فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل
سال ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴، (پیاپی ۲۱): صص ۴۵-۵۶

برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع برق (تعیین مکان و ظرفیت) با در نظر گرفتن ملاحظات پدافند غیرعامل

بابک جدی[۱]، رضا غفارپور[۲]، رضا دشتی[۳]

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۰۹
تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۲

چکیده

در عصر فناوری و ارتباطات، لازمه توسعه و پیشرفت همه‌جانبه، حفظ امکانات، منابع و زیرساخت‌ها در برابر تهدیدات مختلف است. یکی از مهم‌ترین اصول مقابله با این تهدیدات، لحاظ کردن پدافند غیرعامل در برنامه‌ریزی، طرح و توسعه و بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت به‌عنوان پشتوانه اقتدار ملی است. در این مقاله، مدلی جدید برای برنامه‌ریزی پویای منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع برق با درنظر گرفتن ملاحظات پدافند غیرعامل ارائه می‌شود. مدل برنامه‌ریزی به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی با هدف کاهش مدت زمان خاموشی بارهای شبکه با درنظر گرفتن اولویت بارهای حیاتی، حساس و مهم فرمول‌بندی خواهد شد. در واقع، محقق به‌دنبال پاسخی برای این سوال است که منابع تولید پراکنده در کدام شین شبکه توزیع، با چه ظرفیتی و در چه سالی نصب گردند تا بارهای شبکه کمترین آسیب را در موقع قطع انرژی از سمت پست اصلی متحمل شوند. برای حل مسئله فرمول‌بندی‌شده از الگوریتم جستجوی هارمونی به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده خواهد شد. مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی یک شبکه توزیع ۳۸ شینه نمونه مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: منابع تولید پراکنده، شبکه‌های توزیع برق، پدافند غیرعامل، الگوریتم جستجوی هارمونی.

۱– دانشجوی کارشناسی ارشد برق و کامپیوتر- دانشگاه شهید بهشتی
۲- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع) rghaffarpour@ihu.ac.ir - نویسنده مسئول
۳- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت

۱- مقدمه

یکی از اهداف پدافند غیرعامل بالا بردن قابلیت بقا، استمرار عملیات و فعالیت‌های حیاتی و خدمات‌رسانی مراکز حیاتی، حساس و مهم نظامی و غیرنظامی کشور در شرایط وقوع تهدید، بحران و جنگ می‌باشد. تحقق این امر نیازمند برق‌رسانی مداوم به اینگونه مراکز است. تجربه نشان داده است که در بسیاری از جنگ‌ها نیروگاه‌ها، خطوط انتقال و پست‌های برق از جمله تأسیساتی هستند که مورد آسیب قرار می‌گیرند، به‌گونه‌ای که خاموشی و قطعی برق در زمره اولین و متداول‌ترین پیامدهای جنگ قرار دارد. نصب و راه‌اندازی منابع تولید پراکنده[1] در نزدیکی مراکز حیاتی، حساس و مهم نظامی و غیرنظامی و استفاده از شبکه‌های زیرزمینی توزیع برق، از جمله اقداماتی است که می‌توان برای ارتقاء شاخص‌های پدافند غیرعامل انجام داد.

تولید پراکنده برق به معنی تولید برق در مقیاس کوچک و در محل مصرف (عمدتا شبکه توزیع) می‌باشد. این شیوه تولید به مصرف‌کنندگان این اجازه را می‌دهد که انرژی الکتریکی مورد نیازشان را تولید کرده و اضافه توان الکتریکی را به شبکه قدرت یا مصرف کنندگان دیگر بفروشند. امروزه تولید پراکنده، یکی از راه‌کارهای صنعت برق در کشورهای پیشرفته تلقی می‌شود که میزان اتکا به شبکه‌های طولانی برق را کاهش می‌دهد. تولید پراکنده نه‌تنها از نظر اقتصادی هزینه بیشتری را دربر ندارد، بلکه به‌دلیل کاهش تلفات شبکه انتقال و توزیع، کاهش نیاز به ذخیره تولید و افزایش پایداری شبکه در صورت اتصال به شبکه، هزینه تمام‌شده برق را به‌میزان قابل توجهی کاهش خواهد داد.

منابع تولید پراکنده با سطح ولتاژ متوسط و توانی در حدود چند ده مگاوات، طیف وسیعی از تولیدکنندگان شامل موتورهای احتراقی، میکروتوربین‌ها، پیل‌های‌سوختی، توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی و مولدهای همزمان برق و حرارت را شامل می‌شوند. یکی از اثرات قابل توجه حضور این منابع، افزایش قابلیت‌اطمینان شبکه توزیع و جلوگیری از خاموشی و از دست رفتن بار در مراکز حیاتی، حساس و مهم نظامی و غیرنظامی می‌باشد. سرمایه‌گذاری و توسعه منابع تولید پراکنده، مزایای زیر را نیز به همراه دارد:

- تنوع‌بخشی به منابع انرژی و عدم وابستگی به یک یا دو منبع انرژی (مانند گاز و گازوئیل بخصوص در شرایط تحریم)
- مهیاسازی ساختار بازار برق
- تولید همزمان برق و حرارت و در نتیجه، افزایش بازدهی تولید انرژی
- پیک‌سائی

استفاده از مزایای فوق، مستلزم یک برنامه‌ریزی بهینه و مناسب و به‌کارگیری تمهیدات لازم برای اتصال ایمن و مطمئن این منابع می‌باشد. منظور از برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید پراکنده تعیین مکان نصب، ظرفیت و نیز بهترین زمان نصب این منابع در شبکه توزیع است. مسئله تخصیص بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع عمدتا با هدف بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات و بهبود شاخص‌های قابلیت‌اطمینان مورد بررسی قرار گرفته است [۳-۷].

در این مقاله مسئله برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع در یک افق پنج ساله با هدف ارتقاء شاخص‌های پدافند غیرعامل حل خواهد شد. هدف از به‌کارگیری منابع تولید پراکنده، تداوم برق‌رسانی و به حداقل رساندن مدت زمان خاموشی بارهای شبکه توزیع با درنظر گرفتن اولویت بارهای حیاتی، حساس و مهم است. ظرفیت این منابع بایستی به‌گونه‌ای تعیین شود که در صورت بروز هرگونه خرابی در شبکه توزیع، سیستم انتقال و یا پست فوق توزیع و در نتیجه قطع انرژی، بار این مراکز با کمترین مدت زمان خاموشی تأمین شوند. در واقع کمینه‌سازی مدت زمان خاموشی و به حداقل رساندن انرژی از دست رفته برای بارهای حیاتی، حساس و مهم شبکه در مواقع خطر و بحران به‌عنوان قید پدافند غیرعامل درنظر گرفته شده است.

