

ارائه طرحی برای کاهش خسارات ناشی از بمب‌های گرافیتی با در نظر گرفتن پایداری سیستم قدرت

رضا غفارپور^۱، سید رسول میرمطهری^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۳/۲۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین تهدیدات شبکه‌های برق، بمب‌های گرافیتی هستند. این بمب‌ها قادر هستند با ایجاد اتصال کوتاه، تعدادی از تجهیزات شبکه قدرت را از مدار خارج کنند. به دلیل اینکه شبکه‌ها معمولاً با استاندارد N-1 طراحی می‌شوند، خارج شدن تجهیزات از شبکه از نظر پایداری و کنترل، سیستم قدرت را دچار مشکل می‌نماید. در این مقاله ابتدا نحوه عملکرد بمب‌های گرافیتی توضیح داده شده است. سپس شرح مختصری از پایداری سیستم‌های قدرت ارائه شده و طرحی برای کاهش خسارات ناشی از حملات گرافیتی با در نظر گرفتن پایداری سیستم‌های قدرت ارائه گردیده است. روش ارائه شده، بر پایه تشخیص تهدید گرافیتی و قطع برنامه‌ریزی شده خطوط متصل به پست برای کاهش اثرات اغتشاش وارد شده به شبکه است. در نهایت، روش ارائه شده بر روی قسمتی از شبکه 39_Bus New England در نرم افزار DigSILENT شبیه‌سازی شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که طرح ارائه شده می‌تواند اثربخش باشد.

کلیدواژه‌ها: بمب گرافیتی، تهدید گرافیتی، پایداری سیستم قدرت، خطوط انتقال، اتصال کوتاه

۱- پژوهشگر دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل دانشگاه جامع امام حسین (ع) Reza.Ghaffarpour@ihu.ac.ir - نویسنده مسئول

۲- پژوهشگر دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۱- مقدمه

«گرافیت» رسانایی است که جزء آلوتروپ‌های عنصر کربن می‌باشد. این ماده کاربردهای وسیعی را در صنایع نظامی و غیر نظامی دارد. یکی از کاربردهای نظامی آن، تولید بمب گرافیتی^۱ است. این بمب‌ها قدرت تخریب ندارند و اصطلاحاً به آنها بمب‌های نرم نیز گفته می‌شود [۱].

هدف این بمب‌ها، بیشتر شبکه‌های قدرت هستند زیرا می‌توانند بدون ایجاد انفجار کارکرد عادی، شبکه‌های قدرت را مختل کنند. روش‌های مقابله با این بمب‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- اقدامات قبل از تماس گرافیت با تجهیزات شبکه
- اقدامات پس از تماس گرافیت با تجهیزات شبکه

در بخش ۲، خلاصه‌ای از این اقدامات ارائه شده است. هدف این مقاله، ارائه طرحی ساده برای شناسایی تهدید گرافیتی قبل از تماس با تجهیزات شبکه قدرت و سپس تجدید ساختار شبکه قدرت برای کمترین آسیب‌پذیری قبل از تماس گرافیت با تجهیزات است. این طرح ساده در بخش ۲ ارائه گردیده و روش تجدید ساختار شبکه قدرت نیز در بخش ۴ بیان شده است. پایه روش ارائه‌شده، قطع برق محل مورد حمله گرافیتی قبل از برخورد الیاف گرافیت به شبکه است.

شبیه‌سازی روش تجدید ساختار با استفاده از نرم‌افزار DigSILENT انجام گرفته و نتایج آن در بخش ۵ ارائه گردیده است.

۲- بمب‌های گرافیتی

بمب‌های گرافیتی تا کنون در دو نوع الیافی و پودری استفاده شده‌اند [۱] و تحقیقات نظامی برای یافتن مدل‌های دیگر در برخی کشورها در حال گسترش است. وقتی این بمب‌ها در حمله به یک پست یا نیروگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند، در ارتفاع مناسبی در هوا پخش می‌شوند و به آهستگی بر روی تجهیزات فرود می‌آیند. با فرود روی تجهیزات بین سطوح ولتاژ مختلف (خط به زمین یا خط به خط) اتصال کوتاه برقرار کرده و سیستم قدرت را دچار مشکل می‌کنند. به دلیل به هم پیوستگی سیستم، قدرت این اختلال می‌تواند گسترش پیدا کند و کل سیستم را مختل نماید. توضیحات مربوط به گسترش خطا در بخش ۳ ارائه شده است.

