

کاهش احتمال خاموشی مناطق حساس نظامی با تغییر پیکربندی شبکه توزیع هنگام حمله با بمب گرافیتی

روزبه کمالی^{۱*}، نیک بخش حبیبی^۲، میلاد رحیمی پور بهبهانی^۳

۱ و ۲- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۷/۰۷/۱۵، پذیرش: ۹۸/۰۲/۲۵)

چکیده

امروزه حملات به زیرساخت‌های صنعت برق از طریق بمب گرافیتی بسیار محتمل است. با ایمن کردن شبکه برق، می‌توان میزان خسارات به شبکه را حداقل گرداند. یکی از روش‌هایی که می‌توان در شبکه برق ایران اجرا کرد؛ تغییر پیکربندی یا بازآرایی در شبکه توزیع است. بازآرایی در واقع عمل تغییر آرایش شبکه با استفاده از تغییر وضعیت کلیدهای عادی باز و عادی بسته شبکه است. در این مقاله از بازآرایی شبکه توزیع به منظور کاهش احتمال خاموشی مناطق حساس نظامی هنگام حمله با بمب گرافیتی استفاده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، الگوریتم ازدحام ذرات گسسته و شبکه مورد مطالعه، شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE است. نتایج نشان می‌دهد که بازآرایی می‌تواند احتمال خاموشی و آسیب مناطق نظامی را هنگام حمله با بمب گرافیتی به طور محسوسی کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: بمب گرافیتی، شبکه توزیع، تغییر پیکربندی (بازآرایی)، پدافند غیرعامل

Reduction the Blackout Possibility of Sensitive Areas by Reconfiguration of Distribution Network During Graphite Bomb Attacks

R. Kamali, N. Habibi, M. Rahimi Pour Behbahani

Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering

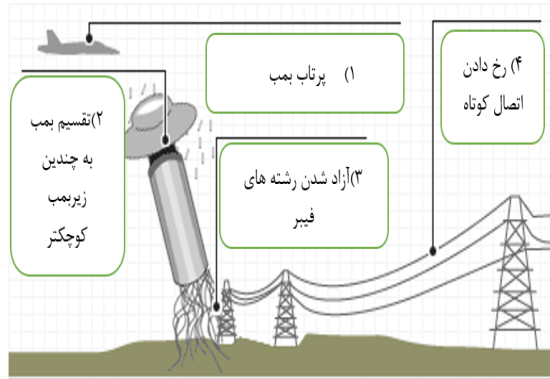
(Received: 07/10/2018; Accepted: 15/05/2019)

Abstract

Today, the attacks on the infrastructures of the electricity industry by Graphite bomb are very likely. By securing the power grid, the damages can be minimized. One of the ways that can be implemented in Iran's power grid is the reconfiguration of the distribution network. Reconfiguration is actually a change in distribution network arrangement by changing the state of the normally open and normally close switches. In this paper, the reconfiguration of the distribution network is used to reduce the possibility of blackout in sensitive areas of the military sites during a Graphite bomb attacks. The used optimization algorithm, is the discrete particle swarm algorithm and the network under study, is the 69-buses IEEE network. The results show that reconfiguration can significantly reduce the possibility of blackout and damage to military areas during Graphite bomb attacks.

Keywords: Graphite Bomb, Distribution Network, Reconfiguration, Passive Defence

می‌تواند موجب خسارات چشم‌گیری به صنعت برق و کشور گردد [۶ و ۷]؛ از این رو، ایمن کردن شبکه پیش از رخ دادن خطا، بسیار حیاتی است. این ایمن کردن پدافند غیرعامل نامیده می‌شود.



شکل ۱. نحوه عملکرد بمب گرافیتی [۸]

پدافند غیرعامل در واقع کاهش خسارات مالی و صدمات جانی وارده بر افراد غیرنظامی در جنگ یا در اثر حوادث طبیعی نظیر سیل، زلزله، طوفان، آتش‌فشان، آتش‌سوزی و خشک‌سالی است [۹].

روش‌های مختلفی جهت انجام پدافند غیرعامل در صنعت برق وجود دارد [۱۰ و ۱۱]. در زمینه خنثی کردن اثر بمب‌های گرافیتی هم روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان به ایزولاسیون بدنه ساختمان و اتاق‌های کنترل، استفاده از فیلتر الکترواستاتیکی و استفاده از عایق اسپری نام برد. این روش‌ها با وجود داشتن کارایی اما به دلیل داشتن هزینه‌های اضافی بر صنعت برق چندان مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

در این بین، یکی از روش‌های مؤثر که می‌تواند میزان خسارات ناشی از حملات احتمالی را با کمترین هزینه حداقل کند، بازآرایی در شبکه توزیع است. بازآرایی در واقع عمل تغییر آرایش شبکه با استفاده از تغییر وضعیت کلیدهای عادی باز (Tie Switch) و کلیدهای عادی بسته شبکه (Sectionalizer Switch) به منظور رسیدن به هدفی خاص که به طور معمول کاهش تلفات است، انجام می‌گیرد [۱۲].