مسئله برنامه‌ریزی به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی از نوع کمینه‌کردن تابع هدف مدل شده است. در مرحله نخست بارهای حیاتی، حساس و مهم شبکه شناسایی شده، سپس با درنظر گرفتن یک ضریب حساسیت برای هریک از این بارها مسئله با هدف کم‌کردن این ضریب حساسیت حل می‌گردد. ضریب حساسیت برای هریک از نقاط بار به‌صورت مقدار انرژی تأمین‌نشده[2] در شرایط وقوع خطا تعریف می‌شود. با محاسبه این ضریب به ازای حالت‌های مختلف اتصال منابع تولید پراکنده با ظرفیت‌ها و ضریب توان‌های مختلف، در نهایت بهترین حالت اتصال و ظرفیت به‌عنوان جواب بهینه مسئله معرفی خواهد شد. این جواب بهینه عبارت است از مکان، ظرفیت و ضریب توان نصب منابع تولید پراکنده

1– Distributed Generations (DG)

2- Energy Not Supplied (ENS)

به‌گونه‌ای که کمترین مقدار خاموشی و در نتیجه، کمترین مقدار انرژی‌تأمین نشده برای نقاط بار حیاتی، حساس و مهم به‌دنبال قطع انرژی از سمت پست اصلی به‌دست می‌آید. همچنین بهترین زمان نصب این منابع هم با استفاده از روش شبه‌پویا[1] تعیین می‌گردد. فرض می‌شود که منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم‌های مناسب، توانایی کارکرد در حالت جزیره‌ای[2] و جدا از پست اصلی را دارند [۱]. در کنار حداقل‌کردن مدت زمان خاموشی بارهای شبکه، سایر قیود حاکم بر شبکه نظیر مقدار ولتاژ مجاز شین‌ها نیز مدنظر قرارگرفته است.

برای حل این مسئله بهینه‌سازی، روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های کلاسیک تحلیلی، روش‌های برنامه‌ریزی عددی، روش‌های ابتکاری و روش‌های فراابتکاری وجود دارد. در این مقاله از روش الگوریتم جستجوی هارمونی[3] که یکی از روش‌های فراابتکاری است [۸]، استفاده خواهد شد.

در ادامه این مقاله و در بخش دوم، فرمول‌بندی مسئله تشریح می‌گردد. پس از آن در بخش سوم، مدل‌سازی بار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم، الگوریتم جستجوی هارمونی ارائه می‌شود. بخش پنجم به پخش بار شبکه توزیع پرداخته و در بخش ششم برنامه‌ریزی دینامیکی شبکه‌های توزیع مطرح خواهد شد. نتایج اعمال مدل پیشنهادی روی شبکه نمونه در بخش هفتم آمده و بخش هشتم به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

۲-۱- تابع هدف

شاخص‌های مختلفی برای نشان دادن تأثیر حضور منابع تولید پراکنده روی قابلیت‌اطمینان شبکه توزیع وجود دارند [۶]. در این مقاله برای نشان دادن تأثیر منابع تولید پراکنده در شرایط قطعی شبکه در اثر خطاهای مختلف، از شاخص انرژی تأمین‌نشده استفاده می‌شود. این شاخص براساس مکان نصب تجهیزات حفاظتی و نیز آرایش منابع تولید پراکنده، مقدار انرژی‌تأمین‌نشده مشترکین را با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف وقوع خرابی در تجهیزات شبکه، محاسبه می‌کند. لذا تابع هدف مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min\ (ReliabilityCost = \sum_{u=1}^{N_{LB}} C_u^{ENS} \times ENS_u) \qquad (۱)$$

که N_{LB} تعداد شین‌های متصل به بار شبکه توزیع، C_u^{ENS} (\$/MWh) هزینه انرژی تأمین‌نشده در شین u و ENS_u (MWh) مقدار انرژی تأمین‌نشده در شین u است.

۲-۲- قیود مسئله

- محدودیت ولتاژ مجاز شین‌ها: اغلب مطلوب آن است که در یک شبکه توزیع، مقدار ولتاژ شین‌ها از یک محدوده مجازی تجاوز نکند، چون در غیر این‌صورت به مصرف‌کننده‌ها آسیب جدی وارد خواهد شد. لذا بایستی:

$$V_{\min} \le V_i \le V_{\max}, \quad \forall i \in N_T \qquad (۲)$$

که V_i ولتاژ شین i، V_{max} و V_{min} به‌ترتیب بیشینه و کمینه ولتاژ مجاز شین‌ها برحسب پریونیت هستند.

- محدودیت ظرفیت منابع تولید پراکنده: ظرفیت منابع تولید پراکنده و همچنین ضریب توان این منابع بایستی در محدوده مجاز باشند.

$$0 \le S_k^{DG} \le S_{\max}^{DG} \qquad (۳)$$

$$pf_{\min}^{DG} \le pf_k^{DG} \le pf_{\max}^{DG} \qquad (۴)$$

که $S_{\max}^{DG}$ بیشترین ظرفیت قابل نصب منابع تولید پراکنده، $pf_{\max}^{DG}$ و $pf_{\min}^{DG}$ به‌ترتیب بیشینه و کمینه ضریب توان کاری منابع تولید پراکنده است.

- *محدودیت بیشینه نفوذ منابع تولید پراکنده*: در برخی از شبکه‌های توزیع، مجموع توان تولیدی منابع تولید پراکنده نباید از یک حد معینی (مثلاً ۶۰٪ کل بار شبکه) بیشتر شود. این محدودیت به‌دلیل جلوگیری از شارش معکوس توان به سمت پست فوق توزیع است که ممکن است در عملکرد تجهیزات حفاظتی اختلال ایجاد کند. در این مقاله برای مشارکت منابع تولید پراکنده در تأمین توان مشترکین محدودیت زیر در نظر گرفته می‌شود [۹]:

$$\sum_{k=1}^{N_{CB}} S_k^{DG} \times pf_k^{DG} \le 0.6 \times \sum_{j=1}^{N_{SS}} P_j^{grid} + 0.3 \times \sum_{i=1}^{N_{LB}} P_i^D \qquad (۵)$$

که $P_j^{grid}(MW)$ توان واردشده از شبکه انتقال در پست j، N_{SS} تعداد پست‌های فوق توزیع، $P_i^D(MW)$ بار متصل به شین i، pf_k^{DG} و S_k^{DG} به‌ترتیب ضریب توان و ظرفیت منبع تولید پراکنده متصل به شین k و N_{CB} تعداد شین‌های کاندید نصب منابع تولید پراکنده است.

