

جایابی بهینه تولید پراکنده‌ها و سوئچینگ هوشمند میکروگریدها به منظور افزایش تاب‌آوری مراکز استراتژیک با الگوریتم HCCA

نوع مقاله: پژوهشی

حسین گلزار*^۱

جعفر جاویدی حق^۲

چکیده

با توجه به زندگی مدرن افزایش مصرف برق در جامعه یک واقعیت اجتناب ناپذیر است. انعطاف‌پذیری سیستم قدرت، مفهوم جدیدی است که در سیستم قدرت مطرح شده است. در این مقاله ابتدا مفهوم تاب‌آوری زیر ساخت‌های شبکه‌های توزیع برق در حضور منابع DG و نحوه مدل‌سازی انفجارهای معمول به عنوان تخریب در شبکه ارائه می‌گردد. سپس دود و موج ناشی از انفجار و مواد تخریب‌کننده منفجره در محیط‌های شهری و برون‌شهری به خصوص در مکان‌ها یی که با سیستم‌های توزیع برق فاصله نزدیکی داشته و یا در مجاورت آنها قرار دارند که می‌توانند بر روی انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت تأثیرات منفی بگذارند بررسی می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم HCCA ورودی‌ها بررسی شده و بهترین و امن‌ترین حالت ممکن را انتخاب می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی:

میکروگریدها، اثرات موج و دود انفجار، انعطاف‌پذیری منابع DG، کلیدهای قطع و وصل اتوماتیک.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه غیرانتفاعی غیردولتی رشديه، تبریز، ایران.

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: Email: hosein.golzar2017@gmail.com



مقدمه

شبکه‌های توزیع، برق را به مشتریان عرضه می‌کنند. در نتیجه، خرابی هر یک از عناصر مهم شبکه باعث قطع برق و نارضایتی مشتریان می‌شود. بنابراین، برای تقویت انعطاف‌پذیری شبکه، بازیابی سرویس بسیار مورد توجه بهره‌برداران شبکه توزیع^۱ (DNO) قرار گرفته است. توسعه اتوماسیون شبکه توزیع فرصت‌های جدیدی را برای شبکه توزیع فراهم می‌کند تا خود ترمیمی را تحقق بخشند. خود ترمیمی، توانایی شبکه برای بازگرداندن خودکار و هوشمندانه خود در بهترین حالت ممکن پس از وقوع یک خطای دائمی است. هنگامی که یک خطا رخ می‌دهد، طرح خود ترمیمی محل خطا را تشخیص داده و آن را جدا می‌کند، سپس از برنامه ترمیم بازیابی سرویس^۲ (SR) برای بازگرداندن مناطق قطع شده استفاده می‌کند. پس از برطرف کردن خطا، شبکه به حالت اولیه خود بر می‌گردد و روند خود ترمیمی پایان می‌یابد. بازیابی سرویس، به عنوان یکی از جنبه‌های اصلی روند خود ترمیمی، مورد توجه تعداد زیادی از محققان قرار گرفته است [۱].

خط مقدم صنعت برق هر کشور بخش توزیع آن است که در ارتباط مستقیم با مشترکان برق می‌باشد. جهت افزایش رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان برق شبکه توزیع لازم است که زمان خاموشی‌های بی‌برنامه به کمترین مقدار ممکن برسد. به‌منظور حداقل کردن میزان انرژی توزیع‌نشده به مشترکین برق، بایستی شبکه‌های توزیع دارای سیستم اتوماسیون باشند تا زمان بازیابی شبکه به حداقل برسد. در شبکه‌های سنتی، هنگام بروز هر خطا زمان زیادی به‌منظور یافتن محل خطا و جداسازی از بخش سالم شبکه صرف می‌گردد. این زمان در شبکه‌های وسیع و نیز در محل‌های شلوغ شهری وقت زیادی می‌گیرد و لذا خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی فراوانی را منجر شود. از طرف دیگر، پیشرفت‌های سیستم توزیع باعث شده استفاده از روش‌های سنتی نگهداری، حفاظت و تعمیرات سخت و ناکارآمد گردد. لذا، استفاده از سیستم‌های جمع‌آوری داده، مانیتورینگ و ارسال دستور باز و بست کلیدهای قدرت در مسیر شبکه اجتناب‌ناپذیر شده است. برای به‌عملکرد بازیابی بهینه، لازم است محل نصب و نیز تعداد کلیدهای اتوماسیون با قابلیت کنترل راه دور با توجه به منابع مالی بصورت بهینه مشخص گردد [۲].

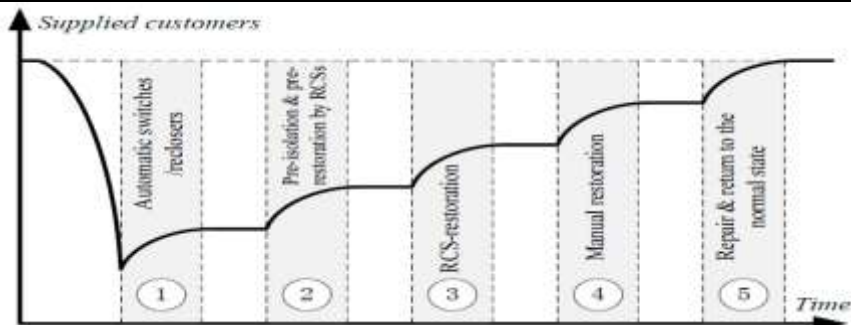
Distribution Network Operators^۱

Service Restoration^۲

آنچه در بحث بازیابی شبکه همواره نکته مهمی برای کاربردی شدن آن می باشد قیمت بالای تجهیزات کلیدزنی کنترل پذیراز راه دور است که ابزار مهم مدیریت آرایش آنی شبکه محسوب می گردند. این نکته لازم می دارد که این تجهیزات به گونه ای بهینه جایابی گردند تا توجیه اقتصادی منفعت حاصله از بازیابی سرویس در این شبکه ها جنبه های عملیاتی شدن آن را تقویت کند. همچنین این موضوع به این دلیل مهم است که مکان کلیدهای مانور اتوماتیک به طور همزمان می تواند هم بر قابلیت اطمینان شبکه و هم بر تلفات آن تأثیر گذارد [۳]. یکی از این اصلاحات کاربردی مانور و مدیریت بلادرنگ آرایش شبکه توزیع است که لازمه آن تأمین ادوات مانور بلادرنگ و بهره گیری از الگوریتم های مناسب مدیریت آرایش شبکه می باشد. اما به دلیل هزینه بالای این تجهیزات باید ابتدا تعداد و مکان آن ها به صورت بهینه جایابی شود [۴-۶].

عملیات بازیابی در شبکه توزیع توسط اعمال فرمان تغییر وضعیت کلیدهای اتوماتیک شبکه در بستر اتوماسیون توزیع صورت می پذیرد. با توجه به اینکه هدف بازیابی شبکه توزیع امکان کنترل بلادرنگ آرایش شبکه توسط بهره بردار جهت نیل به حداقل تلفات و یا نیل به حداکثر قابلیت اطمینان در فرآیند بازیابی بار می باشد، جایابی ادوات کلیدزنی نیز باید به صورتی با ملاحظات همزمان تلفات و قابلیت اطمینان شبکه صورت گیرد [۷، ۸]. همچنین جهت عملیاتی شدن طرح بازیابی نیازمند توجیه اقتصادی مناسبی خواهیم بود تا بتوان طرح مورد نظر را در شبکه های توزیع واقعی عملیاتی نمود. در شکل ۱ شماتیک طرح مرحله به مرحله بازیابی برق مشترکان بعد از وقوع یک خطای دائمی در شبکه نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که نقش کلیدهای کنترل از راه دور در بازیابی مرحله به مرحله شبکه توزیع تا چه اندازه اهمیت دارد.

قابلیت اطمینان شبکه توزیع که در تعریف کلی، احتمال عملکرد مناسب سیستم را تحت شرایط نامی بیان می کند، توسط شاخص هایی ویژه نظیر متوسط دفعات خروج سالانه سیستم، متوسط زمان خروج سالانه سیستم و انرژی تأمین نشده سالانه سیستم مورد ارزیابی قرار می گیرد. چنانچه این شاخص ها از وضعیت مطلوبی برخوردار نباشند، صرف نظر از نارضایتی مشترکین بخش توزیع، خسارت سنگینی به شرکت های توزیع و حتی کل صنعت برق تحمیل می گردد. این خسارت به واسطه زیان ناشی از انرژی فروخته نشده یا خسارت پرداختی به مشترکین ناشی از انرژی تأمین نشده صورت می گیرد که مقدار آن با گذشت زمان قابل ملاحظه خواهد بود.