از آنجاکه محل اصابت بمب‌های گرافیتی چندان قابل پیش‌بینی نیستند، تغییر آرایش شبکه به گونه‌ای که در صورت انجام حملات تروریستی به هر کدام از شین‌ها یا خطوط ممکن، کمترین آسیب به شین‌های حساس شبکه وارد آید، می‌تواند بسیار راهگشا باشد. از این رو در این مقاله، تغییر آرایش شبکه به منظور حداقل کردن میزان افت ولتاژ شین‌های حساس و نظامی در هنگام حمله با بمب‌های گرافیتی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله، ابتدا مدل‌سازی حمله با بمب گرافیتی انجام

۱. مقدمه

امروزه حملات تروریستی علاوه بر حمله به جان انسان‌ها، حمله به تأسیسات نظامی و اقتصادی را هم شامل می‌شوند. از آنجاکه تأسیسات نظامی بدون برق می‌توانند دچار مشکل شوند و علاوه بر خسارات اقتصادی، در مقابل سایر حملات احتمالی نیز، آسیب‌پذیرتر می‌گردند؛ تروریست‌ها در سال‌های اخیر، یکی از اهداف خود را حمله به تأسیسات برقی قرار داده‌اند [۱].

یکی از روش‌های حمله به تأسیسات برق که اخیراً مورد استفاده قرار گرفته است؛ استفاده از بمب گرافیتی است. بمب‌های گرافیتی در زمره بمب‌های نرم و تسلیحات غیر کشنده طبقه‌بندی می‌شوند. این بمب‌ها برای کار انداختن نیروگاه‌ها و تأسیسات برقی بدون ایجاد صدمات عمرانی ناشی از مواد منفجره طراحی شده‌اند. در سال ۱۹۸۰ میلادی در یک تمرین نظامی مربوط به نیروی دریایی آمریکا این الیاف موجب قطع تصادفی برق و خاموشی در منطقه مورد عملیات شدند، این اتفاق غیرمنتظره منجر به بررسی و توسعه این نوع سلاح گردید. در جنگ کوزوو ارتش آمریکا برای اولین بار از این بمب استفاده کرد و با یک حمله دوسوم خاک یوگسلاوی را در خاموشی فروبرد. در جنگ عراق نیز ارتش آمریکا برای بار دوم این بمب را مورد استفاده قرار داد. اگرچه این بمب ابتدا اثر تخریبی ندارد، اما با قطع کردن جریان برق، می‌تواند به تأسیسات نظامی حساس منطقه آسیب برساند. در این بمب‌ها اغلب از گرافیت که نوعی زغال سنگ نرم است؛ استفاده شده است [۲]. لازم به ذکر است که بمب گرافیتی، اثرات نامطلوبی روی انسان نداشته و نوعی مهمات هوا به زمین است که هدف آن غیرعملیاتی کردن ژنراتورهای برق و خطوط انتقال و توزیع است [۳].

مهم‌ترین ویژگی گرافیت رسانایی قوی آن است و به همین دلیل از گرافیت برای ساخت بمب گرافیتی استفاده شده است. مطابق شکل (۱)، پس از انفجار، گرافیت که بیشتر از جنس کربن است با مواد حلال کربن ترکیب شده و به صورت بخار درمی‌آید. این بخار سنگین بوده و بر روی خطوط توزیع و انتقال و همچنین نیروگاه‌ها می‌نشیند. این امر، باعث اتصال کوتاه در خطوط و ایجاد قطعی در خط یا نیروگاه می‌شود. این قطعی می‌تواند باعث ایجاد خاموشی‌های بیشتر و خاموشی سرتاسری شبکه برق گردد [۴]. اگرچه در موارد محدود استفاده شده از بمب گرافیتی این حملات در خطوط انتقال و در سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت انجام شده است اما به دلیل عایق‌بندی کمتر و ارتفاع کمتر نسبت به زمین در خطوط فوق توزیع، امکان استفاده از این بمب‌ها در خطوط فوق توزیع نیز در آینده وجود دارد. به عبارت دیگر هر بخش از سیستم قدرت می‌تواند تحت تأثیر حمله با این بمب‌ها قرار بگیرد [۵]. لازم به ذکر است که حتی انجام یک حمله با بمب گرافیتی نیز

(Function) و متعاقباً حداکثر شدن $Index$ نشان‌دهنده شرایط مطلوب‌تر برای شبکه مورد مطالعه است.

$$OF = \left(\frac{1}{Index} \right) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{PCC}} V_i} \right) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{PCC}} \left(\frac{Z_{ij} + Z_f}{Z_s + Z_{ij} + Z_f} \right)} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V_i ولتاژ شین حساس i و N_{PCC} تعداد شین‌های حساس شبکه که در اینجا ۵ شین ۲۲ و ۴۰ و ۴۵ و ۵۷ و ۶۴ فرض شده است. همچنین در رابطه (۱)، Z_{ij} امپدانس بین شین i و محل خطای Z_f نشان‌دهنده امپدانس خطا و Z_s نشان‌دهنده امپدانس منبع در شین i است. در واقع پراکنش کوچک‌تر در رابطه (۱) ولتاژ شین i در محل خطای Z_f نشان می‌دهد.