سابقه استفاده از این بمب‌ها به سال ۱۹۹۱ میلادی برمی‌گردد که تأسیسات برق عراق مورد حمله قرار گرفت و ۸۵٪ از شبکه برق عراق از کار افتاد. پس از آن در سال ۱۹۹۹ میلادی این بمب‌ها بر علیه یوگسلاوی سابق مورد استفاده قرار گرفت و در این کشور نیز باعث ۷ ساعت خاموشی در ۷۰٪ شبکه شد که نهایتاً منجر به شکست نیروهای نظامی این کشور گردید. آخرین بار در سال ۲۰۰۳ میلادی

نیروهای آمریکایی دوباره تجهیزات برقی عراق را مورد حمله گرافیتی قرار دادند که شبکه برق این کشور مختل شد و شکست عراق از آمریکا را سرعت بخشید [۱].

تا کنون راه‌های مختلفی برای مقابله با این بمب‌ها توسط محققان ارائه شده است که در ادامه به صورت خلاصه به آنها اشاره می‌شود [۱]:

- استفاده از سقف‌های فلزی یا توری یا پلاستیکی برای جلوگیری از تماس الیاف با تجهیزات
- استفاده از چتر برای جمع کردن گرافیت پخش شده در هوا
- استفاده از دمنده‌های قوی برای دور کردن پودر یا الیاف گرافیت از محل
- استفاده از فیلترهای الکترواستاتیک برای باردار کردن ذرات گرافیت و سپس جذب ذرات با استفاده از میدان‌های مغناطیسی
- آموزش تیم‌های ویژه برای پاکسازی محل پس از تماس الیاف گرافیت با تجهیزات.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در کشور، تیم‌های ویژه برای پاکسازی محل پس از تماس الیاف تشکیل شده‌اند. ذکر این نکته ضروری است که در صورت تماس الیاف با تجهیزات و ایجاد اتصال کوتاه، الیاف به تجهیزات جوش خواهند خورد و پس از آن، سیستم حفاظتی محل برخورد الیاف را از شبکه جدا خواهد کرد. در این صورت، هم پاکسازی محل بسیار مشکل می‌شود و هم اختلالی که در شبکه بوجود می‌آید ممکن است به سرعت گسترش یافته و از کنترل خارج شود.

۲-۱- ارائه طرحی برای تشخیص تهدید گرافیتی

اگر سیستمی طراحی شود که قبل از برخورد الیاف با شبکه وجود الیاف را در ارتفاع تشخیص دهد، زمان برای مقابله با حمله افزایش خواهد یافت و با تغییر آرایش شبکه می‌توان قبل از تماس الیاف، برق محل مورد حمله را قطع نمود. این کار دو مزیت خواهد داشت:

- ۱- قبل از برخورد الیاف به محل، برق قطع می‌شود و از ایجاد اتصال کوتاه و جوش خوردن الیاف به تجهیزات جلوگیری می‌شود و پاکسازی محل به سرعت و با هزینه کمتری قابل انجام است.
- ۲- با برخورد الیاف به شبکه، آرایش شبکه به دلیل قطع خطوط تغییر خواهد کرد و اغتشاش وارد شده به شبکه قابل پیش‌بینی نیست و ممکن است گسترش یابد، زیرا زمان قطع خطوط، بستگی به زمان برخورد الیاف به تجهیزات و تشخیص سیستم حفاظتی دارد. اما در صورت داشتن زمان کافی می‌توان شبکه را با برنامه قبلی تجدید ساختار نمود و احتمال گسترش اغتشاش در شبکه را کاهش داد.

هدف این مقاله، طراحی سیستم تشخیص تهدید گرافیتی نیست ولی برای تشخیص تهدید گرافیتی، سیستم بسیار ساده‌ای پیشنهاد شده

اجتماعی مختلف، بر اهمیت عملکرد صحیح این سیستم افزوده است. در یک نگاه ملی، شبکه برق از مهم‌ترین زیرساخت‌های کشور به حساب می‌آید و اختلال در آن ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته و به هم‌پیوستگی و گسترده‌گی این سیستم باعث می‌شود که به راحتی آسیب‌پذیر باشد. در یک نگاه سطحی و عامیانه، خاموش کردن کل شبکه منوط به آسیب دیدن کل تجهیزات شبکه است. در صورتی که این تصور غلط است. شبکه قدرت، مانند هر سیستمی دارای نقاط حساسی است که با آسیب دیدن آن نقاط، ممکن است عملکرد کل شبکه مختل شود. این نقاط از دید دشمن بهترین نقاط برای حملات گرافیتی هستند.

۳-۱- مروری بر پایداری سیستم‌های قدرت

سیستم‌های قدرت، شبیه اکثر سیستم‌های مهندسی، حالت‌های مختلف کارکرد پایدار را دارند [۳]. به طور مثال با احداث یک نیروگاه جدید، حالت جدیدی برای سیستم قدرت به وجود می‌آید و همینطور با قطع یک نیروگاه نیز حالت جدیدی برای سیستم قدرت به وجود خواهد آمد [۴-۶].