1- Pseudo dynamic
2- Islanding
3- Harmony search algorithm

۳- مدل‌سازی بار

۳-۱- مدل‌سازی بار از منظر پدافند غیرعامل

در عصر فناوری و ارتباطات، لازمه توسعه و پیشرفت همه‌جانبه، حفظ امکانات، منابع و زیرساخت‌ها در برابر تهدیدات مختلف است. با یک نگاه راهبردی می‌توان دریافت که همه کشورها به‌گونه‌ای نیازمند دفاع غیرعامل در برابر تهدیدات هستند. انگیزه دشمن از

جدول ۱- ارزیابی اهمیت بارهای متصل به شبکه توزیع

معیارها	زیرمعیارها		امتیاز
ارزش اقتصادی مستحدثات و بازدهی ارزی و ریالی	کم		۳ امتیاز
	متوسط		
	زیاد		
میزان، نوع و پایداری تهدید	نوع تهدید	خرابکارانه	۱۰ امتیاز
		زمینی	
		دریایی	
		هوایی	
	میزان و تهدید پایداری	اهمیت و حساسیت	
		وضعیت مکانی و دفاعی	
امکان استفاده از خدمات جایگزین و موازی	تجدیدپذیر		۵ امتیاز
	به سختی تجدیدپذیر		
انحصاری بودن و یا امکان تجدیدپذیری	نیروی انسانی	تجدیدپذیر	۱۰ امتیاز
		به سختی تجدیدپذیر	
	تأسیسات	تجدیدپذیر	
		به سختی تجدیدپذیر	
	تجهیزات	تجدیدپذیر	
		به سختی تجدیدپذیر	
	مکان	تجدیدپذیر	
		به سختی تجدیدپذیر	
عمق تأثیرگذاری	اداره کشور	سطحی	۱۰ امتیاز
		میانی	
		عمیق	
	تأمین نیازهای حیاتی	سطحی	
		میانی	
		عمیق	
گسترش حوزه نفوذ	جمعیت	محلی	۱۰ امتیاز
		منطقه‌ای	
		سراسری	
	جغرافیا	محلی	
		منطقه‌ای	
		سراسری	
اهمیت استراتژیک	فرهنگی و اعتقادی		۵۰ امتیاز
	نظامی		
	اقتصادی		
	اجتماعی		
	سیاسی		

تهاجم احتمالی به خاک میهن می‌تواند ایجاد اختلال در اداره بخش مهمی از کشور و نارضایتی در بین مردم باشد. در این میان، اماکن با کاربردهای خاص و همچنین تأسیسات اصلی ممکن است هدف مناسبی برای دشمن باشد. بی‌شک یکی از بهترین اهداف از دید دشمن، تأسیسات برق‌رسانی است. فرض صحیح در هر تهاجمی این است که با ایجاد اختلال در سیستم برق‌رسانی یک منطقه، سایر بخش‌ها نیز از کار افتاده و یا دچار اخلال جدی شوند. بر این اساس، محتمل‌ترین هدف برای مهاجمین، تأسیسات اصلی برق‌رسانی از قبیل نیروگاه‌ها، پست‌های توزیع و فوق توزیع خواهد بود؛ تأسیساتی که دشمن می‌تواند از طریق بمباران هوایی، عملیات خرابکارانه و حتی سلاح‌های زمین به زمین مورد هدف قرار داده و فعالیت آن‌ها را به‌طور کلی متوقف سازد.

بخش توزیع نیرو که رابط بین صنعت برق و مشترکین است، نقشی چندسویه بر عهده دارد. نخست خدمات‌رسانی به مشترکین و تأمین رضایت ایشان و فروش انرژی برق به‌عنوان یک کالای اقتصادی. دوم نقش فنی برای نگهداری، راهبری و توسعه شبکه‌های توزیع، و سوم حفظ ارتباط و هماهنگی با بخش‌های بالادست صنعت برق می‌باشد به‌طوری‌که موجبات ادامه فرآیند تولید و عرضه برق حاصل گردد و راه توسعه این صنعت هموار گردد. لذا لازم است که نگاهی ویژه از منظر پدافند غیرعامل به این بخش از زنجیره تولید برق کشور شود.

از دیدگاه پدافند غیرعامل، دارایی‌های کشور در حوزه‌ها و بخش‌های مختلف را در سه دسته حیاتی، حساس و مهم دسته‌بندی می‌کنند. در همین راستا معیارها و شاخص‌هایی برای سطح‌بندی تجهیزات در حوزه انرژی نیز وجود دارد. معیارهای مختلفی برای سطح‌بندی بارهای متصل به شبکه توزیع می‌توان در نظر گرفت. نمونه‌ای از این معیارها و زیرمعیارها در جدول (۱) نشان داده شده است [۲]. در این روشِ ارزیابی، امتیاز هریک از عوامل با توجه به میزان اهمیت آن متفاوت است. در انتهای ارزیابی اگر مجموع امتیاز حاصل شده برای مرکز بار موردنظر بیش از ۷۰ باشد، آن مرکز «حیاتی» بوده، اگر بین ۴۰ تا ۶۹ باشد، «حساس» و اگر بین ۲۹ تا ۳۹ باشد «مهم» تلقی می‌شود.

۳-۲- مدل‌سازی بار از منظر الکتریکی

در شبکه‌های توزیع واقعی، بارهای مصرفی ثابت نبوده بلکه وابسته به ولتاژ هستند. به‌منظور ایجاد یک مدل دقیق و دست‌یابی به نتایج بهتر و البته واقعی‌تر، درنظر گرفتن مدل‌های واقعی بار در محاسبات پخش بار، امری ضروری است. عموماً بارهای یک شبکه توزیع به سه نوع خانگی، صنعتی و تجاری تقسیم‌بندی می‌شوند. توان مصرفی هر نقطه بار از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$P_i^D = P_{0i}^D \times V_i^{\alpha} \quad (۶)$$

$$Q_i^D = Q_{0i}^D \times V_i^{\beta} \quad (۷)$$

که P_i^D و Q_i^D توان حقیقی و راکتیو متصل به شین i، P_{0i}^D و Q_{0i}^D توان حقیقی و راکتیو نامی و پیش‌بینی شده متصل به شین i، α و β ضریب تغییر بار حقیقی و بار راکتیو هستند. در مطالعات برنامه‌ریزی شبکه توزیع معمولاً بارها را ثابت گرفته و مقادیر α و β را صفر در نظر می‌گیرند. در این مقاله مقادیر α و β برای انواع بارها در جدول (۲) آمده است [۱۰].