شکل (۱-۱) شماتیک طرح مرحله به مرحله بازیابی برق مشترکان بعد از وقوع یک خطای دائمی در شبکه [9]

انعطاف پذیری سیستم قدرت، مفهوم جدیدی است که در سیستم قدرت مطرح شده است. انعطاف پذیری، قابلیت پایداری سیستم در تمام زمان‌ها از میلی ثانیه تا یک سال را شامل می‌شود. وقتی که تنوع تولید انرژی الکتریکی در سیستم قدرت افزایش می‌یابد، عدم قطعیت تغذیه و تقاضا افزایش می‌یابد که سیستم باید به تغییر ناگهانی تغذیه و تقاضا واکنش نشان دهد. موج انفجار ناشی از سرعت انفجار و نیز دود ناشی از مواد تخریب‌کننده منفجره در محیط‌های شهری و برون شهری به خصوص در مکان‌هایی که با سیستم‌های توزیع برق فاصله نزدیکی داشته و در یا در مجاورت آنها قرار دارند، می‌توانند بر روی سیستم‌های قدرت تأثیر منفی بگذارند. دود و موج ناشی از مواد منفجره می‌توانند بر انعطاف‌پذیری سیستم قدرت تأثیر بگذارند، با این حال، این تأثیرات بر روی سیستم قدرت تاکنون به طور کامل بررسی نشده‌اند و نیز تأثیر موج و دود انفجار ناشی از انواع مختلف مواد منفجره مورد استفاده در صنایع نظامی بر روی این سیستم‌ها تاکنون در هیچ منبع معتبری مورد واکاوی قرار نگرفته است. در این پروژه، سعی خواهد شد تا ابتدا اثر دود و موج انفجار ناشی از انواع مواد منفجره متداول مورد استفاده در صنایع نظامی بررسی شده و پس از آن با قرار دادن بهینه منابع تولید توزیع شده، انعطاف‌پذیری سیستم قدرت بهبود یابد. از آنجا که اثر دود ناشی از انفجار به نوع مواد منفجره و میزان دودزایی آنها و جهت بادهای ناحیه مورد مطالعه وابسته بوده و موج انفجار به نوع مواد منفجره، سرعت انفجار و ترکیب به کار رفته در مواد منفجره بستگی دارد و هر دو عامل علاوه بر این موارد به توپولوژی و وضعیت جغرافیایی وابستگی دارند؛ لذا عوامل موثر بر روی میزان تأثیر این دو پارامتر هم دارای طبیعت تصادفی و هم دارای طبیعت انتخابی است. فلذا از منحنی گل رز برای کاهش سناریوهای احتمالی استفاده خواهد شد.

مفهوم قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری مفهوم تاب آوری در حوزه مهندسی در مقایسه با سایر حوزه‌ها نسبتاً جدید است. حوزه مهندسی شامل سیستم های فنی می باشد که به منظور تعامل انسان‌ها و فناوری، مانند سیستم های الکتریکی شبکه قدرت، توسط مهندسان طراحی شده‌اند. در مرجع [۱۰] تاب آوری مهندسی را به عنوان مجموع قابلیت اطمینان و احتمال سیستم برای بازیابی، تعریف کرده است. تعریف دیگر تاب آوری مهندسی توسط مرجع [۱۱] به عنوان قابلیت ذاتی یک سیستم برای تنظیم و ترمیم عملکرد خود به هنگام اختلالات و تغییرات پیش بینی نشده، ارائه شده است.

مفهوم قابلیت اطمینان نیز در کاربردهای نظامی و حساس بیشتر مورد توجه بوده است. به دلیل گسترش شبکه‌های برق و تغذیه بارهای حساس، تبعات زیان بار سیاسی و اقتصادی قطعی برق در جامعه [۱۲] و تهدیدات نظامی و غیرعامل از جمله حملات سایبری [۱۳] سبب شده‌است که مفهوم قابلیت اطمینان نیز در صنعت برق برای خود به موضوع قابل توجهی تبدیل شود.

مبانی نظری و پیشینه‌های پژوهش

مبانی نظری

به طور قطع، آینده نامطمئن است. به جهت تغییر شکل دادن فن آوری‌ها، افزایش وابستگی‌های اجتماعی و تغییرات آب و هوایی، مواجهه با مشکلات و مسایل انعطاف‌پذیری برای اغلب رشته‌های علوم بسیار مهم به نظر می‌رسد. بدلیل شبکه ارتباطی، تولید، استخراج نفت و حمل و نقل برای سیستم‌های دفاعی و تولید انرژی، انتقال و توزیع، انعطاف‌پذیری در آینده نزدیک یک ضرورت خواهد بود. به سبب افزایش میزان نفوذ منابع تولید مختلف به همراه سهم آن در تولید قدرت، یک اصطلاح انعطاف‌پذیری بدلیل روندهای افزایشی در افق‌های برنامه‌ریزی و بهره برداری سیستم قدرت ضروری به نظر می‌رسد [۲]. به همان اندازه که منابع تولید انرژی الکتریکی متنوع درون سیستم قدرت الکتریکی تجمیع می‌شوند، عدم قطعیت تغذیه و تقاضا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این امر سیستم را به توانایی واکنش دادن به یک تغییر ناگهانی و منطبق شدن با یک وضعیت جدید در بازه زمانی و هزینه قابل قبول سوق خواهد داد. بنابراین امروزه مفهوم انعطاف‌پذیری توجه گسترده‌ای را به خوددر سیستم قدرت به خود جلب کرده است. در بسیاری از موارد، انعطاف‌پذیری سیستم توسط فراهم کردن ذخیره افزایش یافته، ساختار انتقال، طراحی بازار جایگزین یا روش‌های بهره برداری همانطوری که در بررسی های یکپارچه تولید تجدیدپذیر در [۳] و [۴] و [۵] تحقیق شده است، به دست می‌آید [۶]. یک سیستم قدرت، زمانی انعطاف پذیر نامیده می‌شود که بتواند در مرزهای اقتصادی، خیلی سریع به نوسانات بزرگ در تقاضا و تغذیه، پدیده‌ها و تغییرات برنامه ریزی شده و یا غیر قابل

پیش بینی، نزول و کاهش تولید وقتی تقاضا کاهش می یابد و صعود و افزایش وقتی که تولید افزایش می یابد، پاسخ دهد.

برطبق تعریف دیگر، انعطاف پذیری در یک حالت معین، توانایی یک سیستم در پاسخ به یک محدوده از حالت‌های آینده عدم قطعیت توسط اجرای یک روش جایگزین بهره برداری در محدوده یک آستانه قیمت و پنجره زمانی قابل قبول می باشد. انعطاف پذیری ویژگی ذاتی یک سیستم است. چهار عنصر زیر بعنوان پارامترهای انعطاف پذیری شناخته شده‌اند:

(۱) زمان (T) (۲) عملیات (A) (۳) عدم قطعیت (U) (۴) هزینه (C)

سه عنصر اول توسط شرایط بهره برداری سیستم قدرت تحت تاثیر قرار گرفته‌اند در صورتیکه عنصر آخری توسط شرایط اقتصادی محاسبه می شود [۶]. درصد بالای تجمیع این انرژی‌های تجدیدپذیر، موجب برخی مشکلات بهره برداری در سیستم‌های قدرت خواهد شد که نیاز است شناسایی و رسیدگی شود. انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی بادی و خورشیدی بدلیل طبیعت تصادفی و احتمالی، عدم قطعیت سیستم را افزایش می دهند. افزایش میزان عدم قطعیت، معرفی انعطاف پذیری بیشتر را در سیستم‌های قدرت ایجاب خواهد کرد. عدم قطعیت فقدان اطلاعات کامل از وضعیت سیستم در آینده می باشد [۷].

انفجار، واکنش شیمیایی مواد منفجره است که انرژی و دود قابل ملاحظه‌ای را آزاد می‌نماید. در اثر فشار و دمای بسیار زیاد، مواد منفجره به گاز تبدیل شده و با ازدیاد بسیار سریع فشار هوا، موج انفجار به همراه دود حاصل از واکنش‌های شیمیایی بوجود می‌آید که با سرعت اولیه حدود ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متر بر ثانیه، منتشر می‌شود. امواج انفجار بر حسب منشأ آن به دو نوع «موج ضربه» و «موج فشار» تقسیم می‌شوند. موج ضربه، ناشی از انفجار، در حوزه نزدیک مواد منفجره جامد است. در هر نقطه از مسیر انتشار موج، در وهله اول، فشار محیط به فشار مبنای انفجار افزایش یافته و با گذشت زمان به فشار محیطی کاهش می‌یابد که به آن گام مثبت گویند. با عبور موج، کاهش فشار یا مکش رخ می‌دهد که به آن گام منفی می‌گویند. فشار گام منفی، نسبتاً کوچک و تدریجی بوده و در اکثر مواقع، از اثر آن صرف نظر می‌شود. موج فشار، از انفجار حوزه نزدیک مواد منفجره گازی و مایع و حوزه دور مواد منفجره جامد ایجاد می‌شود. در هر نقطه از مسیر انتشار آن، میزان فشار محیط به صورت تدریجی تا فشار مبنای انفجار افزایش یافته و سپس به فشار محیطی کاهش می‌یابد و معمولاً گام منفی ندارد.

انفجارها از نظر موقعیت چشمه انفجار نسبت به سازه به دو دسته اصلی «انفجار خارجی» و «انفجار داخلی» تقسیم می‌شوند. انفجار خارجی خود به سه دسته انفجار در سطح زمین، انفجار در هوا، انفجار در داخل زمین، تقسیم می‌شوند. در انفجار هوایی، امواج به صورت کروی منتشر شده و مستقیماً به سازه برخورد می‌کنند. در انفجار سطحی، انتشار امواج در هوا، بصورت نیم

کره بوده و مستقیماً به سازه برخورد می کنند. در انفجار زیرزمینی، انرژی حاصل از انفجار به صورت امواج فشاری و برشی در زمین منتقل شده و با انتشار آنها، شوک‌های شدیدی ایجاد می گردند که می توانند اثرات تخریبی شدیدی بر سازه‌ها داشته باشند [۷].

موج انفجار پس از برخورد با مانع صلب، منعکس می شود. بازتاب موج در اطراف مانع، به شکل (مشخصات هندسی سازه) و اندازه آن، بستگی دارد. ساده‌ترین حالت بازتاب موج انفجار، در هنگام برخورد آن به صورت عمودی به دیوار صلب است که در این حالت، فشار بازتاب از رابطه زیر تعیین می شود:

$$p_r = 2p_{s0} \left[\frac{7p_0 + 4p_{s0}}{7p_0 + p_{s0}} \right] \quad (1)$$

مشخصه‌های مهم موج انفجار عبارتند از:

الف) سرعت جبهه موج انفجار (U_s) که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$U_s = 340 \times (1 + 0.83p_{s0})^{0.5} \quad (2)$$

که در آن p_0 فشار مبنای انفجار بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع است.

ب) مدت زمان گام مثبت یا زمان تداوم انفجار (t_d) که زمانی است که فشار، بیش از فشار محیطی است و مقدار آن برای سطوح مختلف متفاوت می باشد.