سیستم قدرت از یک حالت به حالت دیگر یک دوره گذرا را طی می‌کند. در

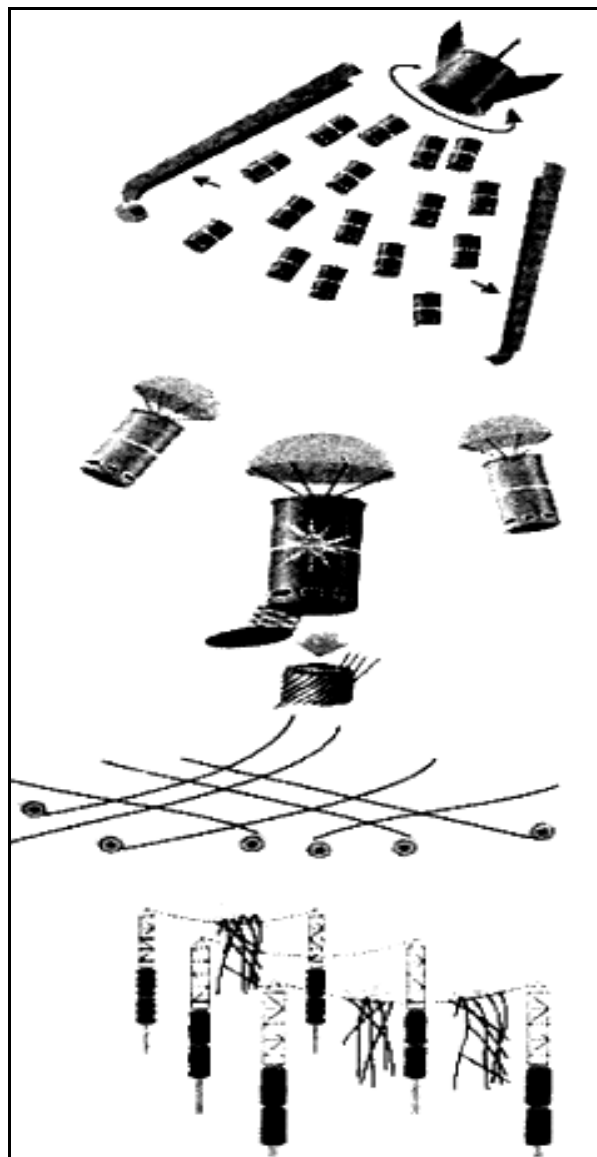
شکل (یک سیستم مکانیکی برای فهم بهتر پایداری ارائه گردیده است. گلوله با توجه به شکل می‌تواند در ۴ نقطه نشان‌داده شده به صورت پایدار بماند. اغتشاش را می‌توان به صورت نیرویی که در راستای افقی به گلوله وارد می‌شود نشان داد. با توجه به شکل، اگر اغتشاش وارد شده گلوله را به سمت چپ منحرف کند، گلوله حول نقطه ۱ مقداری نوسان کرده و در نهایت در نقطه ۱ خواهد ایستاد. بنابراین، سیستم از حالت ۲ به حالت ۱ پایداری خود را در نقطه جدید با گذشت زمان حفظ می‌نماید. ولی اگر با اغتشاش گلوله به سمت راست منحرف شود ممکن است از نقطه ۳ عبور کرده و در نقطه ۴ نیز نمی‌تواند متوقف شود. فرض کنید در شکل (۲)، گلوله در نقطه ۱ باشد؛ اگر نیروی وارد شده به گلوله کم باشد گلوله می‌تواند بعد از طی حالت گذرا دوباره به موقعیت قبلی خود برگشته و پایداری خود را حفظ نماید. اگر نیروی وارد شده زیاد باشد می‌تواند گلوله را به نقطه ۲ رسانده و از آنجا به ناپایداری کامل ببرد.

مفهوم پایداری در سیستم قدرت، شباهت‌هایی با سیستم ذکر شده دارد [۷، ۸]. خروج یا ورود هر تجهیز شبکه (خط انتقال، نیروگاه و...) یا اتصال کوتاه در شبکه مانند نیرویی است که به گلوله وارد می‌شود.