۲-۳. قیود

علاوه بر هدف بیان‌شده، قیدهایی نیز وجود دارند که در صورت نقض این قیود، آرایش حاصله از بازآرایی مورد تأیید ناست. در ادامه این قیود مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۳-۱. محدوده مجاز ولتاژ سیستم

ولتاژ شبکه در حالت عملکرد نرمال لازم است که در محدوده مجاز ۰/۹ تا ۱/۱ پریونیت قرار گیرد. رابطه (۲) نشان‌دهنده این قید برای تمام شین‌های شبکه است.

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad i \in N \quad (2)$$

در رابطه فوق، N نشان‌دهنده تعداد گره‌ها و V_i نشان‌دهنده ولتاژ شین i در حالت بهره‌برداری عادی شبکه است.

۲-۳-۲. محدوده مجاز جریان عبوری از خطوط

جریان عبوری از خطوط شبکه مورد مطالعه نباید از حد مجاز جریان عبوری کابل‌های خطوط شبکه توزیع بیشتر شود. به منظور لحاظ نمودن این قید از رابطه (۳) بهره گرفته شده است.

$$|I_l| \leq I_{imax} \quad l \in NL \quad (3)$$

در رابطه (۳)، NL نشان‌دهنده تعداد شاخه‌های شبکه است و $|I_l|$ جریان هر خط و I_{imax} حد مجاز جریان عبوری از خط l است.

شده است. سپس فرمول‌بندی تابع هدف و قیود مورد تحقیق در مقاله جهت استفاده در عمل بهینه‌سازی آورده شده و پس از آن، الگوریتم ازدحام ذرات گسسته به‌عنوان الگوریتم بهینه‌سازی به‌کاررفته در مقاله، شرح داده شده است. در پایان و با تحلیل و بررسی نتایج، مشخص شده است که بازآرایی می‌تواند احتمال خاموشی در شین‌های حساس و نظامی را هنگام حمله با بمب گرافیتی به حداقل مقدار خود برساند.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مدل‌سازی حمله با بمب گرافیتی

در حمله با بمب گرافیتی، بستگی به نوع حمله و همچنین مکان فرود آمدن بمب مدل‌سازی‌های متفاوتی می‌تواند وجود داشته باشند. در این مقاله فرض شده است که پست‌های شبکه با استفاده از حس‌گرهای الکترومغناطیسی و حفاظت‌های لازم امکان وقوع حمله را از خود دفع می‌کنند. بنابراین، حمله به خطوط، به دلیل وسعت و عدم امکان جلوگیری کامل از حمله بررسی شده است.

در صورتی که حمله به یک خط تک فاز یا خطوط توزیع سه فاز انجام گیرد، می‌تواند به ترتیب به صورت خطای تک فاز به زمین و خطای سه فاز به زمین مدل شود. در این مقاله، حمله با بمب گرافیتی به صورت خطای سه فاز به زمین در خطوط مدل شده است. دلیل در نظر گرفتن خطای سه فاز شدیدتر بودن افت ولتاژ آن نسبت به خطای تک فاز است. این امر به این دلیل است که آرایشی که در مقابل خطای سه فاز مقاوم باشد؛ در مقابل خطای تک فاز نیز مقاوم هست. علاوه بر این، با توجه به تصادفی بودن محل وقوع خطا، فرض شده است که خطای سه فاز به زمین، در وسط خط اتفاق می‌افتد.

۲-۲. تابع هدف

به‌منظور بررسی اثر حملات تروریستی بر تأسیسات حساس شبکه، فرض شده است که ۵ تأسیس حساس از جمله مکان‌های نظامی، اماکن تسلیحاتی، بیمارستان و ... در شبکه مورد مطالعه وجود دارند. افت ولتاژ بیش از حد هر کدام از این تأسیسات هنگام حمله می‌تواند موجب قطع برق یا آسیب به این تأسیسات و عدم عملکرد درست این تأسیسات شود. از این‌رو در این مقاله، تابع هدف در نظر گرفته شده، مطابق رابطه (۱) فقط شامل ولتاژ شین‌های حساس نظامی شبکه پس از رخ دادن خطا است. به‌منظور این‌که در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، هدف از بهینه‌سازی باید حداقل سازی تابع هدف باشد، از معکوس کردن در رابطه (۱) استفاده شده است. بنابراین، حداقل شدن OF (Objective)

۳-۳-۲. قید شعاعی بودن آرایش

به منظور بررسی شعاعی بودن، ابتدا ماتریسی که تعداد سطرهای آن برابر تعداد شاخه‌ها و تعداد ستون‌های آن برابر تعداد گره‌ها است؛ تشکیل می‌شود. شرایط تشکیل این ماتریس بدین صورت است که اگر شاخه i به گره j متصل نباشد a_{ij} برابر صفر و اگر شاخه i از گره j خارج شود a_{ij} برابر ۱ و در غیر این صورت a_{ij} برابر ۰ می‌شود. پس از انتخاب شین موجود یک گره به عنوان گره مرجع انتخاب و ستون متناظر با گره مرجع حذف شده و ماتریس تلاقی A نامیده می‌شود. اکنون اگر درمیان A برابر با ۱ یا ۰ باشد؛ شبکه مورد بررسی شعاعی است.