جدول ۲- مدل‌های مختلف بار و ضرایب تغییر مرتبط با آن‌ها

نوع بار	α	β
بار صنعتی	۰/۱۸	۶
بار خانگی	۰/۹۲	۴/۰۴
بار تجاری	۱/۵۱	۴/۳

در مطالعات برنامه‌ریزی دینامیکی شبکه توزیع، رشد سالیانه بار نیز بایستی در نظر گرفته شود. با در دست داشتن مقدار بار حقیقی و راکتیو پیش‌بینی‌شده برای سال اول شروع دوره برنامه‌ریزی (P_{0i}^D و Q_{0i}^D)، بار سال‌های مختلف از روابط زیر به‌دست می‌آید [۱۱]:

$$P_{i,t}^D = P_{0i}^D \times V_i^{\alpha} \times (1+\tau)^{t-1} \quad (۸)$$

$$Q_{i,t}^D = Q_{0i}^D \times V_i^{\beta} \times (1+\tau)^{t-1} \quad (۹)$$

که $P_{i,t}^D$ و $Q_{i,t}^D$ توان حقیقی و راکتیو شین i در سال t و τ نرخ رشد سالانه بار است. روابط (۸) و (۹) با اضافه کردن نرخ رشد سالانه بار (τ) به روابط (۷) و (۸) به‌دست آمده‌اند.

۴- پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی هارمونی

۴-۱- مروری بر الگوریتم جستجوی هارمونی

در چهار دهه گذشته، الگوریتم‌های زیادی برای حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی ارائه شده‌اند که بیشتر آنها براساس روش‌های برنامه‌ریزی عددی خطی و غیرخطی هستند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی در یافتن جواب بهینه سراسری در

مدل‌های ساده و ایده‌آل مفیدند. اما در مواجهه با مسایل بهینه‌سازی واقعی و پیچیده، محدودیت‌هایی داشته و کارایی لازم را ندارد. مشکلات محاسباتی موجود در مسایل بهینه‌سازی مهندسی، محققین را وادار به استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مبتنی بر شبیه‌سازی جهت حل مسائل بهینه‌سازی نمود. در الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی هارمونی که در سال ۲۰۰۱ ارائه شده است، برای حل مسائل بهینه‌سازی از فرآیند بداهه‌نوازی در موسیقی الهام گرفته شده است.

الگوریتم جستجوی هارمونی برای بهینه‌سازی مسئله مورد نظر، روند ۵ مرحله‌ای زیر طی می‌شود:

مرحله اول: پس از مشخص نمودن تابع هدف و قیود مربوطه، پارامترهای الگوریتم تعیین می‌شوند. پارامترهای الگوریتم عبارت‌اند از: تعداد متغیرها (M) و دامنه تغییرات هر متغیر، اندازه حافظه هارمونی (HMS)، نرخ احتساب حافظه (HMCR)، نرخ تنظیم گام (PAR)، طول پهنای باند (BW) و حداکثر تعداد جستجو (NI).

مرحله دوم: حافظه هارمونی با تولید بردارهایی تصادفی به تعداد HMS پر می‌شود. هر بردار شامل M مؤلفه و نشان‌دهنده یک جواب مسئله است. ماتریس حافظه و بردارهای هارمونی متناظر با جمعیت اولیه در سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری هستند.

مرحله سوم: در این مرحله یک بردار هارمونی جدید ($\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, ..., x'_M)$) تولید می‌شود. برای تولید این بردار از سه قانون زیر استفاده می‌شود:

الف) انتخاب از حافظه: هر مؤلفه بردار هارمونی جدید با در نظر گرفتن مقدار HMCR از مؤلفه متناظر یکی از بردارهای موجود در حافظه انتخاب می‌شود. مقدار HMCR که عددی بین صفر و یک است، احتمال انتخاب از حافظه را نشان می‌دهد.

ب) تنظیم گام: هر مؤلفه انتخاب‌شده از حافظه برای تغییر به اندازه $x_i' \pm rand() \times BW$ متحان می‌شود. این کار با استفاده از پارامتر PAR که به‌عنوان احتمال تنظیم گام تعریف می‌گردد، انجام می‌گیرد.

ج) تولید تصادفی: هر مؤلفه‌ای از بردار جدید که از حافظه انتخاب نشده باشد، به‌صورت تصادفی در محدوده بالا و پایین آن تولید می‌شود. در واقع، احتمال تولید تصادفی برای یک متغیر 1-HMCR است.

مرحله چهارم: مقدار تابع هدف برای بردار جدید ارزیابی می‌شود. اگر بردار جدید به‌دست‌آمده، مقدار بهینه‌تری برای تابع هدف در مقایسه با بدترین بردار موجود در حافظه به‌دست دهد، به جای آن در حافظه هارمونی قرار خواهد گرفت.

مرحله پنجم: تکرار مراحل ۳ و ۴ تا اینکه قید خاتمه ارضا شود.

شکل (۱) مراحل اعمال الگوریتم جستجوی هارمونی برای حل یک مسئله را نشان می‌دهد.

۴-۲- کدگذاری متغیر تصمیم

برای بهینه‌سازی یک مسئله توسط الگوریتم جستجوی هارمونی، اولین نکته تبدیل متغیرهای تصمیم[1] مسئله در قالب کدهای قابل استفاده در طول اجرای الگوریتم است. معمولاً در مسایل مربوط به برنامه‌ریزی واحدهای تولید پراکنده، متغیر تصمیم به‌صورت محل نصب و اندازه هر منبع تولید پراکنده است.