به طور کلی عواملی که می‌توانند در شبکه قدرت اغتشاش وارد کنند به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [۹]:

- وقوع اتصال کوتاه
- خروج خط انتقال برق از شبکه

است که طرح اولیه آن را می‌توان در یک جمله بیان نمود. اگر چند مقرر در ارتفاع مناسبی (حدود ۲۰ متر) با اختلاف ولتاژ مناسب قرار گیرند به طوری که الیاف در مسیر حرکت به پایین ابتدا با آنها تماس برقرار کنند، می‌توان از وجود الیاف در ارتفاع اطلاع پیدا کرد و تا رسیدن الیاف به پایین، اقدامات پیشگیرانه را در زمان طلایی (فاصله زمانی تشخیص تهدید گرافیتی تا برخورد الیاف با شبکه) انجام داد. این اقدامات پیشگیرانه شامل همه موارد ذکر شده در قسمت‌های قبل می‌تواند باشد.



شکل ۱- نحوه عملکرد بمب گرافیت [۱]

۳-۲ سیستم قدرت

سیستم قدرت، جزء پیچیده‌ترین سیستم‌های مهندسی در دنیای امروز است [۲]. وابستگی زیاد به برق در صنایع و مراکز نظامی و

قطع خطوط متصل به پست توسط سیستم حفاظتی، آنها به صورت برنامه‌ریزی شده قطع شوند. در این صورت، هم شبکه از کنترل خارج نخواهد شد و هم پاکسازی محل حمله گرافیتی به راحتی انجام خواهد شد زیرا اتصال کوتاه به وجود نمی‌آید و ایلاف به تجهیزات جوش نخواهند خورد.

۴- طرح پیشنهادی

۴-۱ مفهوم طرح

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۳، حمله گرافیتی بسته به محل حمله می‌تواند اغتشاشاتی را به شبکه وارد کند. با حمله گرافیتی پس از تماس گرافیت با تجهیزات محل مورد نظر، به دلیل اتصال کوتاه، تمام خطوط متصل به پست قطع خواهند شد. اتصال کوتاه‌ها و قطع خطوط، اغتشاشات کنترل نشده‌ای هستند که حتماً به شبکه وارد خواهند شد و زمان آنها نیز معلوم نیست و تابع شرایط مختلفی مثل آب و هوا، سرعت باد، نوع بمب (پودری یا ایلافی) و غیره خواهد بود. به همین دلیل، پیش‌بینی حالت شبکه قدرت در طی وارد شدن این اغتشاش‌ها کار بسیار دشواری است. مطالعه مقدار تأثیر این اغتشاشات نیز بحث گسترده‌ای است که پژوهشگران زیادی در قالب پایداری سیستم‌های قدرت به آن پرداخته‌اند [۴، ۱۰-۱۶].

طرح ارائه شده در مقاله پیش‌رو این است که حمله گرافیتی تشخیص داده شود (بخش ۲-۱) و قبل از تماس گرافیت با تجهیزات شبکه، تمام خطوط متصل به محل مورد حمله با یک فاصله زمانی از پیش تعیین شده قطع گردد. این روش دو مزیت دارد:

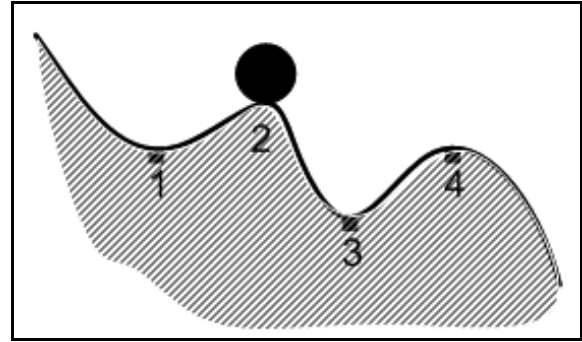
۱- اتصال کوتاه به وجود نخواهد آمد.

۲- اغتشاش حاصل از قطع خطوط می‌تواند با فاصله‌های زمانی مناسب به سیستم وارد و برنامه‌ریزی شده هم باشد. کاملاً واضح است که اگر اغتشاش‌ها با فاصله زمانی تعیین شده به سیستم اعمال شوند، سیستم کمتر دچار تنش خواهد شد و خسارات ناشی از بمب گرافیتی نیز کمتر گسترش خواهد یافت.

۴-۲ شبیه‌سازی طرح

شکل (۳) شبکه قدرت 39-BUS New England را نشان می‌دهد. اطلاعات سیستم در پیوست ارائه شده است. زاویه روتور ژنراتورها یک معیار برای پایداری هستند [۵]. اگر در تغییر از حالتی به حالت دیگر، تغییرات زاویه همگرا نشود، سیستم ناپایدار خواهد شد [۱۷]. هرچه قدر زاویه ژنراتور در تغییر از حالتی به حالت دیگر تغییرات شدیدتری داشته باشد، حاشیه پایداری آن کاهش خواهد یافت [۱۸].