۴-۳-۲. قید تغذیه شدن همه شین‌ها

در آرایش حاصله لازم است که همه شین‌ها تغذیه شوند یا به عبارت دیگر ولتاژ هیچ شینی در شرایط عادی کاری صفر نشود. این قید را می‌توان به صورت رابطه (۴) مدل کرد.

$$V_i \neq 0 \quad i \in N \quad (4)$$

که در رابطه فوق N نشان‌دهنده تعداد شین‌ها است.

۴-۲. الگوریتم ازدحام ذرات گسسته

الگوریتم ازدحام ذرات، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است که در آن در ابتدا جمعیتی تصادفی تولید شده و الگوریتم، مکان‌های بهینه را با تغییر این مقادیر تصادفی تولید می‌کند [۱۳]. این روش اولین بار توسط کندی و ابرهارت با الگو گرفتن از حرکت پرندگان پیشنهاد شد [۱۴]. الگوریتم ازدحام ذرات شامل گروهی از ذرات است که هر کدام از ذرات، در فضایی چندبعدی با استفاده از یک سرعت مشخص قرار می‌گیرند. سرعت ذرات، با استفاده از موقعیت بهترین ذره در کل و همچنین بهترین موقعیت همان ذره در تکرارهای قبل، به روز می‌شود [۱۳].

در یک فضای n بعدی، موقعیت و سرعت i مین ذره به ترتیب با استفاده از روابط (۵-۶) به دست می‌آید [۱۳].

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (5)$$

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}) \quad (6)$$

بهترین موقعیت هر ذره در ماتریسی به نام $Pbest_i$ به صورت رابطه (۷) ذخیره می‌شود؛ و بهترین موقعیت هر ذره در کل در ماتریسی به نام $Gbest_i$ در رابطه (۸) ذخیره می‌شود.

$$Pbest_i = (Pbest_{i1}, Pbest_{i2}, \dots, Pbest_{in}) \quad (7)$$

$$Gbest_i = (Gbest_{i1}, Gbest_{i2}, \dots, Gbest_{in}) \quad (8)$$

سرعت هر ذره با توجه به بهترین موقعیت همان ذره در تکرارهای قبل و بهترین موقعیت در بین همه ذرات با استفاده از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$V_i^{k+1} = W(V_i^k) + C_1 rand_1 \times (Pbest_i^k - X_i^k) + C_2 rand_2 \times (Gbest^k - X_i^k) \quad (9)$$

عدد C_1 و C_2 ضرایبی هستند که با استفاده از سعی و خطا تعیین می‌شوند. در این مقاله مقادیر C_1 و C_2 به ترتیب در ۲/۱ و ۱/۹ تنظیم شده‌اند. این ضرایب سرعت ذرات را به سمت بهترین مقدار آن ذره و بهترین مقدار کل ذرات سوق می‌دهند. همچنین بردار سرعت ذره i در تکرار k و $rand_1$ و $rand_2$ اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند؛ وجود این دو تابع باعث می‌شود که الگوریتم با وجود اینکه بر طبق قوانین موجود، به دنبال بهینه محلی باشد، مقداری هم عملکرد تصادفی یابد تا سایر بهینه‌های موجود در تابع هدف را هم بتواند مورد ارزیابی قرار دهد. همچنین در رابطه (۹)، W از (۱۰) به دست می‌آید [۱۳].

$$W = W_{max} - \left(\frac{W_{max} - W_{min}}{It_{max}} \right) \times It \quad (10)$$

در (۱۰) W_{max} برابر با ۱، W_{min} برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است. It_{max} حداکثر تکرارهای تعیین شده و It برابر با تکراری است که در آن W محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که W در هر تکرار باید محاسبه و به روزرسانی شود. این به روزرسانی به گونه‌ای هست که در تکرارهای آخر مقدار W نزدیک به ۰/۵ گردد.

موقعیت ذره جدید، با استفاده از موقعیت قبلی و سرعت به دست آمده برای آن ذره مطابق رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$X_i^{k+1} = \text{round}(X_i^k + V_i^{k+1}) \quad (11)$$

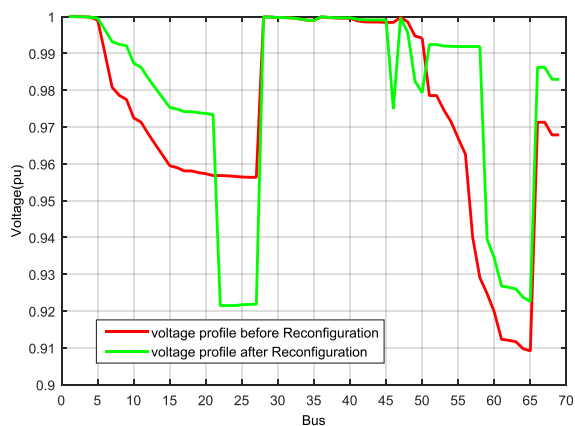
این روند تا تمام شدن تعداد تکرار تعیین شده ادامه می‌یابد.