در این مطالعه، بردار هارمونی از دو قسمت تشکیل یافته است. طول هر قسمت برابر با تعداد شین‌های کاندید نصب منبع تولید پراکنده است. بخش اول بردار برای تعیین اندازه منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود. مقادیر آن نشان‌دهنده اندازه منبع تولید پراکنده قابل نصب روی آن شین است. در این روش، عدد صفر به معنای این است که روی این شین هیچ منبع تولید پراکنده‌ای نصب نمی‌شود. بخش دوم بردار هارمونی برای تعیین ضریب توان منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود. مقادیر این قسمت اعداد صحیح می‌باشند که هر عدد نشان‌دهنده ضریب توانی است که منبع تولید پراکنده نصب‌شده روی آن شین بایستی در آن ضریب توان کار کند. شکل (۲) ساختار پیشنهادی برای بردار هارمونی را نشان می‌دهد.

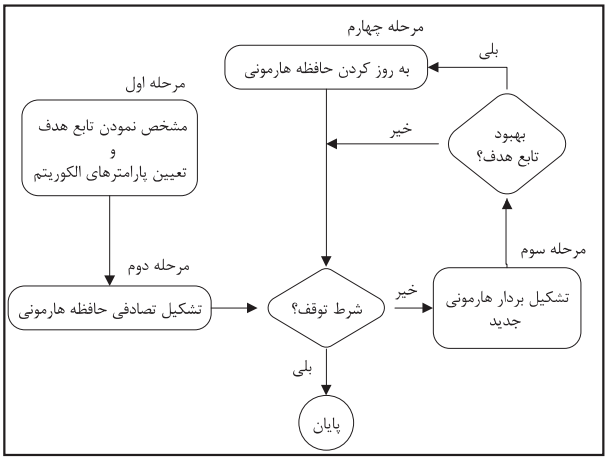
۵- پخش بار شبکه توزیع

یکی از مهم‌ترین و وسیع‌ترین ابزار تجزیه‌وتحلیل شبکه توزیع، تجزیه‌وتحلیل پخش بار است. تجزیه‌وتحلیل پخش بار، ابزاری اساسی و مهم در بررسی هر سیستم قدرتی، چه در طراحی و چه در بهره‌برداری می‌باشد. بهینه‌سازی یک سیستم قدرت، نیازمند حل متوالی مسئله پخش بار است. بنابراین، روشی که برای پخش بار استفاده می‌شود باید با نیرومندی و سرعت همگرایی بالا صورت گیرد.

شبکه‌های توزیع به‌دلیل بازه وسیع مقادیر مقاومت‌ها و

1- Decision variables

اندوکتانس‌ها و همچنین ساختار شعاعی، در ردیف شبکه‌های با شرایط[1] بد قرار می‌گیرند. روش‌های مختلفی برای پخش بار این شبکه‌ها در مراجع و مقالات ارائه شده است. در این تحقیق، از پخش بار مبتنی بر روش جاروب رفت و برگشت[2] استفاده شده است [۱۲].



شکل ۱- مراحل مختلف الگوریتم جستجوی هارمونی

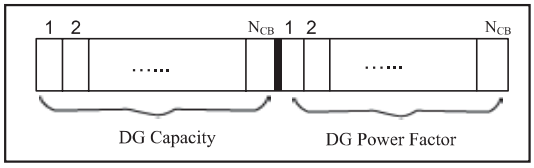
در این روش با شروع از شین انتهایی شبکه و اختصاص عددی دلخواه (معمولاً ولتاژ نامی شبکه) به ولتاژ این شین، به سمت پست اصلی حرکت کرده، ولتاژ و جریان بقیه شین‌ها و جریان خطوط به‌دست می‌آید (جاروب رفت). سپس با اختصاص ولتاژ نامی به اولین شین (که به پست اصلی متصل است) و با استفاده از جریان‌های محاسبه‌شده خطوط در مرحله جاروب رفت، ولتاژ جدید برای سایر شین‌ها به‌دست می‌آید (جاروب برگشت). این فرآیند تا جایی که مقدار به‌دست‌آمده برای ولتاژ شین‌ها از دقت کافی برخوردار باشد ادامه می‌یابد.

لازم به ذکر است که در این مقاله منابع تولید پراکنده به‌صورت PQ ثابت و با یک ضریب توان ثابت و مشخص در محاسبات پخش بار مدل می‌شوند [۱۳].

۶- برنامه‌ریزی پویای شبکه‌های توزیع

به‌طورکلی، حل مسئله برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع با دو رویکرد انجام می‌پذیرد [۵]:

- *رویکرد ایستا*[3]: در این رویکرد یک افق زمانی در نظر گرفته‌شده، مقدار بار برای سال آخر دوره برنامه‌ریزی به‌دست آمده و مسئله برای این سال حل می‌گردد. هدف مسئله تعیین نوع، محل و ظرفیت تجهیزات لازم برای نصب یا توسعه تجهیزات موجود در شبکه برای تأمین بار در سال آخر است. همه تجهیزات مشخص‌شده، در اولین سال شروع برنامه‌ریزی، در شبکه نصب و راه‌اندازی شده و یا از بین تجهیزات موجود توسعه می‌یابند.
- *رویکرد پویا*[4]: در این رویکرد، هدف مسئله نه‌تنها تعیین نوع، محل و ظرفیت تجهیزات لازم برای نصب یا توسعه تجهیزات موجود در شبکه است، بلکه بهترین زمان ممکن برای نصب یا توسعه نیز مشخص می‌گردد. در این رویکرد با در نظر گرفتن رشد بار سالیانه در هر سال، کل دوره برنامه‌ریزی به چند زیردوره تقسیم شده و مسئله برای هر زیردوره با در نظر گرفتن تجهیزات نصب‌شده یا توسعه‌داده‌شده در دوره‌های قبل، حل می‌شود.