محل مورد حمله گرافیتی، باس شماره ۲۸ انتخاب شده که در شکل



شکل ۲- یک سیستم بسیار ساده مکانیکی برای بیان مفهوم پایداری

- خروج ناگهانی ژنراتور
- کاهش یا افزایش ناگهانی بار

استاندارد NERC^۱، اصلی را به نام معیار قطعی امنیت شبکه مطرح می‌نماید که به اصل N-1 نیز معروف است. این اصل بر این اساس است که یک سیستم انتقال بایستی به تعداد کافی از تجهیزات تشکیل شده باشد تا بتواند خروج یا وقوع خطا در یک تجهیز شبکه را تحت هر شرایطی تحمل کند، بدون آنکه مشکلی در سیستم، مانند اضافه بار، اضافه یا افت ولتاژ، خروج سایر تجهیزات، حذف بار برنامه‌ریزی نشده و غیره ایجاد گردد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و اطلاعات کسب شده از دیسپاچینگ ملی ایران، طراحی شبکه انتقال ایران نیز بر اساس N-1 می‌باشد. بنابراین اگر در شبکه ایران دو خط انتقال و یا بیشتر به صورت اتفافی از سیستم خارج شوند احتمال این که شبکه از کنترل خارج شود وجود دارد و باید صبر کرد تا رله‌های موجود در شبکه به صورت خودکار از شبکه حفاظت کنند و پس از سکون شبکه اقدامات لازم برای بهبود شبکه صورت پذیرد.

از طرفی کنترلر شبکه (دیسپاچینگ) با داشتن زمان کافی و به صورت برنامه‌ریزی شده می‌تواند تعداد دلخواهی از عناصر را از شبکه خارج کند، بدون آنکه مشکل کلی برای شبکه به وجود آید.

تماس ایلاف گرافیت یا پودر گرافیت با تجهیزات شبکه موجب اتصال کوتاه و خارج شدن آنها از شبکه می‌گردد. بنابراین، حمله گرافیتی در یک جمله یعنی وارد شدن اغتشاشات به شبکه و تغییر ساختار آن به طوری که در طراحی شبکه به هیچ عنوان چنین اغتشاش‌هایی در نظر گرفته نشده است. این حالت، شبکه را از حالت عادی به حالت‌های هشدار و بحران خواهد برد.

محلی که چند خط انتقال به هم می‌رسند (پست)، بهترین نقطه برای حمله گرافیتی است، زیرا با یک حمله چند خط انتقال از شبکه خارج خواهند شد و شبکه وارد یک حالت بحرانی شده و از کنترل متمرکز خارج می‌شود. ایده اصلی این مقاله به این صورت است که قبل از

زاویه را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهند. هر چقدر دامنه نوسانات زاویه از یک حالت به حالت دیگر کمتر باشد تنش وارد شده به شبکه کمتر خواهد بود. نکته مهم اینجاست که اگر قبل از برخورد الیاف گرافیت به محل، آگاهی در مورد حمله وجود داشته باشد، اپراتور شبکه می‌تواند اغتشاشات را به صورت ارادی به شبکه وارد کند. در این صورت نوسانات بسیار کمتر شده و پایداری بهتر خواهد شد. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود اگر ابتدا خط ۲۶ قطع شود و پس از دو ثانیه خط ۲۹ نیز قطع گردد نوسانات زاویه کمتر خواهد شد. مدت زمان دو ثانیه به صورت سعی و خطا به دست آمده و هیچ محاسباتی برای این زمان صورت نگرفته است. مطالعات برای به دست آوردن این زمان، توسط گروه تحقیقاتی نویسنده مقاله، به گونه‌ای که نوسانات مینیمم شود، در حال انجام است.