۳. نتایج و بحث

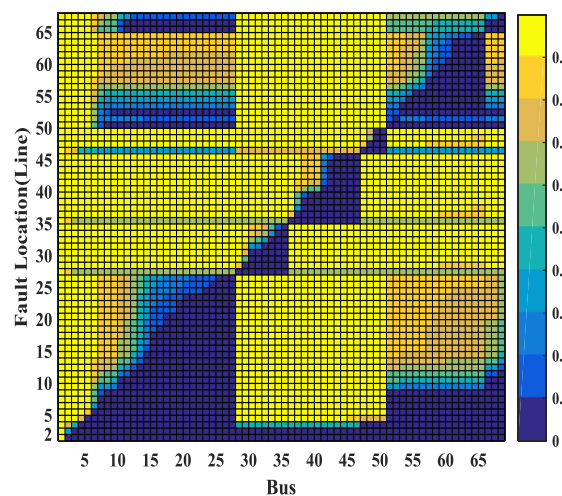
شبکه مورد مطالعه در این مقاله شبکه ۶۹ باسه استاندارد توزیع IEEE استفاده شده است. این شبکه دارای سطح ولتاژ ۱۲/۶۶ کیلوولت و دارای ۶۸ خط عادی بسته و ۵ خط عادی باز است. خطوط عادی باز شامل خطوط ۶۹ تا ۷۳ این شبکه هستند. شبکه مورد مطالعه دارای توان اکتیو ۳۸۰۲ کیلووات و توان راکتیو ۲۶۹۵ کیلووات است [۱۵]. بلوک دیاگرام شبکه مورداستفاده مطابق شکل (۲) است [۱۶].

۶۰ مطالعه شود؛ لازم است مربع مربوط به ۶۰ عمودی و ۳۰ افقی انتخاب و با توجه به رنگ آن، محدوده ولتاژ شین ۳۰ پس از رخ دادن خطا مشخص گردد. با دقت در شکل (۴) مشخص می‌گردد که وضعیت ولتاژ شین ۳۰ پس از رخ دادن خطا در خط ۶۰، وضعیت عادی یا همان بالاتر از ۹/۹ پر یونیت است.

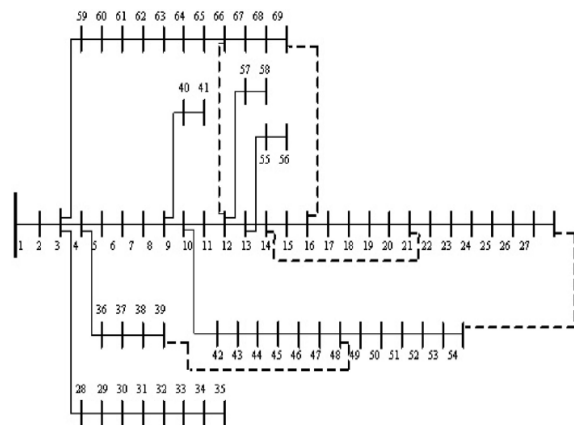
شکل (۵) نیز نشان‌دهنده همین وضعیت ولتاژ شین‌ها پس از رخ دادن حمله در ۵۰ درصد خطوط شبکه اما در آرایش بهینه از نظر نظامی است. لازم به ذکر است که در خطوط باز شبکه، اگر حمله‌ای هم رخ دهد به دلیل باز بودن خط، تأثیری در وضعیت ولتاژ شین‌ها ندارد. به همین دلیل ردیف مربوط به خطوط باز شبکه به صورت سفید رنگ درآمده است. از مقایسه این دو شکل نیز، اثر بازآرایی در بهبود ولتاژ شین‌ها بعد از خطا مشخص می‌گردد. همان‌طور که مشخص است، تعداد نقاط آبی رنگ که در واقع وضعیت نامناسب را هنگام خطا نشان می‌دهند در آرایش بهینه کاهش محسوسی داشته است.