ج) تکانه ویژه انفجار (i_s) که سطح زیر منحنی فشار - زمان برای هر نقطه محدوده انفجار بوده و به دو جزء مثبت و منفی تقسیم می گردد. به دلیل کوچک بودن مقدار تکانه منفی، از آن صرف نظر می شود.

د) طول موج (λ) که فاصله هر نقطه تحت فشار مبنا واقع در سطح جبهه انفجار تا اولین نقطه تحت فشار محیطی واقع در پشت جبهه انفجار می باشد. مقدار طول موج بر حسب متر، از رابطه زیر محاسبه می شود [۸]:

$$\lambda = U_s \times t_d \quad (3)$$

مفهوم جبهه موج بیان مناسبی برای انتشار هر نوع موج است. بنا بر تعریف، مکان هندسی نقاطی که فاز ارتعاش یک کمیت فیزیکی متعلق به موج در آنها یکسان باشند، جبهه موج نامیده می شوند. جبهه‌های موج می توانند اشکال مختلفی داشته باشند. اگر آشفتگی‌ها فقط در یک راستا منتشر شوند، در این صورت امواج را امواج تخت می گویند. در هر لحظه معین، وضعیت در تمام نقاط یک صفحه عمود بر راستای انتشار یکسان است. جبهه‌های موج در این مورد به شکل صفحات تخت عمود بر پرتوها (خطوط مداری که در جهت انتشار نور رسم می شوند) خواهند بود. مورد ساده دیگر، در مورد امواج کروی است. در این مورد آشفتگی از یک چشمه موج در کلیه جهات به طرف خارج منتشر می شود. در این حالت جبهه‌های موج به

صورت سطوح کروی خواهند بود و پرتوها خطوط شعاعی هستند که از چشمه در تمام جهتها دور می‌شوند. در فواصل دورتر از چشمه، جبهه‌های یک موج کروی خمیدگی بسیار کمی دارند و اغلب در ناحیه‌ای محدود از فضا می‌توان آنها را به صورت تخت در نظر گرفت. البته اشکال دیگری نیز برای جبهه موج می‌توان در نظر گرفت.

پدافند غیرعامل عبارت است از مجموعه اقدامات غیرمسلحانه ای که به کارگیری آنها موجب افزایش بازدارندگی، کاهش آسیب پذیری، ارتقاء پایداری ملی، تداوم فعالیت های ضروری و تسهیل مدیریت بحران در برابر تمهیدات و اقدامات نظامی دشمن می‌شود. تداوم برق رسانی به مناطق حساس و نظامی از اهمیت بالایی برخوردار است. در صورت بروز مشکل در نیروگاه‌ها، شبکه های انتقال و توزیع و نیز پست های برق، تداوم برق رسانی به این مراکز دچار مشکل می‌شود. بنابراین هنگام جنگ و یا عملیات تروریستی و خرابکارانه، دشمن با صدمه زدن به تأسیسات زیربنایی شبکه برق می‌تواند نظم موجود را برهم زده و اگر این قطعی شبکه در کوتاه‌ترین زمان ممکن برطرف نگردد، مراکز نظامی کارآیی لازم خود را از دست داده و دشمن می‌تواند صدمات جبران ناپذیری را در کمترین زمان و با بالاترین حد ممکن وارد کند. برای جلوگیری از وارد آمدن اینگونه صدمات به تأسیسات زیربنایی برق توسط دشمن، می‌توان در نیروگاه‌ها و پست های فشار قوی برق، تمهیدات پدافند عامل را ایجاد کرد.

در نتیجه بروز خاموشی‌های گسترده و طولانی مدت در سایت‌های فرمان دهی نیروهای مسلح، ارتباط یگان‌ها و عملیات لجستیکی و تدارکات مختل می‌شود. از سوی دیگر برای پادگان‌های دور افتاده مساله تامین انرژی الکتریکی برای مصارف نظامی و یا رفاهی، حائز اهمیت است. بنابراین، استفاده از منابع تولید پراکنده برای پایگاه‌های نظامی حساس رواج یافته است؛ تا اینکه بتوان تغذیه پایدار سایت‌های فوق را در شرایط بحران تضمین کرده و شاخص پدافند غیر عامل را افزایش داد. به طور نمونه ارتش آمریکا در افغانستان با مشکل تهاجم القاعده به کاروان‌های سوخت رسانی برای پایگاه‌های خود مواجه شده که به منظور گذر از این بحران به سمت سایت‌های شامل منابع تولید پراکنده گام برداشته و در این زمینه سرمایه گذاری هنگفتی کرده است [۹].

با توجه به مطالب ذکر شده و اهمیت حفاظت و پیشگیری از وقوع خرابی در سیستم‌های توزیع برق برای تأسیسات نظامی و به نوعی اجرای پدافند غیرعامل و با نظر به اینکه اثرات دود و موج حاصل از انفجار در عملکرد این سیستم‌ها تا به حال در هیچ منبع داخلی و خارجی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند، در این تحقیق با در نظر گرفتن این فرضیه که در صورت وقوع انفجار و موج و دود حاصل از آن در نزدیکی سیستم قدرت، مقدار زیادی انرژی و دود آزاد می‌شود، چگونگی افزایش انعطاف پذیری سیستم قدرت در برابر اثرات دود و موج ایجاد شده با قرار دادن

بهینه منابع تولید توزیع شده، بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که دود آزاد شده توسط باد ماهیت تصادفی داشته و موج و شدت انفجار نیز به پارامترهای مختلفی بستگی دارد، بنابراین سناریوهای مختلف ناشی از این پدیده بررسی شده و بهینه‌ترین تصمیم بر اساس آن اتخاذ می‌شود. بنابراین در این تحقیق با استفاده از منحنی گل رز- باد، به عنوان یک روش ابتکاری، موثرترین سناریوها مشخص خواهد شد. همچنین برای تجزیه و تحلیل مسائل چند هدفه، الگوریتم‌های زیادی تاکنون ارائه شده است، اما در این تحقیق، الگوریتم جدیدی که مبتنی بر جام قهرمانی است، برای اولین بار ارائه می‌گردد. شرح روش‌های پیشنهادی و نشان دادن توانایی روش‌های پیشنهادی با استفاده از تجزیه و تحلیل عددی صورت خواهد گرفت..

پیشینه‌های پژوهش

با توجه به مطالعات گسترده‌ای که در میان منابع مطالعاتی و مجلات و مقالات معتبر، انجام شد، هیچ تحقیق مشابهی که بر اساس اهداف تحقیق حاضر طراحی و اجرا شده باشد، یافت نشد و عمده تحقیقات پیشین در راستای افزایش انعطاف‌پذیری سیستم‌های توزیع برق در حالت کلی بوده و یا بر اساس تعیین خطاها و پیش‌بینی آنها به منظور حفاظت از شبکه توزیع برق بوده است و دو پارامتر اصلی این تحقیق شامل سیستم‌های توزیع برق تاسیسات نظامی و اثرات مخرب دود و انفجار حاصل از مواد منفجره در مجاورت این سیستم‌ها در هیچ یک از منابع مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در ادامه شرح مختصری از تحقیقات پیشین که همانطور که گفته شد عمدتاً در حل محور افزایش انعطاف‌پذیری سیستم‌های توزیع برق انجام شده است آورده شده است:

برخی از روش‌های ارتقاء انعطاف‌پذیری مانند استفاده از فناوری‌های اتوماسیون توزیع [۹]، جزیره‌ای کردن [۱۰]، ژنراتور اضطراری سیار [۱۱]، قرار دادن بهینه سوئیچ در سیستم‌های توزیع [۱۲] و سیستم‌های ذخیره انرژی قابل حمل [۱۳] را می‌توان در شبکه‌های برق استفاده نمود. در [۱۴] برای بهبود انعطاف‌پذیری شبکه برق در برابر حوادث ناگهانی که در اثر خسارات خط در شرایط شدید جوی ایجاد می‌شود، طرح جزیره‌ای کردن پیشنهاد شده است. در [۱۵] هدف اصلی تحقیق تعیین علل قطعی گسترده در سیستم توزیع برق و یافتن رویکردهایی برای تقویت سیستم در برابر شرایط جوی شدید عنوان شده است. در [۱۶] نشان می‌دهد که ماهیت خاموشی‌های ناشی از بلایای طبیعی با ماهیت خرابی‌های داخلی در سیستم‌های الکتریکی متفاوت است. بنابراین، ترمیم سیستم در طولانی مدت امکان پذیر خواهد بود. در [۱۷] سیستم توزیع برق از نظر تولید بار پیوسته در منابع تولید توزیع شده بهینه شده است. در [۱۸] اثر دود و شعله ناشی از آتش سوزی سه گونه گیاهی بر عایق‌های الکتریکی آزمایش شده است که در

آن نشان داده شده است که چگونه ماهیت دود و شعله ناشی از آتش سوزی این سه نوع گیاه می‌تواند باعث خرابی در عایق‌های الکتریکی شود. در [۱۹] آزمایشی برای بدست آوردن میزان ولتاژ خرابی ناشی از دود و شعله ناشی از آتش سوزی طراحی شده و با شرایط نرمال و عادی مقایسه شده است. در [۲۰] بهینه‌سازی انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت در برابر آتش‌سوزی، ارزیابی شده است. با این حال، به دلیل تمرکز بر روی شعله و عدم توجه به دود آتش سوزی، فقط یک سناریو در آن ارائه شده است.