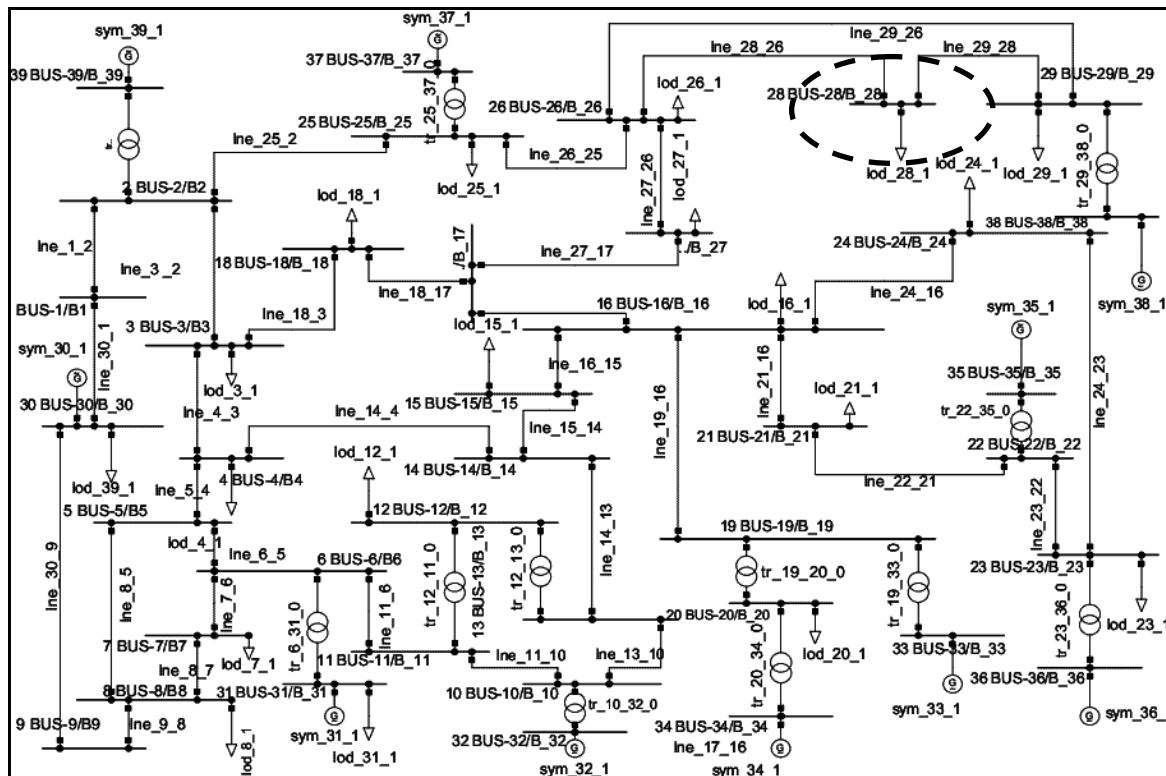
جدول ۱- زاویه ژنراتور ۳۸ در چهار حالت ممکن برای شبکه پس از حمله گرافیتی

شرایط شبکه	زاویه ژنراتور ۳۸
در شرایط عادی که خطوط متصل هستند	درجه ۱۵/۱
در شرایطی که فقط خط ۲۹ خارج شده است	درجه ۲۸/۳
در شرایطی که فقط خط ۲۶ خارج شده است	درجه ۲۰/۵
در شرایطی که خطوط ۲۶ و ۲۹ خارج شده‌اند	درجه ۳۵/۸

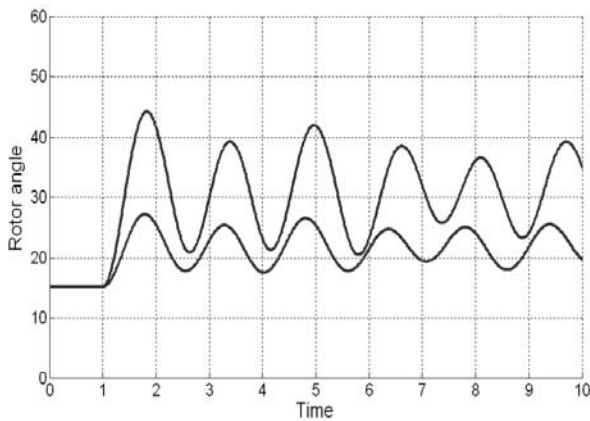
مشخص است. دلیل انتخاب این باس این است که اولاً مستقیماً ژنراتور به آن وصل نشده است و ثانیاً تعداد خطوط متصل به آن کم است (۲ خط). البته باس‌های دیگری با این مشخصات در سیستم وجود دارند (باس‌های ۷، ۱۸ و ۲۱) که برای شبیه‌سازی مناسب هستند. هدف، بررسی تغییرات زاویه روتور ژنراتور ۳۸ متصل به باس ۳۸ است.

داده‌های جدول (۱) از شبیه‌سازی استاتیک شبکه به دست آمده است. اگر هیچ اغتشاشی در شبکه وجود نداشته باشد و شرایط عادی باشد زاویه ژنراتور ۳۸ برابر ۱۵/۱ درجه خواهد شد. اگر به هر دلیلی خط ۲۹ از مدار خارج شود و زمان گذرا طی شود (این زمان جزء شرایط ذاتی شبکه است و برای شبکه‌های مختلف متفاوت است)، زاویه ژنراتور به ۲۸/۳ درجه خواهد رسید. اگر خط ۲۶ از مدار خارج شود زاویه ژنراتور پس از طی زمان گذرا، به ۲۰/۵ درجه خواهد رسید. از همین جا می‌توان نتیجه گرفت که خروج خط ۲۹ تنش بیشتری را نسبت به خروج خط ۲۶ بر ژنراتور ۳۸ وارد خواهد کرد. حال اگر هر دو خط قطع باشند و شبیه‌سازی صورت گیرد، زاویه ژنراتور به ۳۵/۸ خواهد رسید.