شکل ۳. پروفیل ولتاژ شبکه پیش و بعد از بازآرایی



شکل ۴. وضعیت ولتاژ تأسیسات حساس پس از رخ دادن حمله در کلیه خطوط ممکن در حالت پایه

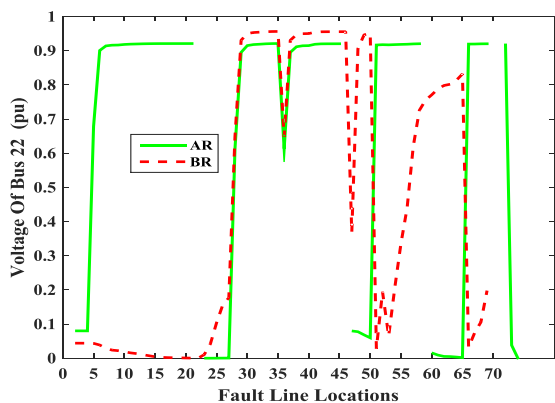


شکل ۲. بلوک دیاگرام شبکه ۶۹ شینه استاندارد مورد استفاده [۱۶]، شین‌های حساس نظامی (۲۲ و ۴۰ و ۴۵ و ۵۷ و ۶۴)

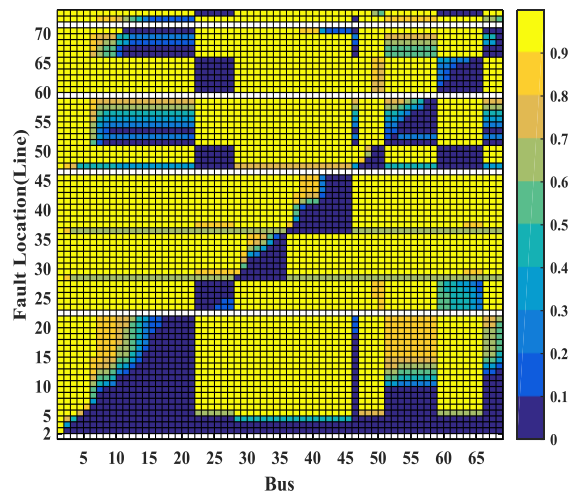
جدول (۱)، آرایش ابتدایی و بهینه شبکه باهدف مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، با انجام بازآرایی ولتاژ شین‌های حساس نظامی هنگام وقوع حمله، بهبود چشم‌گیری پیدا می‌کند. این امر می‌تواند مانع از خاموشی برخی تأسیسات حساس نظامی هنگام حملات شود. همان‌طور که از جدول مشخص است، با انجام بازآرایی علاوه بر بهبود وضعیت شبکه بعد از خطا، تلفات پایه شبکه نیز قبل از انجام هرگونه حمله‌ای کاهش یافته است. این امر خود نیز می‌تواند باعث کاهش هزینه برق مصرفی توسط بهره‌بردار قبل از حمله شود. بعد از حمله نیز، از آنجاکه آرایش پیشنهادی وضعیت بهتری در ولتاژ شین‌های حساس دارد؛ احتمال خاموشی تأسیسات حساس نظامی کاهش یافته و در نتیجه امکان آسیب به این تأسیسات به حداقل مقدار خود می‌رسد. شکل (۳) پروفیل ولتاژ شبکه را قبل از رخ دادن هرگونه حمله‌ای برای شرایط کار عادی شبکه نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل نیز مشخص است، پروفیل ولتاژ شبکه با انجام بازآرایی باهدف کاهش احتمال خاموشی مورد تحقیق در این مقاله، نیز به‌طور نسبی بهبود داشته است. البته لازم به ذکر است که به دلیل اینکه تابع هدف مورد مطالعه بهبود ولتاژ شین‌های حساس نظامی شبکه بعد از خطا است؛ لزومی به بهبود ولتاژ همه‌ی شین‌ها در حالت عادی کاری شبکه بعد از بازآرایی ناست و ممکن است بعضی شین‌ها ولتاژ بدتری بعد از بازآرایی را در حالت عادی تجربه کنند اما در هنگام رخ دادن خطا ولتاژ مناسبی را داشته باشند.

شکل (۴) نشان‌دهنده وضعیت ولتاژ تمام شین‌های شبکه، پس از رخ دادن حمله در خطوط ۲ تا ۷۰ در آرایش پایه شبکه است. این شکل در واقع آنالیز کاملی را از وضعیت شبکه پس از رخ داده خطا نشان می‌دهد، به‌عنوان مثال در صورتی که لازم باشد، وضعیت ولتاژ شین ۳۰ پس از رخ دادن خطا در ۵۰ درصد خط

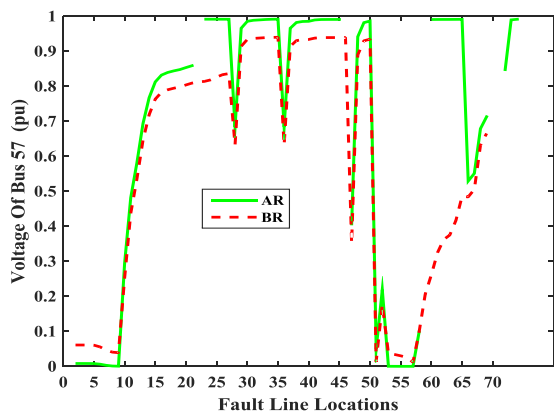
به ذکر است که در بین ۵ منطقه نظامی مورد مطالعه، نیز شین‌های ۴۰ و ۴۵ به دلیل کمترین احتمال آسیب، بهترین مکان برای تجهیزات نظامی هستند. شکل (۸)، بهترین وضعیت تابع هدف در تکرارهای مختلف بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. این نمودار خود نشان‌دهنده کارایی مؤثر الگوریتم بهینه‌سازی انتخاب‌شده در همگرایی ذرات است. همان‌طور که از نمودار مشخص است؛ از تکرار ۱۰ به بعد مقدار بهینه تغییری نداشته که این خود نشان‌دهنده سریع به جواب رسیدن الگوریتم است.