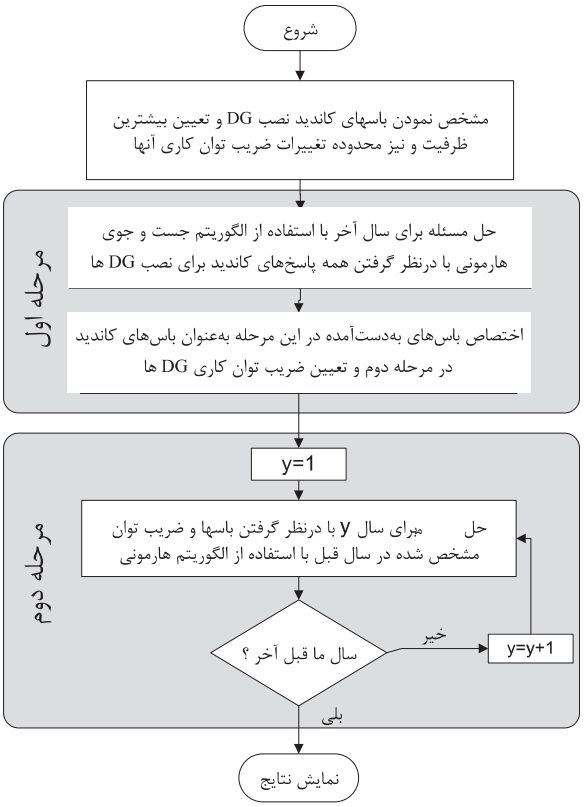
شکل ۲ - ساختار پیشنهادی برای کدگذاری بردار هارمونی

رویکرد پویا به‌دلیل وجود وابستگی بین سال‌های مختلف برنامه‌ریزی، بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر از رویکرد ایستا است. ولی در عین‌حال، جواب به‌دست‌آمده بسیار به‌صرفه‌تر است. در این مقاله ما از رویکرد پویا و براساس روش شبه‌پویا برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع با درنظر گرفتن منابع تولید پراکنده استفاده خواهیم کرد.

۶-۱- روش شبه‌پویا برای برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع

روش شبه‌پویا برای حل مسئله برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع از دو مرحله تشکیل شده است [۱۴]. در مرحله اول با در نظر گرفتن بار سال آخر دوره برنامه‌ریزی، مسئله برای این سال حل می‌شود. جواب‌های به‌دست‌آمده در این مرحله شامل مکان، ظرفیت و ضریب توان منابع تولید پراکنده برای تأمین بار در سال آخر دوره برنامه‌ریزی در بهینه‌ترین شکل ممکن در شبکه هستند. در مرحله دوم با شروع از سال اول مسئله حل

1- Bad conditioned
2- Backward-forward sweep
3- Static approach
4- Dynamic approach

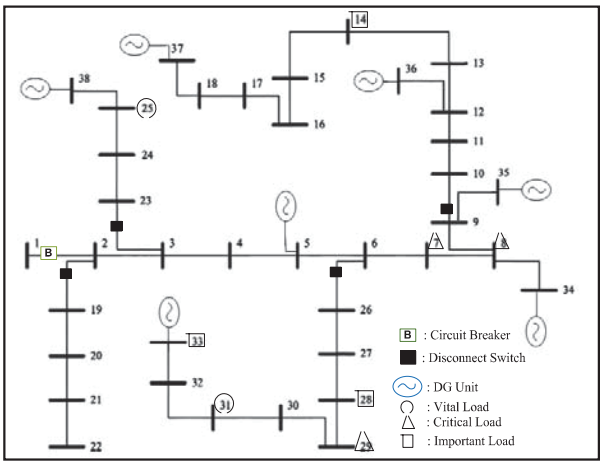


شکل ۳- روند نمای حل مسئله برنامه‌ریزی واحدهای تولید پراکنده با استفاده از روش شبه‌پویا

می‌گردد. در این مرحله، از بین جواب‌هایی که در مرحله اول به‌دست آمده‌اند، برای حل مسئله استفاده می‌شود. با تأثیر رشد بار برای تمامی سال‌ها مابین سال اول و سال آخر مسئله حل می‌گردد. پس از پایان مرحله دوم، مجموعه‌ای از جواب‌ها شامل مکان، ظرفیت و ضریب توان منابع تولید پراکنده که در هر سال باید به شبکه اضافه شوند، به‌دست می‌آید. شکل (۳) مراحل مختلف این روش برای حل مسئله برنامه‌ریزی واحدهای تولید پراکنده را نشان می‌دهد.

۷- شبیه‌سازی و نتایج عددی

روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده روی یک شبکه توزیع نمونه مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. شبکه مورد نظر، یک شبکه توزیع شعاعی ۳۸ شینه فشار متوسط با ۳۷ شین متصل به بار بوده که بارهای آن ترکیبی از بارهای خانگی، تجاری و صنعتی هستند. در سال شروع برنامه‌ریزی، بار کل شبکه ۴/۰۴۵MW و ۲/۵MVAR بوده که با در نظر گرفتن رشد سالیانه ۸٪ به ۵/۵۰۳۲MW و ۳/۴۰۱۲MVAR در سال آخر برنامه‌ریزی افزایش یافته است. شکل (۴) شمایی از این شبکه را نشان می‌دهد [۷].



شکل ۴- شبکه ۳۸ شینه مورد مطالعه

همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، شین‌های ۵، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷ و ۳۸ به‌عنوان شین کاندید نصب منبع تولید پراکنده در نظر گرفته شده‌اند. ظرفیت منابع تولید پراکنده به‌صورت مضرب صحیحی از ۱۰۰kVA می‌باشد و بیشترین ظرفیت قابل نصب در شبکه نیز ۲۰۰۰kVA است. همچنین فرض می‌شود این مولدها قادرند در هریک از ضریب توان‌های ۰/۸۵، ۰/۹، ۰/۹۵ و ۱ کار کنند [۹].

برای این شبکه، نرخ خرابی خطوط ۰/۱۲ f/km در نظر گرفته شده است. بقیه تجهیزات شبکه توزیع ۱۰۰٪ قابل اطمینان فرض می‌شوند. مدت زمان لازم برای مکان‌یابی خطا و عملکرد ادوات کلیدزنی نیز ۳ ساعت در نظر گرفته شده است.

فرض بر این است که مطالعات در حوزه پدافند غیرعامل روی این شبکه انجام گرفته و بارهای این شبکه از دیدگاه پدافند غیرعامل به چهار گروه بارهای حیاتی، بارهای حساس، بارهای مهم و بارهای بی‌ارزش تقسیم‌بندی شده‌اند. برای اینکه اولویت کاهش میزان خاموشی این بارها در نظر گرفته شود، هزینه انرژی تأمین‌نشده برای این چهار نوع بار به ترتیب برابر با ۱۰۰۰۰ $/kWh، ۲۵۰۰ $/kWh، ۵۰۰ $/kWh و ۰ $/kWh انتخاب می‌شود. یعنی ارزش بارهای حیاتی را ۴ برابر بارهای حساس و ۲۰ برابر بارهای مهم در نظر می‌گیریم. برای این شبکه شین‌های شماره ۲۵ و ۳۱ به‌عنوان بار حیاتی، شین‌های شماره ۷، ۸ و ۲۹ به‌عنوان بار حساس و شین‌های شماره ۱۴، ۲۸ و ۳۳ به‌عنوان بار مهم در نظر گرفته می‌شوند. بقیه شین‌های شبکه از نظر ملاحظات پدافند غیرعامل ارزشی ندارند.