در [۲۱] با ساخت و نصب تجهیزات لازم برای انعطاف‌پذیری نتیجه گرفته شد که برنامه‌ریزی توسعه سیستم قدرت مبتنی بر انعطاف‌پذیری می‌تواند شاخص مقاومت را بهبود بخشد. همچنین، نشان داده شد که منابع انعطاف‌پذیری تجهیزات شبکه در هنگام بلایای طبیعی از سیستم قدرت جدا نیستند. بنابراین در شرایط نامناسب جوّی، آنها می‌توانند انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را بهبود بخشیده و آن را در حالت کار نگه دارند. در [۲۲]، یک روش شبیه‌سازی مونت کارلو و یک چارچوب مبتنی بر مدل شکنندگی برای انعطاف‌پذیری ارائه شده است. نکته قابل توجه این است که با استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان مانند از دست دادن فرکانس بار، انرژی پیش‌بینی نشده و شاخص‌های زیرساختی، مقاومت سیستم در برابر شرایط نامناسب جوّی تخمین زده شده است. در [۲۳] روشی برای تخمین خسارت‌های ناشی از آتش‌سوزی بر روی سیستم توزیع برق پیشنهاد شده است. اما، هیچ استراتژی خاصی برای غلبه بر خطر آتش‌سوزی ارائه نشده است. در [۲۴] و [۲۵] روش جدیدی برای عملکرد سیستم توزیع بهینه در برابر شعله آتش در حضور میکرو شبکه‌ها ارائه شده است. با توجه به انعطاف‌پذیری به نظر می‌رسد که قرارگیری بهینه دستگاه‌ها در سیستم قدرت می‌تواند رضایت کاربران نهایی را افزایش دهد.

در تحقیقات دیگری عمدتاً بر مساله شناسایی جریان‌های خطا و استفاده از سامانه‌های حفاظتی در سیستم‌های توزیع برق متمرکز شده است. به عنوان مثال در گزارش [۲۶] محقق، با ارائه مثال‌های ساده نشان می‌دهد که جریان‌های خطا در تجهیزات حفاظتی هنگامی که منبع تولید پراکنده وارد سامانه می‌شود، تغییر می‌کنند. علاوه بر آن، این مقاله بررسی حفاظت به صورت بهگزینی را در هنگام ورود هر منبع تولید پراکنده پیشنهاد می‌کند. اگر چه این راه حل تا زمانی که توان تولیدی منابع تولید پراکنده پایین است، کارا می‌باشد. در برخی گزارش‌ها [۲۷] و [۲۸] به دقت به مسئله هماهنگی بین فیوزها پرداخته شده است. آنها مشاهده کرده‌اند که برای یک خطای داده شده جریان‌های خطا ممکن است در ناحیه خطا در شاخه‌های پایین دست همانند شاخه‌های بالا دستی جاری شوند. سناریوهایی با ظرفیت‌ها، تعداد و مکان‌های متفاوت برای واحدهای تولید پراکنده با سامانه حفاظت شده توسط فیوزها در نظر گرفته شده و مشخص

گردیده که در حالت کلی اگر طرح حفاظتی تغییر نکند، تنها راه برای حفظ هماهنگی در حضور منابع تولید پراکنده با ظرفیت توان دلخواه قطع کردن تمامی تولیدات پراکنده همزمان با وقوع خطا در شبکه می باشد. این عمل سامانه را قادر می سازد تا به شبکه معمولی شعاعی بازگردد و هماهنگی بین واحدهای حفاظتی حفظ شود. اما به این معنی می باشد که تولیدات پراکنده حتی برای یک خطای موقتی از سامانه قطع می شوند. گزارش های دیگری به تعدادی موارد خاص هماهنگی شامل فیوزها، ریکلوزرها و رله ها اشاره کرده اند [۲۹ و ۳۰].

روش شناسی پژوهش

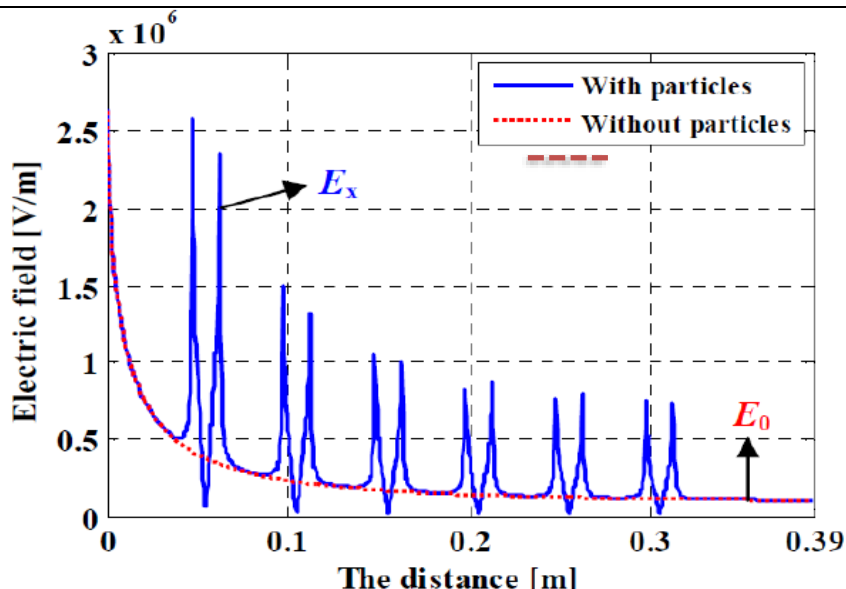
الف) اصول کلی

انفجار همواره شامل دو عامل دود و موج می باشد که بسته به ماده منفجره می تواند متفاوت باشد و یکی از مهمترین دلایلی است که می تواند در نزدیکی خطوط انتقال برق مربوط به تاسیسات نظامی باعث بروز عدم قطعیت در شبکه توزیع برق گردد. در صورت بروز انفجار، هم دود و هم موج انفجار، می تواند برای سیستم های برق مضر باشد. اگر دود و موج انفجار به فاصله کمی از خطوط برق برسد، ممکن است آسیب جدی به آنها وارد کند، همچنین، دود و موج انفجار می تواند منجر به خرابی عایق ها در مسیر شود. تفاوت عمده بین دود و موج این است که در صورت وزش باد، سرعت پخش و تاثیرگذاری دود بسیار بیشتر از موج در مدت زمان بسیار کمی می تواند به سیستم قدرت آسیب برساند. تأثیر دود و موج ناشی از انفجار بر سیستم قدرت و احتمال خرابی آن غیرقابل انکار است. دود و موج ناشی از انفجار به دلیل سیالیت و سرعت انتشار دود و نیز فشارهای ناشی از جبهه موج ایجاد شده، یک مسئله موثر بر عملکرد سیستم قدرت است. در شکل ۱، تأثیر احتمالی دود و موج ناشی از انفجار در مجاورت یک سیستم قدرت نشان داده شده است. می توان دریافت که تأثیر ذرات معدنی موجود در دود ایجاد شده و جبهه موج ناشی از انفجار بر توزیع میدان الکتریکی قابل توجه است که در آن E_0 قدرت میدان الکتریکی اولیه قبل از تماس با دود و موج انفجار و E_x قدرت میدان الکتریکی پس از تأثیر گرفتن از دود و موج ناشی از انفجار در نظر گرفته شده است. معادلات زیر برای موارد ذکر شده در نظر گرفته شده است.

$$T_{fl} = T_c + K * \exp(\alpha_f (z - \quad (1)$$

$$z_d)^2)$$

$$\alpha_f = 1/(2zp(z_p - z_d)) \quad (2)$$



شکل (۱) زمینه‌های غیریکنواخت احتمالی ناشی از ذرات معلق در دود و جبهه موج انفجار [۱۹].

(ب) استفاده از منحنی گل رز-باد برای کاهش سناریوها

انفجار و انتشار دود و موج ناشی از آن، در محیط جغرافیایی، شرایطی است که همراه با عدم اطمینان است، روشهای مختلفی برای تجزیه و تحلیل عدم اطمینان وجود دارد. روش مونت کارلو یکی از دقیق‌ترین روشهای تجزیه و تحلیل تصادفی است [۳۱]. روش مونت کارلو با نمونه‌گیری تصادفی از تابع توزیع متغیرهای تصادفی سعی دارد با در نظر گرفتن تعداد عدم قطعیت‌های موجود، مسئله را حل کند. مشکل اصلی مونت کارلو بار محاسباتی بسیار سنگین آن است. دقت روش مونت کارلو به تعداد مثالهایی که توابع توزیع انتخاب می‌کنند بستگی دارد. هرچه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد، دقت محاسبه و بار محاسباتی بیشتر خواهد بود. در این روش، رفتار مسئله با در نظر گرفتن توابع توزیع ورودی خاص حاصل خواهد شد. اگرچه روش مونت کارلو سخت‌ترین روش برنامه‌ریزی تصادفی است، اما حجم بالای محاسباتی این روش منجر به حل بسیاری از مسائل عملی شده است. روش‌های دیگر بر اساس مفهوم مونت کارلو طراحی شده‌اند تا تعادل بین دقت و بار محاسباتی را کاهش دهند. دو گروه از این روش‌ها برنامه نویسی تصادفی بر اساس شکل‌گیری سناریو و سایر روش‌های تخمینی هستند. برتری هر یک از این دو گروه بسته به مسئله مورد مطالعه متفاوت است [۳۲]. در حل مسائل برنامه نویسی تصادفی، امکان پذیر است

اولین قدم در حل مسائل تصادفی، مدل سازی متغیرهای تاثیرگذار بر روی عدم اطمینان موضوع است. مدل سازی توابع توزیع متغیرهای تصادفی در شبکه های قدرت مانند بارها توسط توابع توزیع پیوسته انجام می شود. توابع توزیع پیوسته می تواند حالت های مختلفی را برای وضعیت شبکه بالقوه تولید کند. به عنوان مثال، یک نقطه نمونه از عملکرد توزیع بار در یک ساعت مشخص می تواند با تمام قسمت های عملکرد توزیع بار در ساعت بعد مرتبط شود. به این معنی است که ممکن است همه حرکات غیرممکن باشد. بنابراین، در برنامه ریزی تصادفی، بر اساس تولید سناریو، تابع توزیع متغیرهای تصادفی توزیع می شود.