شکل ۵. وضعیت ولتاژ تأسیسات حساس پس از رخ دادن حمله در کلیه شین‌ها



شکل ۶. پروفیل ولتاژ منطقه نظامی ۲۲ هنگام حمله به خطوط مختلف شبکه



شکل ۷. پروفیل ولتاژ منطقه نظامی ۵۷ هنگام حمله به خطوط مختلف شبکه

شکل (۶)، پروفیل ولتاژ منطقه نظامی ۲۲، هنگام حمله به خطوط مختلف شبکه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، هنگام حمله به خطوط مختلف شبکه، پروفیل ولتاژ شبکه بهبود محسوسی پیدا می‌کند. این بهبود پروفیل ولتاژ برای رخ دادن خطا در خطوط ۵ تا ۲۳ کاملاً محسوس است. شکل (۷)، همین وضعیت پروفیل ولتاژ را برای منطقه نظامی ۵۷، هنگام حمله به خطوط مختلف شبکه نشان می‌دهد. در منطقه نظامی ۵۷ هم می‌توان مشاهده کرد که با انجام بازآرایی، منطقه در مقابل حملات دشمن ایمن‌تر شده و احتمال خاموشی کاهش محسوسی پیدا می‌کند.

جدول (۲)، تعداد شین‌های سالم مانده (مقدار ولتاژ بیشتر از ۰/۹) هنگام حمله در همه خطوط، برای تأسیسات نظامی را در دو حالت پایه و بهینه نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول مشخص است، بازآرایی با کاهش تعداد حالات ولتاژ با مقدار کمتر از ۰/۹، می‌تواند احتمال خاموشی تأسیسات نظامی را به‌طور محسوسی کاهش دهد. همان‌طور که مشخص است؛ در سطر میزان بهبود در احتمال عدم آسیب، بهبود قابل‌توجهی در احتمال عدم آسیب شین‌های نظامی شبکه رخ داده است. همچنین، لازم

جدول ۱. آرایش‌های به‌دست‌آمده از بازآرایی و وضعیت مناطق نظامی بعد از حمله

شاخص تلفات (kW)	شاخص ولتاژ (Index)	مجموع ولتاژ مکان‌های نظامی هنگام خطا روی همه خطوط در آرایش موردنظر (pu)					تعداد تغییر کلید	حداقل ولتاژ قبل از خطا (pu)	شاخص تابع هدف
		شین ۲۲	شین ۴۰	شین ۴۵	شین ۵۷	شین ۶۴			
۲۲۵/۰۰	۲۱۶/۳۶	۳۰/۰۷	۵۸/۲۹	۵۳/۶۱	۳۳/۸۸	۳۵/۵۱	-	حالت پایه	
۱۴۱/۴۰	۲۴۸/۵۳	۴۳/۷۹	۵۸/۴۷	۵۴/۶۴	۴۵/۷۶	۴۵/۸۸	۳	OF	

جدول ۲. مقایسه احتمال خاموشی و شین‌های کمتر از ۰/۹ در دو حالت پایه و بهینه

وقوع حمله در ۶۹ حالت (به تعداد خطوط باز آرایش)					شرایط حمله	شاخص
۶۴	۵۷	۴۵	۴۰	۲۲	منطقه نظامی وضعیت شبکه	
۱۵	۱۹	۲۰	۱۹	۱۵	پایه	تعداد حالت با ولتاژ بیشتر از ۰/۹
۴۳	۳۲	۵۳	۵۳	۴۳	بهینه	
%۲۱/۷	%۲۷/۵	%۲۹/۰	%۲۷/۵	%۲۱/۷	پایه	احتمال عدم آسیب (وقوع ولتاژ بیشتر از ۰/۹) (درصد)
%۶۲/۳	%۴۶/۳	%۷۷/۸	%۷۷/۸	%۶۲/۳	بهینه	
%۴۰/۶	%۱۸/۸	%۴۸/۸	%۵۰/۳	%۴۰/۶	-	میزان بهبود در احتمال عدم آسیب (درصد)

[3] Fang, W.; Shunshan, F.; Wenxuan, W.; Fuwang, L. "Analysis of Action Mechanism of Graphite Bombs and Reaction Method of Power System"; Power Syst. Technol. (POWERCON) 2010, 1-6.

[4] Zamani, H.; Aalami, H. A. "Presentation of Tehran Power System Islanding Plan to Avoiding Blackout due to Graphite Bombardment"; Adv. Defence Sci. Technol. 2017, 8, 361-372.

