵- منابع

[1] Y. Wang, C. Chen, J. Wang, and R. Baldick, "Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters-A Review," IEEE Trans. on Power Syst., vol. 31, no. 2, pp. 1604-1613, March 2016.

[۲] غفارپور، رضا؛ علیزاده، محمدایمان، "تبیین مفهوم تاب‌آوری در شبکه برق و ارتباط آن با پدافند غیرعامل"، نشریه علمی شهر تاب‌آور، سال دوم، شماره ۱، صفحات ۶۴-۵۱، بهار ۱۳۹۹.

[۳] دشتی، رضا، تاب‌آوری در سامانه‌های توزیع برق، انتشارات قائم، تهران، ایران، ۱۳۹۷.

[4] L. Fisher, "More than 70 Ways to Show Resilience," nature, 2015.

[5] N. I. A. Council, "Critical Infrastructure Resilience Final Report and Recommendations", Washington, DC, USA, 2009.

[6] N. Bhusal, M. Gautam, M. Abdelmalak, and M. Benidris, "Modeling of Natural Disasters and Extreme Events for Power System Resilience Enhancement and Evaluation Methods," In Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Syst. (PMAPS), Liege, Belgium, 2020.

[۷] غفارپور، رضا؛ جنتی اسکوئی، محمدرضا؛ نجفی روادانق، سجاد؛ اعلمی، حبیب اله، "تاب‌آوری، پاسخی برای نگرانی‌های موجود در حوزه پدافند غیرعامل شبکه برق،" نشریه علمی پدافند غیرعامل، سال دهم، شماره ۱، صفحات ۲۲-۱، بهار ۱۳۹۸.

[۸] پالیزوان، محمد، دشتی، رضا، "مقاوم‌سازی زیرساخت‌های شبکه برق با استفاده از روش‌های پدافند غیرعامل، فصلنامه علمی ترویجی پدافند غیرعامل، سال نهم، شماره ۴،صفحات ۵۷-۶۷، ۱۳۹۷.

[9] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziargyriou, "Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies," IEEE, vol. 105, no. 7, pp. 1202-1213, July 2017.

[10] M. Panteli and P. Mancarella, "The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience," IEEE, Power Energy Mag. no. 3, vol. 13, pp. 58-66, May 2015.

[11] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, and F. Li, " Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience," Proc. IEEE, no. 7, vol. 105, pp. 1253-1266, 2017.

[12] 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, January 2020.

[13] S. Lei, C. Chen, Y. Li, and Y. Hou, "Resilient Disaster Recovery Logistics of Distribution Systems: Co-Optimize Service Restoration with Repair Crew and Mobile Power Source Dispatch," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 6, pp. 6187-6202, Nov. 2019.

[14] Y. Lin and Z. Bie, "Tri-level Optimal Hardening Plan for a Resilient Distribution System Considering Reconfiguration and DG Islanding," Appl. Energy, vol. 210, pp. 1266–1279, Jan. 2018.

[15] A. Gholami, T. Shekari, and S. Grijalva, "Proactive Management of Microgrids for Resiliency Enhancement: An Adaptive Robust Approach," IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 10, no. 1, pp. 470–480, Jan. 2019.

[16] M. Panteli, P. Mancarella, D. N. Trakas, E. Kyriakides, and N. D. Hatziargyriou, "Metrics and Quantification of Operational Infrastructure Resilience in Power Systems," IEEE Trans. Power Syst. vol. 32, no. 6, pp. 4732-4742, Nov. 2017.

[17] A. Hussain, A. Oulis Rousis, I. Konstantelos, G. Strbac, J. Jeon, and H. Kim, "Impact of Uncertainties on Resilient Operation of Microgrids: A Data-driven Approach," IEEE Access, vol. 7, pp. 14924-14937, Jan. 2019.

[18] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, "Enhancing Power System Resilience through Hierarchical Outage Management in Multi-microgrids," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2869–2879, 2016.

[19] S. Lei, C. Chen, H. Zhou, and Y. Hou, "Routing and Scheduling of Mobile Power Sources for Distribution System Resilience Enhancement," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, pp. 5650-5662, Sep. 2019.

[20] J. Kim and Y. Dvorkin, "Enhancing Distribution System Resilience with Mobile Energy Storage and Microgrids," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 5, pp. 4996-5006, Sep. 2019.

[21] M. Panteli and P. Mancarella , "Modelling and Evaluating the Resilience of Critical Electrical Power Infrastructure to Extreme Weather Events," in IEEE Syst. J. vol. 11, no. 3, pp. 1733-1742, Sep. 2017.