پس از وقوع انفجار، تاثیر دود و موج ناشی از آن به مشخصات جغرافیایی، جهت باد، سرعت جبهه موج انفجار (US)، مدت زمان گام مثبت یا زمان تداوم انفجار (td)، تکانه ویژه انفجار (is) و طول موج (λ) بستگی دارد و از آنجا که همه این متغیرها طبیعت تصادفی دارند، بنابراین، برای ارزیابی تاثیر انفجار در شبکه برق، استفاده از تمام احتمالات تصادفی، پیچیده خواهند شد. بنابراین، به منظور کاهش سناریوهای موجود، می توان از منحنی گل رز - باد استفاده کرد. با استفاده از این منحنی می توان نشان داد که احتمال کدام سناریو بیشتر از بقیه سناریوها است. جهت باد چگونه است و از آن در بسیاری از تحقیقات استفاده شده است [۳۳-۳۷].

ج. استفاده الگوریتم جدید بهینه سازی چند هدفه: الگوریتم جام قهرمانی:

بهینه سازی چندهدفه براساس روش های کلاسیک (مانند جمع وزنی، محدودیت ها، برنامه نویسی هدف و غیره) بسیار کند است زیرا در هر تکرار، الگوریتم باید برابر با تعداد توابع هدف باشد، اما در روش پارتو، چارچوب الگوریتم بر اساس مجموعه سلطه طراحی شده است، بنابراین x_1 بر x_2 غلبه می کند اگر:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}: f_i(X_1) \leq \quad (3)$$

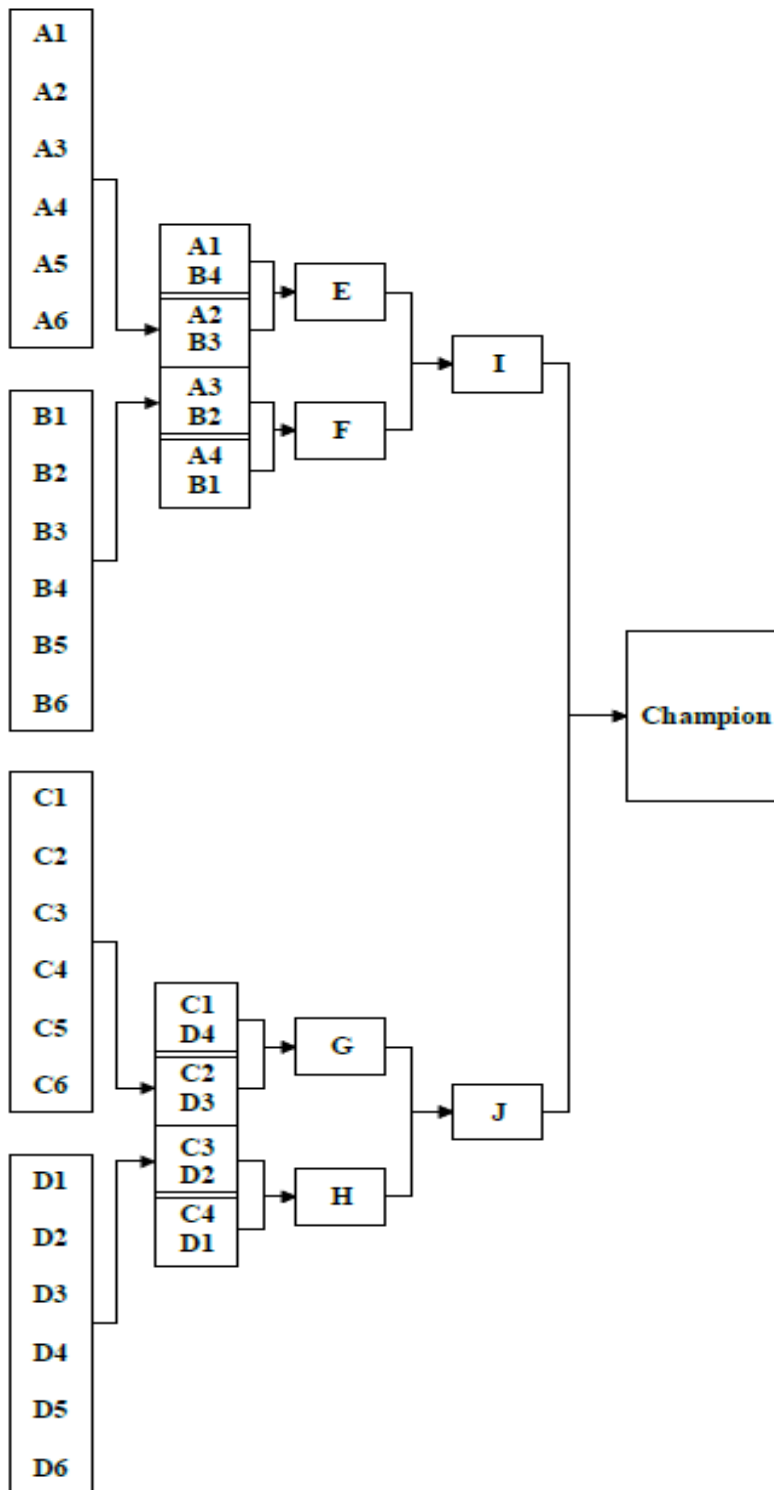
$$f_i(X_2)$$

$$\exists i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}: f_i(X_1) < \quad (4)$$

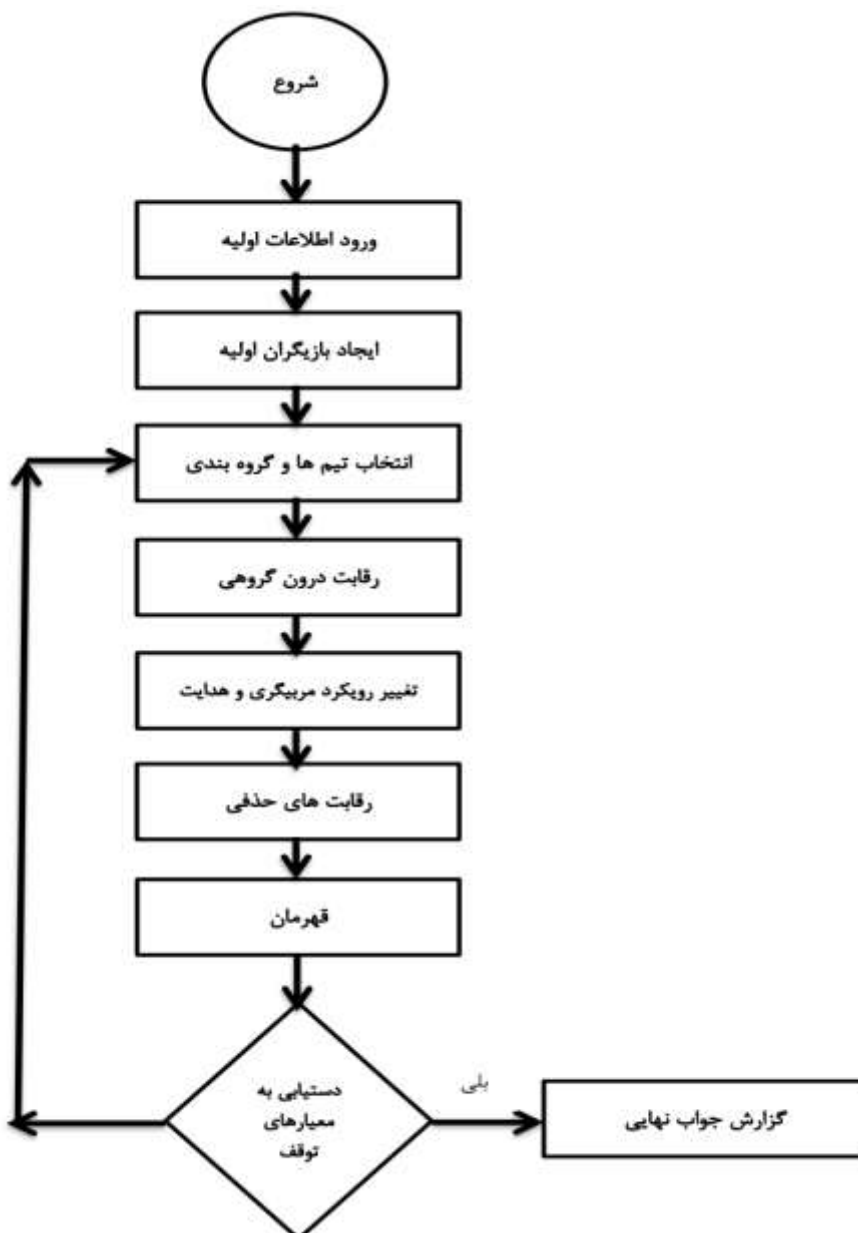
$$f_i(X_2)$$

روش کار به این صورت است که همانند مسابقات جام قهرمانی در رشته های مختلف ورزشی، در ابتدا مرحله رقابت گروهی برگزار می شود و پس از آنکه چهار تیم از هر گروه به مرحله حذفی می روند و در نهایت برنده تمام مسابقات حذفی قهرمان خواهد شد. لازم به ذکر است که پس از هر مسابقه، تیم های برنده و بازنده سعی در بهبودی دارند و خود را برای مسابقات بعدی بهبود می بخشند، همچنین تیم های برنده و بازنده به ترتیب دارای حالات مثبت و منفی هستند. هر تیم یک کاپیتان دارد که بهترین بازیکن در بین همه بازیکنان است. نحوه

گروه‌بندی و نمودار الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. در مرحله مقدماتی داده‌های اولیه مانند داده‌های شبکه، تعداد منابع تولید توزیع شده، تعداد بازیکنان، معیارهای توقف و غیره وارد می‌شود، سپس هر یک از بازیکنان به طور تصادفی در یکی از تیم‌ها قرعه کشی می‌کنند.