[5] Jeler, J. E.; Roman, D. "The Grafite Bomb: an Overview of Its Basic Military Applications"; J. Review of the Air Force Academy, 2016.

[6] Rose, A.; Oladosu, G.; Liao, S. "Regional Economic Impacts of Terrorist Attacks on the Electric Power System of Los Angeles: A Computable General Disequilibrium Analysis"; Second Annual Symposium of the DHS Center for Risk and Economic Analysis of Terrorism Events, University of Southern California, Los Angeles, 2005.

[7] Enders, W.; Olson, E. "Measuring the Economic Costs of Terrorism"; The Oxford Handbook of the Economics of Peace and Conflict, 2012.

[8] <https://www.quora.com/>, 2016.

[9] Nooraie, H.; Rezaie, N.; Abbaspour, R. "Spatial Analysis of the Performance of Communication Network after an Earthquake Considering Passive Defence Aspect"; Adv. Defence Sci. Technol. 2011, 3, 151-160.

[10] Chen, G.; Dong, Z. Y.; Hill, D. J.; Xue, Y. S. "Exploring Reliable Strategies for Defending Power Systems Against Targeted Attacks"; IEEE Trans. Power Syst. 2011, 26, 1000-1009.

[11] Salmeron, J.; Wood, K.; Baldick, R. "Analysis of Electric Grid Security under Terrorist Threat"; IEEE Trans. Power Syst. 2004, 19, 905-912.

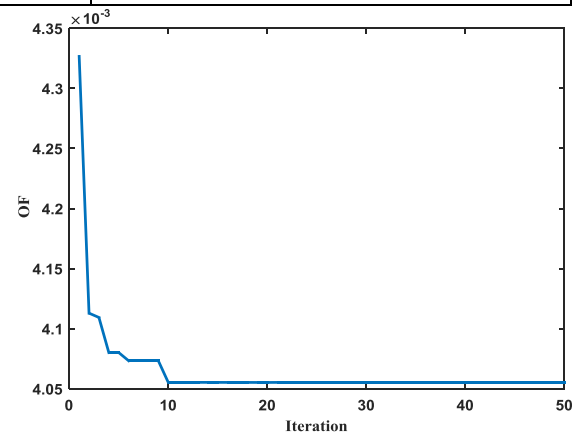
[12] Rao, R. S.; Ravindra, K.; Satish, K.; Narasimham, S. "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation"; IEEE Trans. Power Syst. 2013, 28, 317-325.

[13] Olamaei, J.; Niknam, T.; Gharehpetian, G. "Application of Particle Swarm Optimization for Distribution Feeder Reconfiguration Considering Distributed Generators"; Appl. Math. Comput. 2008, 201, 575-586.

[14] Kennedy, J.; Eberhart, R. C. "A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm"; IEEE Int. Conf. Computational Cybernetics and Simulation 1997, 4104-4108.

[15] Savier, J.; Das, D. "Impact of Network Reconfiguration on Loss Allocation of Radial Distribution Systems"; IEEE Trans. Power Del. 2007, 22, 2473-2480.

[16] Kavousi-Fard, A.; Niknam, T.; Fotuhi-Firuzabad, M. "A Novel Stochastic Framework Based on Cloud Theory and Teta-Modified Bat Algorithm to Solve the Distribution Feeder Reconfiguration"; IEEE Trans. Smart Grid 2016, 7, 822-830.



شکل ۸. بهترین نتیجه تابع هدف تعیین شده در هر تکرار

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، اثر حمله با بمب گرافیتی بر مناطق نظامی شبکه مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که مشخص گردید؛ بازآرایی می‌تواند هنگام حمله با بمب گرافیتی، احتمال خاموشی شین‌های حساس و نظامی را هنگام خطا در همه خطوط، کاهش محسوسی دهد. علاوه بر این مشخص گردید که وضعیت تلفات و پروفیل ولتاژ حالت بهینه شبکه هنگام بازآرایی با این هدف نسبت به حالت پایه، به‌طور محسوسی بهبود می‌یابد؛ که این امر به دلیل یکسو بودن سه تغییر، تلفات، پروفیل و فروافتادگی ولتاژ است. در پایان می‌توان نتیجه گرفت که بازآرایی یک روش کم‌هزینه برای کم کردن احتمال رخ دادن خاموشی در شین‌های نظامی و حساس است. روش بیان‌شده در این مقاله را می‌توان در شبکه‌های برق ایران، جهت محافظت از مراکز نظامی در مقابل حملات احتمالی تروریستی به‌کار برد.

۵. مراجع ها

[1] Council, N. R. "Terrorism and the Electric Power Delivery System"; National Academies Press, 2012.

[2] Ghaffarpour, R.; A. M. Ranjbar. "Presentation of Special Protection Scheme in Power System to Reduce Graphite Bomb Attacks Damages"; Adv. Defence Sci. Technol. 2017, 1, 33-44.