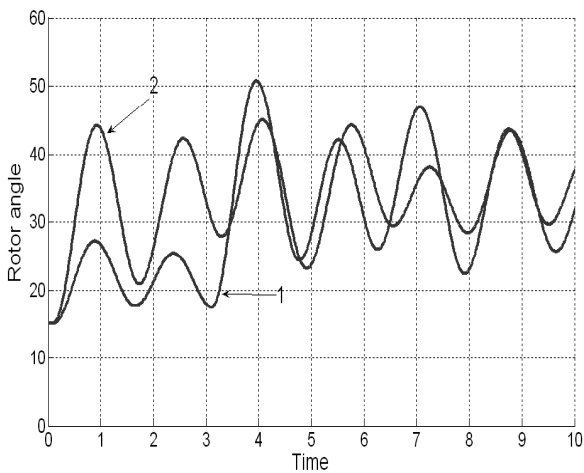
اگر بمب گرافیتی به محل مورد نظر برخورد کند، قطعاً پس از طی مدت زمان عملکرد بمب، سیستم حفاظتی خطوط ۲۶ و ۲۸ را قطع خواهد کرد و زاویه ژنراتور از ۱۵/۱ به ۳۵/۸ خواهد رسید. بحث این مقاله نحوه تغییرات زاویه است [۱۹]. شکل‌های (۴) تا (۷) تغییرات



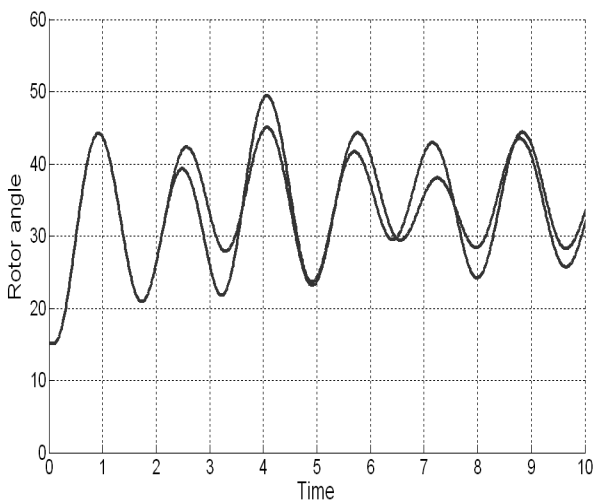
شکل ۳- دیاگرام تک خطی 39-BUS New England System



شکل ۵- تغییرات زاویه روتور برای قطع مستقل خطوط ۲۶ و ۲۹



شکل ۶- تغییرات زاویه روتور برای اختلاف زمانی ۳ ثانیه قطع خطوط

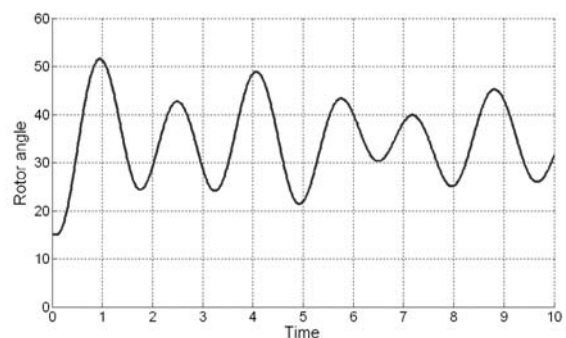


شکل ۷- تغییرات زاویه روتور برای اختلاف زمانی ۲/۵ ثانیه قطع خطوط

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴) تا (۷) ارائه شده است. شکل (۴) زاویه نوسانات روتور را در حالتی ارائه داده است که هر دو خط ۲۹ و ۲۶ با هم قطع شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود دامنه نوسانات تا بالای ۵۰ درجه افزایش یافته و این نشان‌دهنده بزرگ بودن تنش واردشده به ژنراتور است. شکل (۵) نشان‌دهنده زاویه روتور ژنراتور ۳۸ است در حالی که هر یک از خطوط جداگانه قطع شده‌اند. منحنی ۱ برای قطع خط ۲۶ به‌دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نمودار رفته‌رفته به همان مقدار نهایی ارائه‌شده در جدول (۱) یعنی ۲۰/۵ درجه نزدیک می‌شود. منحنی ۲ برای حالتی است که فقط خط ۲۹ قطع شده و خط ۲۶ در مدار مانده است. واضح است که تنش واردشده به شبکه با قطع خط ۲۹ بیشتر از قطع خط ۲۶ است. در شکل‌های (۶) و (۷) نتایج جالبی به‌دست آمده است. این منحنی‌ها برای قطع خطوط ۲۶ و ۲۹ با فاصله‌های زمانی متفاوت ارائه شده است. با توجه به این شکل‌ها منحنی شماره ۲ در شکل (۶) کمترین نوسان را دارد. استراتژی قطع در این شبیه‌سازی به این صورت بوده است که پس از قطع خط ۲۹ در لحظه پیک، زاویه ژنراتور خط ۲۶ قطع شده و بهترین نتیجه برای این زمان به‌دست آمده است. در منحنی شماره ۱ شکل (۶) ابتدا خط ۲۶ قطع شده و پس از دو ثانیه خط ۲۹ قطع شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود زاویه ژنراتور در این حالت نیز تا ۵۰ درجه افزایش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد ادامه کار