شکل (۲) برنامه‌های مسابقات جام قهرمانی



شکل (۳) نمودار جریان الگوریتم پیشنهادی بر اساس مسابقات جام قهرمانی (الگوریتم HCCA) در مرحله بعدی کاپیتان از بین بازیکنان تیم (بهترین متغیرها و سناریوها) انتخاب می‌شود.

در مرحله بعدی سه تیم از هر گروه وارد مسابقات حذفی می‌شوند. با ادامه این روند، برنده جام قهرمانی مشخص می‌شود. باید ذکر شود بعد از تغییر هر مرحله و استفاده از مراحل مربیگری. در مراحل تغییر (تعویض) و مربیگری، پس از هر مسابقات، تیم برنده می‌تواند بازیکنان بد و به جای آنها را با یک جایگزین از بازیکنان خوب تیم‌های بازنده حذف کند. لازم به ذکر است که تعداد بازیکنان جایگزین شده بر اساس عوامل تغییر دهنده قابل تغییر است. بعد از اینکه هر تیم برنده و بازنده مسابقات سعی می‌کنند خود را تجزیه و تحلیل و بهبود دهند، بنابراین پیاده‌سازی این عامل با استفاده از روش‌های مختلف امکان پذیر است زیرا روش‌های مختلف می‌توانند کیفیت پاسخ‌ها را تغییر دهند. در این تحقیق، از آنجا که کاپیتان برابر با مربی در نظر گرفته خواهد شد، پس از هر مسابقات و انجام مرحله تغییر، باید کاپیتان تیم پیدا شود و سایر بازیکنان توسط کاپیتان تغییر کنند. بنابراین با استفاده از مرحله مربیگری، پاسخ‌ها باید با اصلاح موقعیت بازیکنان و اعمال تغییرات تصادفی، جای مطلوب خود را پیدا کنند. لازم به ذکر است، در مرحله تغییر، حداکثر تعداد بازیکنانی که می‌توانند تغییر کنند برابر با نیمی از هر بازیکن تیم است و در مرحله مربیگری می‌توان از روش‌های مختلف استفاده کرد.

(د) روش فازی

عملکرد عضویت روش فازی به شرح زیر است:

$$\mu_{f_i} = \begin{cases} 1 & \text{for } f_i(X) \leq f_i^{\min} \\ 0 & \text{for } f_i(X) \geq f_i^{\max} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(X)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & \text{for } f_i^{\min} \leq f_i(X) \leq f_i^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

در تابع عضویت فازی، مقدار پیوسته بین ۰ و ۱ برای مرزهای پایین و بالا محاسبه می‌شود. اما قبل از آن بایستی جدول هزینه‌های fi-max و fi-min تعیین شود [۳۸]. قبل از ایجاد ماتریس جدول هزینه‌ها، بهینه‌سازی تک هدف برای هر یک از توابع هزینه به طور جداگانه محاسبه می‌شود، پس از آن بهترین نقطه از هر تابع هزینه برای سایر توابع هزینه در ماتریس جدول هزینه‌ها محاسبه می‌شود و در نهایت بهترین و بدترین پاسخ هر تابع هدف به عنوان یک نقطه آرمانی (fU) و نقطه حداقل (fN) به شرح زیر استخراج می‌شود:

$$\Phi = \begin{pmatrix} f_1^*(\bar{x}_1^*) & \dots & f_i^*(\bar{x}_i^*) & \dots & f_p^*(\bar{x}_p^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1^*(\bar{x}_i^*) & \dots & f_i^*(\bar{x}_i^*) & \dots & f_p^*(\bar{x}_i^*) \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ f_1^*(\bar{x}_p^*) & \dots & f_i^*(\bar{x}_p^*) & \dots & f_p^*(\bar{x}_p^*) \end{pmatrix} \quad (۶)$$

$$f^u = [f_1^u, \dots, f_i^u, \dots, f_p^u] = [f_1^*(\bar{x}_1^*), \dots, f_i^*(\bar{x}_i^*), \dots, f_p^*(\bar{x}_p^*)] \quad (۷)$$

$$f^N = [f_1^N, \dots, f_i^N, \dots, f_p^N] \quad (۸)$$

برای کمینه کردن توابع هدف می توان نوشت:

$$f_i^N = \max_{\bar{x}} f_i(\bar{x}), \text{ subject to } \bar{x} \in \Omega \quad (۸)$$

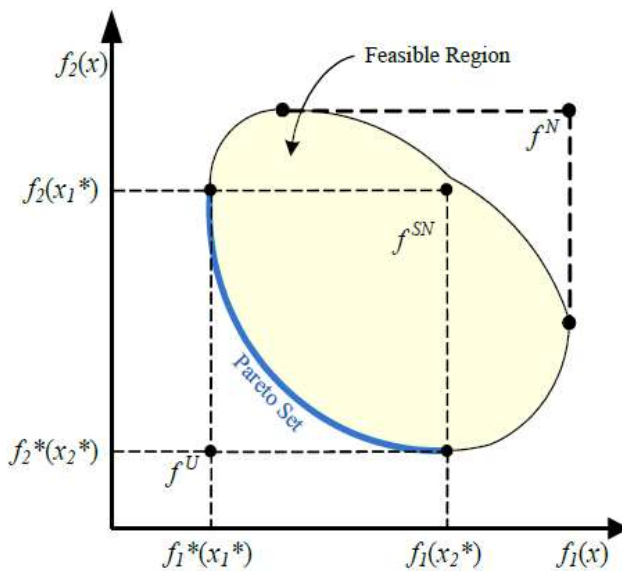
$$f^{SN} = [f_1^{SN}, \dots, f_i^{SN}, \dots, f_p^{SN}] \quad (۹)$$

$$f_i^{SN} = \max [f_i^*(\bar{x}_1^*), \dots, f_i^*(\bar{x}_i^*), \dots, f_i^*(\bar{x}_p^*)] \quad (۱۰)$$

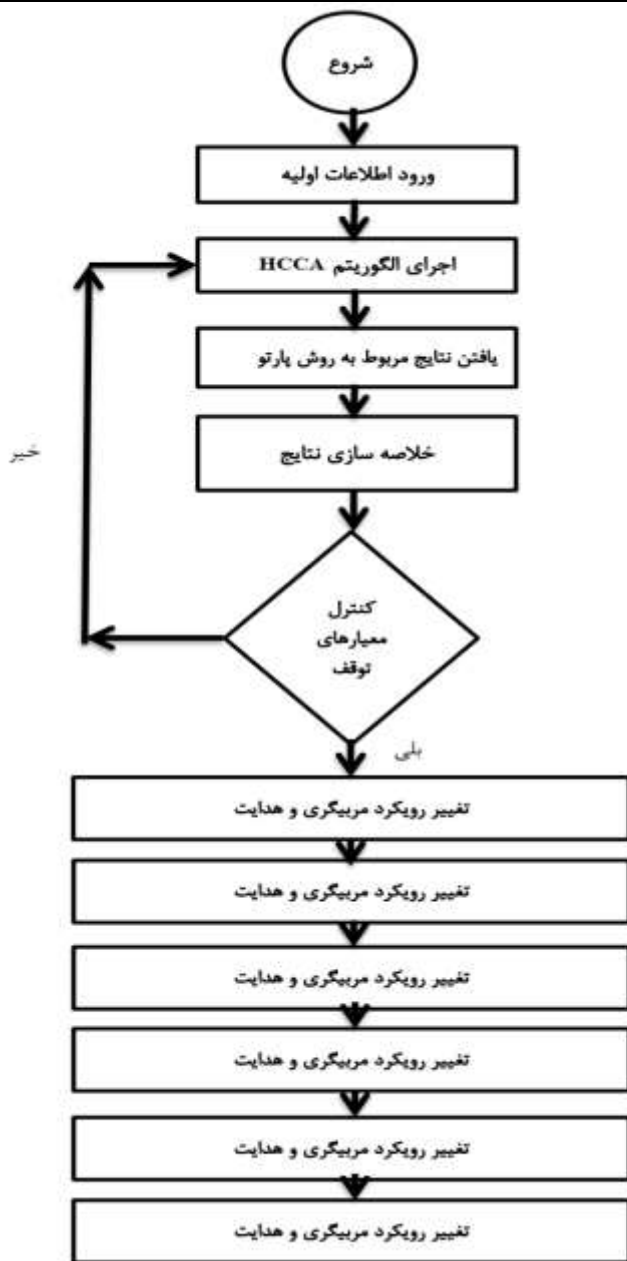
نقطه آرمانی، نقطه حداقلی و نقطه شبه حداقلی در شکل ۴ برای دو عملکرد هدف نشان داده شده است. سرانجام، هنگامی که امتیازات نقطه آرمانی و شبه حداقلی محاسبه شد، تابع عضویت کل به شرح زیر محاسبه می شود:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^p \omega_i \cdot \mu_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^p \omega_i \cdot \mu_i^k} \quad (۱۱)$$

اپراتور سیستم می تواند با تغییر ω_n بهترین حالت را در شرایط مختلف برای سیستم قدرت انتخاب کند. به عنوان مثال، اگر در برخی شرایط امنیت مهمترین مورد برای اپراتور باشد، ضریب وزن آن می تواند در مقایسه با سایر موارد افزایش یابد. نمودار جریان روش فازی در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل (۴) نقطه آرمانی، نقطه حداقلی و نقطه شبه حداقلی



شکل (۵) نمودار جریان اجرای روش فازی

تجزیه و تحلیل داده‌ها

آنالیز عددی

برای اجرای روش پیشنهادی، ۸ منبع تولید پراکنده برای یک شبکه استاندارد ۳۳ باس، که قبلاً با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار گرفته است در نظر گرفته خواهد شد. سپس مشخصات منابع تولید توزیع شده استخراج شده و همچنین چهار عملکرد هدف، شامل هزینه کل، انتشار، انحراف ولتاژ و تلفات محاسبه خواهند شد [۳۹ و ۴۰].