[22] Y. Lin, B. Chen, J. Wang, and Z. Bie, "A Combined Repair Crew Dispatch Problem for Resilient Electric and Natural Gas System Considering Reconfiguration and DG Islanding," IEEE Trans. Power Syst. vol. 34, no. 4, pp. 2755-2767, Jul. 2019.

[23] G. Huang, J. Wang, C. Chen, J. Qi, and C. Guo, "Integration of Preventive and Emergency Responses for Power Grid Resilience Enhancement," IEEE Trans. Power Syst. vol. 32, no. 6, pp. 4451-4463, Nov. 2017.

[24] M. Shahidehpour, M. Yan, X. Ai, J. Wen, Z. Li, S. Bahramirad, and A. Paaso, "Enhancing the Transmission Grid Resilience in Ice Storms by Optimal Coordination of Power System Schedule with Pre-Positioning and Routing of Mobile Dc De-Icing Devices," IEEE Trans. Power Syst. vol. 34, no. 4, pp. 2663-2674, Jul. 2019.

[25] P. Dehghanian, S. Aslan, and P. Dehghanian, "Quantifying Power System Resiliency Improvement Using Network Reconfiguration," IEEE 60th Int. Midwest Symp. on Circuits and Syst. pp. 1364-1367, 2017.

[26] S. Ma, B. Chen, and Z. Wang, "Resilience Enhancement Strategy for Distribution Systems under Extreme Weather Events," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 2, pp. 1442-1451, Mar. 2018.

[27] EPRI, "Distribution Grid Resiliency: Undergrounding," Electr. Power Res. Institute, Palo Alto, CA, USA, 2015.

[28] S. Ma, S. Li, Z. Wang, and F. Qiu , "Resilience-oriented Design of Distribution Systems," IEEE Trans. Power Syst. vol. 34, no. 4, pp. 2880-2891, 2019.

[29] EPRI, "Distribution Grid Resiliency: Vegetation Management," Electr. Power Res. Institute, Palo Alto, CA, USA, 2015.

[30] M. Mahzarnia, M. P. Moghaddam, P. T. Baboli and P. Siano , "A Review of the Measures to Enhance Power Systems Resilience," In IEEE Syst. J. vol. 14, no. 3, pp. 4059-4070, 2020.

[31] N. Nezamoddini, S. Mousavian, and M. Erol-Kantarci, "A Risk Optimization Model for Enhanced Power Grid Resilience against Physical Attacks," Electric Power Syst. vol. 143, pp. 329-338, Feb. 2017.

[32] C. Shao, M. Shahidehpour, X. Wang, X. Wang, and B. Wang, "Integrated Planning of Electricity and Natural Gas Transportation Systems for Enhancing the Power Grid Resilience," IEEE Trans. Power Syst. vol. 32 no.2, pp. 4418-4429, Nov. 2017.

[33] L. Souto and S. Santoso, "Overhead versus Underground: Designing Power Lines for Resilient, Cost-Effective Distribution Networks under Windstorms," 2020 Resilience Week (RWS), pp. 113-118, 2020.

[۳۴] اسکندری، محمد، امیدوار، بابک، مدیری، مهدی، نکوئی، محمدعلی،"ارائه الگوی رتبه‌بندی شریان‌های حیاتی بر اساس آنالیز اجزای اصلی،" فصلنامه علمی پژوهشی مدیریت بحران، شماره ۱۶، صفحات ۹۵-۷۷، پاییز ۱۳۹۸.

Improving the Resilience of Power Grids in the Face of Focused Attacks Using the Contingency Analysis

M. Mirsadeghi, F. Moazen, R. Ghaffarpour*

Abstract

In today's societies, the power systems despite their vast developments as critical infrastructures (CI), are exposed to numerous natural and unnatural threats. In the past, power grids were designed only to withstand typical events which would have predictable probabilities. However, nowadays events with low probabilities and high effects are considered a major challenge. Power grids are expected to have the necessary flexibility in the face of such events and should not be disrupted quickly. This demonstrates the concept of resilience. In this article the resilience enhancement strategies, and in particular, the undergrounding as the best solution, are examined considering focused physical attacks. Taking budget constraints into account, the proposed algorithm determines the priorities of lines and buses to be undergrounded. This algorithm considers two approaches of the contingency analysis, namely the experts views and the index of load loss, in order to get the best choices for undergrounding. It should be noted that in this paper the static status of the grid is considered. Finally, the proposed method is implemented on the IEEE 39-bus test grid using Digsilent software, and the results are presented and discussed to evaluate the capabilities of the proposed method.

Key Words: *Power Grid Resilience, HILP Events, Undergrounding Lines, Index of Loss Load, Contingency Analysis*

*Assistant professor, Imam Hossein Comprehensive University,Tehran, Iran. (rghaffarpour@ihu.ac.ir) - Writer-in-Charge