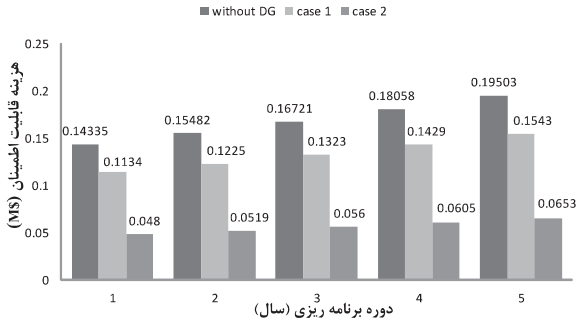
برای این شبکه در دو حالت مسئله را حل خواهیم کرد. در

حالت اول، قید مربوط به محدودیت نفوذ منابع تولید پراکنده را در نظر خواهیم گرفت. در حالت دوم، بدون در نظر گرفتن این محدودیت مسئله را حل خواهیم کرد. در واقع حالت دوم نشان‌دهنده حالتی است که منابع تولید پراکنده در حالت عملکرد عادی به شبکه متصل نبوده و در حالت خرابی و قطع انرژی از سمت پست شبکه توزیع برای تأمین بار مشترکین به شبکه متصل می‌شوند.

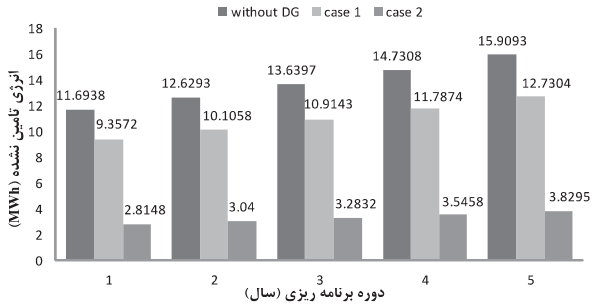
در جداول (۲) و (۳) نتایج حاصل از حل مسئله در دو حالت مختلف نشان داده شده است. همانطور که از این جداول مشاهده می‌شود، در حالت دوم، منابع تولید پراکنده با ظرفیت بیشتری در شبکه نصب می‌شوند، چراکه در این حالت، قید مربوط به حداکثر نفوذ این واحدها (رابطه (۵)) درنظر گرفته نشده است. در واقع در حالت دوم به دنبال استفاده از مزیت منابع تولید پراکنده در تأمین بار مشترکین در حالت‌های قطعی و خطا بوده و از سایر مزایای این واحدها نظیر بهبود پروفیل ولتاژ یا کاهش تلفات صرف نظر شده است.

در شکل (۵) هزینه قابلیت‌اطمینان شبکه در سه حالت مختلف در سال‌های مختلف دوره برنامه‌ریزی مورد مقایسه قرار گرفته شده است. همان‌طور که از این شکل برمی‌آید حضور منابع تولید پراکنده، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی قابلیت‌اطمینان شبکه توزیع دارد. در واقع، قابلیت‌اطمینان شبکه توزیع با درنظر گرفتن منابع تولید پراکنده بهبود می‌یابد. در حالتی که قید مربوط به نفوذ منابع تولید پراکنده در نظر گرفته نشود یعنی حالت دوم، ظرفیت منابع تولید پراکنده در شبکه بیشتر شده و در نتیجه، کاهش بیشتری روی هزینه قابلیت‌اطمینان رخ داده و افزایش در میزان قابلیت‌اطمینان شبکه بیشتر است. در واقع می‌توان گفت که در این حالت، میزان مشارکت منابع تولید پراکنده در تأمین انرژی بارهای حیاتی، حساس و مهم بیشتر شده و کاهش بیشتری در مدت زمان خاموشی این بارها حاصل می‌شود.

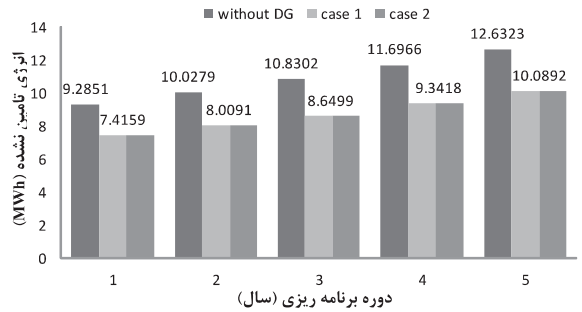
در شکل‌های (۶)-(۸) مقدار انرژی تأمین‌نشده برای بارهای حیاتی، حساس و مهم شبکه در طول سال‌های برنامه‌ریزی، در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. با مشاهده این شکل‌ها می‌توان دریافت که بیشترین تأثیر حضور منابع تولید پراکنده، روی مقدار انرژی تأمین‌نشده بارهای حیاتی شبکه است، چرا که ارزش این بارها خیلی بیشتر از سایر بارها در پروسه برنامه‌ریزی لحاظ شده است.



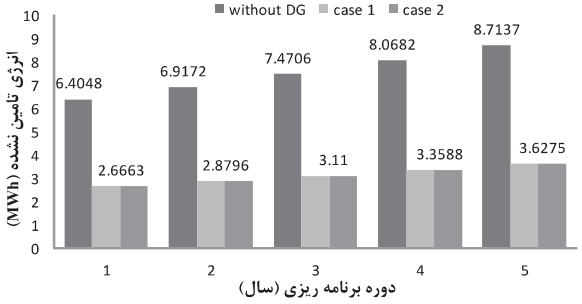
شکل ۵- مقایسه هزینه قابلیت‌اطمینان شبکه مورد مطالعه در حالت‌های مختلف



شکل ۶- مقایسه انرژی تأمین نشده بارهای حیاتی در حالت‌های مختلف



شکل ۷- مقایسه انرژی تأمین نشده بارهای حساس در حالت‌های مختلف



شکل ۸- مقایسه انرژی تأمین نشده بارهای مهم در حالت‌های مختلف

جدول ۳- نتایج برنامه‌ریزی شبکه مورد مطالعه در حالت اول- ظرفیت (MW) و ضریب توان منابع تولید پراکنده