الف) هزینه کل

عملکرد هزینه برای منابع تولید را می‌توان به شرح زیر محاسبه نمود [۳۹]:

$$Cost = (C_{L,SH} \times P_{L,SH}) + \sum_{i=1}^{N_{DG}} C_{DG,i} + C_{substation} \quad (12)$$

$$C_{DG,i} = 1/3 \times \text{هزینه ثابت} + \text{هزینه متغیر}$$

ب) انحراف ولتاژ

برای محاسبه انحراف ولتاژ می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد [۴۰]:

$$\text{انحراف} = \sum_{i=1}^N \frac{|V_{rating} - V_i|}{V_{rating}} \quad (13)$$

- ولتاژ

$$f2 = \text{Min}[Voltage - Deviation]$$

ج) تلفات

برای محاسبه میزان تلفات بین خطوط شبکه برق می‌توان از معادله زیر استفاده کرد [۴۰]:

$$= \sum_{i=1}^{N_{br}} (R_i \times |I_i|^2) \quad (14)$$

اتلاف‌ها

$$f3 = \text{min} [\text{اتلاف‌ها}]$$

د) انتشار

برای محاسبه میزان انتشار، با توجه به آلاینده‌های ناشی از دود انفجار و گازهای آلاینده اصلی مانند اکسیدهای گوگرد (SOX)، اکسیدهای کربن (COX) و اکسیدهای نیتروژن (NOX) را می‌توان ارزیابی کرد، که اغلب به عنوان اثر CO2 در نیروگاه‌ها در نظر گرفته می‌شود. فرمول انتشار را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۴۰]:

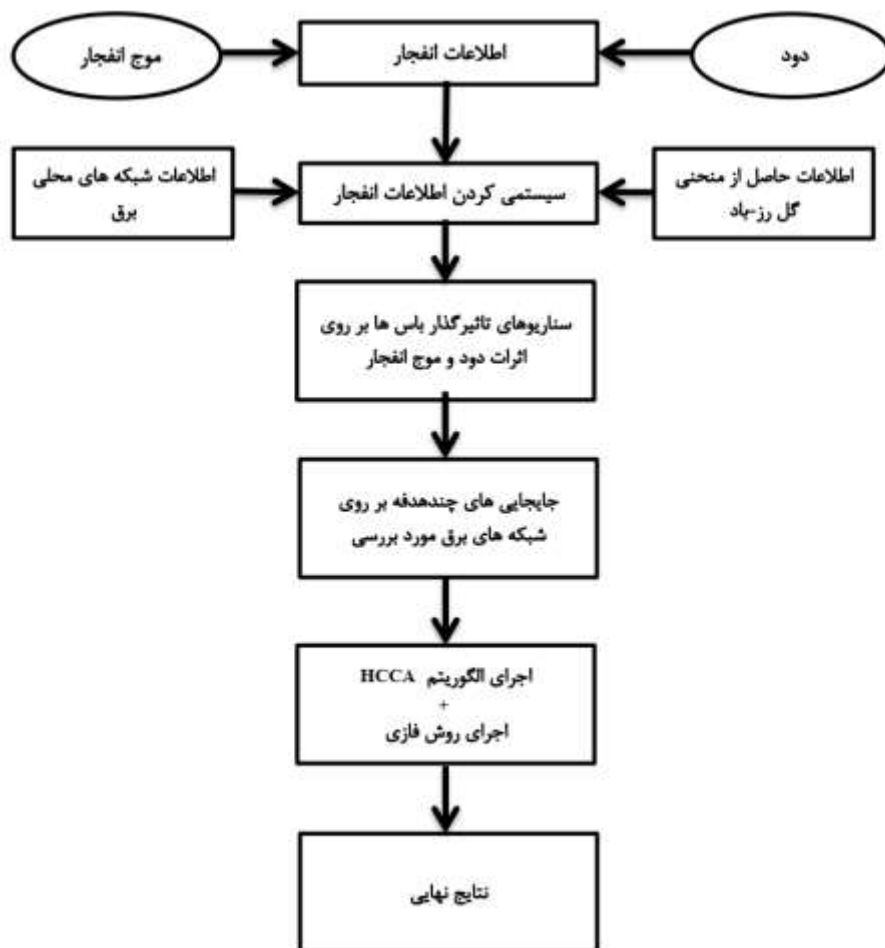
$$E_{DG,i} = (NO_X^{DG,i} + SO_2^{DG,i} + CO_2^{DG,i}) \times P_{DG,i}$$

$$E_{Grid} = (NO_X^{Grid} + SO_2^{Grid} + CO_2^{Grid}) \times P_s \quad (15)$$

$$f4 = \min[Emission]$$

ه) فلوچارت روش پیشنهادی

در نهایت برای اجرای روش پیشنهادی، با استفاده از سناریوها و مناطق سیستم قدرت که می‌تواند توسط سیستم در اثر دود و موج حاصل از انفجار در مجاورت سیستم‌های قدرت تامین کننده برق تاسیسات نظامی، آسیب ببیند مطابق با فلوچارت ارائه شده در شکل ۶ اقدام خواهد شد.



شکل (۸) نمودار جریان روش پیشنهادی

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری

نتایجی که از انجام این پایان‌نامه حاصل گردید عبارتند از:

۱- قید زمان بازیابی حداقل یک قید اساسی در مدل ارائه شده در این تحقیق است به عنوان مثال در مورد مطالعاتی دوم، منبع تولید پراکنده باس ۶۰ زمان بازیابی ۴۴ ساعت دارد در حالیکه منبع تولید پراکنده باس ۸۶ فقط حدود ۶ ساعت قادر به تامین بارهای حساس زیر گراف خود است. با افزودن قید حداقل زمان بازیابی بارها در این مورد مطالعاتی تقسیم بهتری بین منابع تولید پراکنده حاصل شده است چرا که ارزش بارهای حساس با هم برابر و از بارهای غیر حساس بیشتر است. این امر مستقیماً بر روی مکان کلیدهای جدید برای تغییر آرایش شبکه در مواقع بروز حوادث تاثیر گذار بود.

۲- تابع خسارت مشترکین به عنوان یک راهکار مناسب تحلیل هزینه به فایده برای تعیین مکان کلیدها برای تعیین زیر گراف‌هاست. با در نظر گرفتن این تابع به عنوان هدف مسئله، مدل ارائه شده قادر به تامین بارهای با خسارت بیشتر در مدت زمان طولانی تری است. این امر منجر به افزایش ریسک ولتاژ در برخی زیر گراف‌ها برای بارهای با تابع خسارت کمتر می‌گردد که در صورت مدل‌سازی آن به عنوان تابع هدف دوم می‌توان جبهه پارتوی پاسخ‌ها را داشته و پاسخ مناسب را با مصالحه بین ریسک ولتاژ و مجموع خسارت مشترکین تعیین نمود.

۳- در خلال خطاهای بزرگ به دلیل طولانی شدن مسیر زیر گراف‌های موجود ممکن است ریسک ولتاژ افزایش یابد و از طرف دیگر به دلیل عدم امکان تامین همه بارها ممکن است این ریسک کاهش یابد. در هر صورت مدل ارائه شده در خلال ریسک بزرگ نیز در زمان مقتضی قادر به حل مسئله است. لیکن در این مطالعه تعداد کلیدهای بیشتری نسبت به مطالعات قبلی جایابی گردید.

پیشنهادات

هرچند گردآورنده پایان‌نامه تمام سعی خود را برای انجام بی‌عیب و نقص به‌کار گرفته است. لیکن قطعاً مطالعه انجام شده تمام فضای بحث مورد نظر را پوشش نمی‌دهد. لذا در این بخش پیشنهاداتی برای ادامه مطالعه در این زمینه ارائه می‌گردد:

۱- در پایان‌نامه حاضر فرض بر کلیدزنی آنی در مواقع لزوم شد که این امکان در هر کلیدی وجود ندارد. لذا پیشنهاد می‌گردد زمان کلید زنی در نظر گرفته شود که این مسئله لزوم مدل‌سازی تابع خسارت مشترکین را تا زمان برق‌رسانی ایجاد می‌کند.

- ۲- در پایان نامه حاضر فرض بر تولید منابع تولید پراکنده تحت هر شرایطی شد که در عمل برخی از این منابع در هر شرایط با بروز حوادث و تغییر آرایش به دلایل مسائل پایداری فرکانسی قادر به تولید نیستند. پیشنهاد می‌گردد این عدم تولید در شرایط مشخصی از شبکه در مطالعات بازیابی در نظر گرفته شود.
- ۳- پیشنهاد می‌گردد با توجه به زمان طولانی بازیابی، اثر تغییر ساعت روز در مقدار تولید منابع فتوولتائیک در مطالعه وارد شده و لذا در طول دوره بازیابی ارزش ظرفیت منبع فتوولتائیک متغیر در نظر گرفته شود تا مسئله با قدرت بالاتری مدل گردد.
- ۴- پیشنهاد می‌گردد، قید زمان حداقل بازیابی بارها را با توجه به درجه اهمیت بارها تخصیص داده و مسئله را توسعه داد.
- ۵- پیشنهاد می‌گردد پرداخت خسارات ناشی از عدم امکان تولید منابع تولیدات پراکنده در شرایطی که امکان تولید ندارند به صاحبان این منابع. در تابع هدف در نظر گرفته شود.

منابع

[20] ا. جواهری، ر. افشار، ع. سعیدی، راهی ناگزیر. شرکت توزیع نیروی برق مشهد، ۱۳۹۰.