	شین‌های کاندید نصب منابع تولید پراکنده						
	شین ۵	شین ۳۳	شین ۳۴	شین ۳۵	شین ۳۶	شین ۳۷	شین ۳۸
سال ۱	۰	۰/۱	۰/۵	۰	۰/۷	۰/۱	۰
سال ۲	۰	۱/۱	۰/۵	۰	۰/۷	۰/۲	۰/۱
سال ۳	۰	۱/۲	۰/۵	۰	۰/۸	۰/۲	۰/۱
سال ۴	۰	۱/۳	۰/۵	۰	۰/۹	۰/۲	۰/۱
سال ۵	۰	۱/۴	۰/۵	۰/۱	۰/۹	۰/۲	۰/۱
ضریب توان	-	۰/۹۵	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹

جدول ۴- نتایج برنامه‌ریزی شبکه مورد مطالعه در حالت دوم- ظرفیت (MW) و ضریب توان منابع تولید پراکنده

	شین‌های کاندید نصب منابع تولید پراکنده						
	شین ۵	شین ۳۳	شین ۳۴	شین ۳۵	شین ۳۶	شین ۳۷	شین ۳۸
سال ۱	۰/۲	۱/۵	۰/۳	۰	۱/۰	۰	۱/۶
سال ۲	۰/۳	۱/۹	۰/۴	۰/۳	۱/۰	۰	۱/۷
سال ۳	۰/۸	۱/۹	۰/۵	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۷
سال ۴	۰/۸	۱/۹	۰/۷	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۷
سال ۵	۰/۸	۱/۹	۰/۱	۱/۱	۱/۰	۰	۱/۷
ضریب توان	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹	۰/۹	۱/۰	-	۰/۹

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی جدید برای برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع برق در یک افق چند ساله با درنظر گرفتن ملاحظات پدافند غیرعامل ارائه شد. در مدل پیشنهادی، منابع تولید پراکنده به‌عنوان پشتیبان برای تأمین انرژیِ مراکز حیاتی، حساس و مهم نظامی و غیرنظامی کشور در شرایط وقوع بحران مطرح شدند. مدل برنامه‌ریزی به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطرح شده و از الگوریتم جستجوی هارمونی برای حل آن استفاده گردید. مدل پیشنهادی با هدف کمینه‌کردن مقدار انرژی تأمین‌نشده در شرایط وقوع خطا به‌دنبال تخصیص بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه است.

متغیرهای مسئله شامل مکان، ظرفیت و ضریب توان نصب منابع تولید پراکنده می‌باشند. متغیر دیگر، مسئله بهترین زمان نصب این منابع در شبکه است که با استفاده از روش شبه‌پویا به‌دست می‌آید. مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی یک شبکه توزیع ۳۸ شینه مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت. مشاهده گردید که پس از نصب منابع تولید پراکنده، میزان انرژی تأمین‌نشده بارهای حیاتی، حساس و مهم کاهش یافته و شاخص‌های قابلیت‌اطمینان شبکه، افزایش چشمگیری نسبت به حالت قبل از نصب این منابع دارد. در واقع نتایج حاصل نشان‌دهنده تأثیر حضور این منابع و کاهش مدت‌زمان خاموشی و در نتیجه، به‌حداقل رساندن آسیب وارده به این مراکز است.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت که دستاورد اصلی این مقاله، ایمن‌سازی مراکز حیاتی، حساس و مهم کشور در شرایط وقوع تهدید، بحران و جنگ از طریق تداوم برق‌رسانی به این مراکز به‌عنوان یکی از چشم‌اندازهای پدافند غیرعامل می‌باشد. این امر موجب تداوم فعالیت‌های زیربنایی و تامین نیازهای حیاتی کشور در شرایط بحران می‌گردد.

مراجع

۱. اعلمی، حبیب‌الله، رمضانی ورزنه، هادی؛ "ارائه الگوریتمی به‌منظور بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده در هنگام بروز بحران در شبکه برق سراسری؛ مجله علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل، شماره۳، ص ۲۳۱-۲۴۱، (۱۳۹۱).

۲. گوهری‌پور،حامد؛ "شناخت تنوع کاربردهای حیاتی، حساس و مهم موجود در کلان‌شهرهای کشور از دیدگاه پدافند غیرعامل؛ دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، (۱۳۹۱).

3. Abu-Mouti, Fahad. S. and El-Hawary, M. E.; "Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm"; IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, pp. 2090-2101, **(2011)**.

4. El-Zonkoly, A. M; "Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimisation"; IET Gener. Transm. Distrib, vol. 5, pp. 760-771, **(2011)**.

5. Khalesi, N., Rezaei, N., Haghifam, M. R.; "DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement"; Electrical Power and Energy Systems, vol. 33, pp. 288–295, **(2011)**.

6. Borges, C. L. T. and Falcao D. M.; "Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement"; Electrical Power and Energy Systems, vol. 28 pp. 413-420, **(2006)**.

7. Singh, Deependra., Singh, Devender., and Verma, K. S.; "Multiobjective Optimization for DG Planning With Load Models"; IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, pp. 427-436, **(2009)**.

8. Lee, K. and Geem, Z.; "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice"; Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, vol. 194, pp. 3902–3933, **(2005)**.

9. Shaaban, M. F., Atwa,Y. M., and El-Saadany, E. F.; "DG Allocation for Benefit Maximization in Distribution Networks"; IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 639 - 649, **(2013)**.

10. Singh, Devendra., Misra, R. K., and Singh, Deependra.; "Effect of Load Models in Distributed Generation Planning"; IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, pp. 2204-2212, **(2007)**.

11. Ebrahimi, R., Ehsan, M., and Nouri, H.; "A profit-centric strategy for distributed generation planning considering time varying voltage dependent load demand"; Electrical Power and Energy Systems, vol. 44 pp. 168-178, **(2013)**.

12. Kersting, W. H.; Distribution system modeling and analysis; New York: CRC Press LLC, **(2002)**.

13. Naderi, Ehsan., Seifi, Hossein., and Sepasian, Mohammad. S.; "A Dynamic Approach for Distribution System Planning Considering Distributed Generation"; IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, pp. 1313-1322, **(2012)**.

14. Ramirez-Rosado, I. J. and Giinen, T.; "Pseudo-dynamic planning for expansion of power distribution systems"; IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, pp. 245-254, **(1991)**.