- [1] F. Shen, Q. Wu, S. Huang, J. C. López, C. Li, and B. Zhou, "Review of Service Restoration Methods in Distribution Networks," in 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2018, pp. 1-6: IEEE.
- [2] 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, vol. 31, no. 2, pp. 1139-1150, 2016.
- [3] J. C. López, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, "Optimal restoration/maintenance switching sequence of unbalanced three-phase distribution systems," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6058-6068, 2017.
- [4] A. Moradi and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm," IEEE Transactions on power delivery, vol. 23, no. 1, pp. 271-279, 2008.
- [5] E. De Tuglie, M. La Scala, G. Patrono, P. Pugliese, and F. Torelli, "An optimal strategy for switching devices allocation in radial distribution network," in AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conference in Africa, 2004, vol. 2, pp. 683-689: IEEE.

- [6] P. Carvalho, L. Ferreira, and A. C. da Silva, "A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1031-1036, 2005.
- [7] T. -F. Tsao, Y. -p. Chang, and W. -K. Tseng, "Reliability and costs optimization for distribution system placement problem," in 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2005, pp. 1-6: IEEE.
- [8] R. E. Brown, "The impact of heuristic initialization on distribution system reliability optimization," *ENGINEERING INTELLIGENT SYSTEMS FOR ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATIONS*, vol. 8, no. 1, pp. 45-52, 2000.
- [9] S. Lei, J. Wang, and Y. Hou, "Remote-controlled switch allocation enabling prompt restoration of distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 3129-3142, 2017.
- [10] Gotham, Kevin Fox, and Bradford Powers. , "Building Resilience: Social Capital in Post-Disaster Recovery. ," *Contemporary Sociology: A Journal of Reviews*. vol. 44, pp. 30-31, 2015.
- [11] Hosseini, S. , Yodo, N. and Wang, P. , , "Resilience modeling and quantification for design of complex engineered systems using Bayesian network," *ASME Paper No. DETC2014-34558*, 2014.
- [12] Woods, D. D. , , "Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering," *Reliability Engineering & System Safety*, 141, pp. 5-9, 2015.
- [13] Reichl, J. , Schmidthaler, M. and Schneider, F. , , "The value of supply security: The costs of power outages to Austrian households, firms and the public sector," *Energy Economics*, vol. 36, pp. 256-261, 2013
- [14] K. Zou, G. Mohy-Ud-Din, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, and S. Perera, "Distribution System Restoration with Renewable Resources for Reliability Improvement under System Uncertainties," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019.
- [15] R. J. Kafka, D. Penders, S. Bouchey, and M. Adibi, "System restoration plan development for a metropolitan electric system," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 8, pp. 3703-3713, 1981.
- [16] F. Shen, Q. Wu, Y. Xu, F. Li, F. Teng, and G. Strbac, "Hierarchical service restoration scheme for active distribution networks based on ADMM," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 118, p. 105809, 2020.
- [17] D. K. Molzahn et al. , "A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2941-2962, 2017.

- [18] S. Mishra, D. Das, and S. Paul, "A comprehensive review on power distribution network reconfiguration," *Energy Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 227-284, 2017.
- [19] S. Esmaeili, A. A. Moghaddam, S. Jadid, and J. M. G. Zapata, "Optimal Operational Scheduling of Smart Microgrids Considering Hourly Reconfiguration," in 4th Ieee Southern Power Electronics Conference, 2018: IEEE Press.
- [21] C. L. Smallwood and J. Wennermark, "Benefits of distribution automation," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 16, no. 1, pp. 65-73, 2010.
- [22] L. T. Marques, A. C. B. Delbem, and J. B. A. London, "Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2359-2370, 2017.
- [23] A. Zidan et al. , "Fault Detection, Isolation, and Service Restoration in Distribution Systems: State-of-the-Art and Future Trends," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 99, pp. 1-16, 2016.
- [24] W. Wei, M. Sun, R. Ren, and Y. Wang, "Service restoration of distribution system with priority customers and distributed generation," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2012, pp. 1-6: IEEE.
- [25] Y. Tian, T. Lin, M. Zhang, and X. Xu, "A new strategy of distribution system service restoration using distributed generation," in 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009, pp. 1-5: IEEE
- [26] Chen, C. , Wang, J. , Qiu, F. , et al. : 'Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2016, 7, (2), pp. 958-966
- [27] Arriaga, M. , Caizares, C. A. , Kazerani, M. : 'Long-term renewable energy planning model for remote communities', *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2016, 7, pp. 221-231
- [28] Lotfi, H. , Khodaei, A. : 'AC versus DC microgrid planning', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2017, 8, pp. 296-304
- [29] Mitra, J. , Vallem, M. R. , Singh, C. : 'Optimal deployment of distributed generation using a reliability criterion', *IEEE Trans. Ind. Appl.* , 2016, 52, pp. 1989-1997
- [30] 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 Trans. Power Syst.* , vol. 32, no. 5, pp. 3747-3757, 2017.
- [31] Manshadi, S. D. , Khodayar, M. E. : 'Resilient operation of multiple energy carrier microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, 6, pp. 2283-2292

- [32] Zhang, B. , Dehghanian, P. , Kezunovic, M. : ‘Optimal allocation of PV generation and battery storage for enhanced resilience’, IEEE Trans. Smart Grid, 2019, 10, pp. 535–545
- [33] Ma, S. , Su, L. , Wang, Z. , et al. : ‘Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events’, IEEE Trans. Power Syst. , 2018, 33, pp. 4842–4853.
- [34] Jinye Zhao, Tongxin Zheng, IEEE, and Eugene Litvinov “A Unified Framework for Defining and Measuring Flexibility in Power System” IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 31, Issue: 1, Jan. 2016).
- [35] Structures to Resist the Effects of Accidental Explosion”, UFC 3-340-02, Unified Facilities Criteria, 2008.
- [36] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, and F. Li, "Battling the extreme: a study on the power system resilience," Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 7, pp. 1253-1264, 2017.
- [37] M. Panteli, D. Trakas, and P. Mancarella, "Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2913-2919, 2016.
- [38] S. Lei, J. Wang, C. Chen, and Y. Hou, "Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 2030- 2039, 2018.
- [39] M. Zare, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moein-Aghataei, "Increasing the resilience of distribution systems against hurricane by optimal switch placement," in Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), 19-20 April 2017, Semnan, Iran, 2017.
- [40] S. Yao, P. Wang, and T. Zhao, "Transportable energy storage for more resilient distribution systems with multiple microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 3331-3340, 2019.
- [41] A. Berkeley, M. Wallace, and C. Coo, "A Framework For Establishing Critical Infrastructure Resilience Goals," Final Report and Recommendations by the Council, National Infrastructure Advisory Council, October 2010.
- [42] D. Cai, X. Li, and Y. Wang, et al. , "Impact of natural disasters on the western Hubei power grid and its anti-disaster enhancement measures," The Journal of Engineering, vol. 2019, no. 16, pp. 1976-1980, 2019.
- [43] M. Mohamed, T. Chen, W. Su and T. Jin, "Proactive Resilience of Power Systems Against Natural Disasters: A Literature Review," IEEE Access, vol. 7, pp. 163778-163795, 2019.
- [44] P. Karimyan, G. B. Gharehpetian, M. Abedi, and A. Gavili, "Long term scheduling for optimal allocation and sizing of DG unit

- considering load variations and DG type," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 277-287, 2014.
- [45] P. Li, D. Huang, J. Ruan, and H. Qin et al. , "Influence of Forest Fire Particles on the Breakdown Characteristics of Air Gap," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 4, pp. 1974-1983, 2016.
- [46] K. Charzan, and Z. Wroblebski, "The threat caused by fires under high voltage lines," in *15 st International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials*, Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland, Conference 15, no. 40, 2014.
- [47] D. Trakas, and N. Hatziaargyriou, "Optimal Distribution Operation For Enhancing Resilience Against Wildfire," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33 , no. 2, pp. 1-12, 2018.
- [48] S. Ma, L. Su, Z. Wang, F. Qiu, and G. Guo, "Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 5, pp. 4842-4853, 2018.
- [49] M. Panteli, C. Pickering, and S. Wilkinson, et al. , "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, 2017.
- [50] A. Bagchi, A. Sprintson and C. Singh, "Modeling the impact of fire spread on the electrical distribution network of a virtual city," *41st North American Power Symp*, Starkville, MS, USA, pp. 1-6, 2009.
- [51] S. Mohagheghi, and S. Rebennack, "Optimal resilient power grid operation during the course of a progressing wildfire," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 843-852, 2015.
- [52] B. Ansari, and S. Mohagheghi, "Optimal energy dispatch of the power distribution network during the course of a progressing wildfire," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, pp. 3422-3438, 2015.
- [53] Delfanti, M. ; Falabretti, D. ; Merlo, M. "Dispersed Generation Impact on Distribution Network Losses"; *Electric Power Systems Research* 2013, 97, 10–18.
- [54] Murali, M. ; Sharath Kumar, P. ; Vijetha, K. "Adaptive Relaying of Radial Distribution System with Distributed Generation"; *Int. J. Elec. Comput. Eng.* 2013, 3, 407-414.
- [55] Brahma, S. M. ; Girgis, A. A. "Distribution System Protective Device Coordination in Presence of Distributed Generation"; *Int. J. Power Energy Syst.* 2004, 24–1, 32–37.
- [56] Dugan, R. ; McDermott, T. "Distributed Generation"; *IEEE Ind. Appl. Mag.* 2002, 8, 19–25.

- [57] "Power System Relaying Committee, Impact of Distributed Resources on Distribution Relay Protection"; Online Available: <http://www.pes-psrc.org/>.
- [58] Y. Wang, C. Chen, J. Wang and R. Baldick, "Research on resilience of power systems under natural disasters-a review", IEEE Trans. Power Syst. , vol. 31, no. 2, pp. 1604–1613, Mar. 2016.
- [59] B. Zhang, P. Dehghanian and M. Kezunovic, "Optimal Allocation of PV Generation and Battery Storage for Enhanced Resilience", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 535-545, Jan. 2019.
- [60] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziargyriou, "Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 7, no. 6, pp. 2913 – 2922, Nov. 2016.
- [61] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989, doi: 10.1109/61.25627.