تأثیر قطع خطوط با فاصله‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که می‌توان با قطع برنامه‌ریزی‌شده خطوط، از نوسانات بیش از حد شبکه جلوگیری کرده و پاکسازی محل مورد حمله را راحت‌تر انجام داد. پیشنهاد می‌شود برای ادامه کار، بررسی‌های لازم برای زمان دقیق قطع خطوط برای آنکه نوسانات کمترین دامنه ممکن را داشته باشند صورت گیرد. این مطالعات می‌تواند به صورت حفاظت‌های ویژه در سیستم‌های حفاظتی تعریف‌شده و آنها را برای مقابله خودکار در برابر بمب‌های گرافیتی تقویت نماید.



شکل ۴- تغییرات زاویه روتور هنگام قطع خط ۲۶ و ۲۹

۶- پیوست

اطلاعات شبکه شبیه‌سازی شده به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- اطلاعات خطوط شبکه ارائه شده

نام خط	باس ابتدا	باس انتها	R	X	B
lne_11_10	11 BUS-11	10 BUS-10	0.48	5.12	61.25
lne_11_6	11 BUS-11	6 BUS-6	0.83	9.76	116.70
lne_13_10	13 BUS-13	10 BUS-10	0.48	5.12	61.25
lne_14_13	14 BUS-14	13 BUS-13	1.07	12.02	144.76
lne_14_4	14 BUS-14	4 BUS-4	0.95	15.35	116.11
lne_15_14	15 BUS-15	14 BUS-14	2.14	25.83	307.50
lne_16_15	16 BUS-16	15 BUS-15	1.07	11.19	143.67
lne_17_16	17 BUS-17	16 BUS-16	0.83	10.59	112.75
lne_18_17	18 BUS-18	17 BUS-17	0.83	9.76	110.82
lne_18_3	18 BUS-18	3 BUS-3	1.31	15.83	179.63
lne_19_16	19 BUS-19	16 BUS-16	1.90	23.21	255.41
lne_1_2	2 BUS-2	1 BUS-1	4.17	48.92	587.02
lne_21_16	21 BUS-21	16 BUS-16	0.95	16.07	214.07
lne_22_21	22 BUS-22	21 BUS-21	0.95	16.66	215.50
lne_23_22	23 BUS-23	22 BUS-22	0.71	11.43	155.09
lne_24_16	24 BUS-24	16 BUS-16	0.36	7.02	57.13
lne_24_23	24 BUS-24	23 BUS-23	2.62	41.66	303.30
lne_25_2	25 BUS-25	2 BUS-2	8.33	10.24	122.66
lne_26_25	26 BUS-26	25 BUS-25	3.81	38.45	431.00
lne_27_17	27 BUS-27	17 BUS-17	1.55	20.59	270.20
lne_27_26	27 BUS-27	26 BUS-26	1.67	17.50	201.30
lne_28_26	28 BUS-28	26 BUS-26	5.12	56.42	655.49
lne_29_26	29 BUS-29	26 BUS-26	6.78	74.39	864.52
lne_29_28	29 BUS-29	28 BUS-28	1.67	17.97	209.20
lne_3_2	3 BUS-3	2 BUS-2	1.55	17.97	216.09
lne_30_1	30 BUS-30	1 BUS-1	1.19	29.76	630.12
lne_30_9	30 BUS-30	9 BUS-9	1.19	29.76	1008.19
lne_4_3	4 BUS-4	3 BUS-3	1.55	25.35	186.01
lne_5_4	5 BUS-5	4 BUS-4	0.95	15.24	112.75
lne_6_5	6 BUS-6	5 BUS-5	0.24	3.09	36.46
lne_7_6	7 BUS-7	6 BUS-6	0.71	10.95	94.94
lne_8_5	8 BUS-8	5 BUS-5	0.95	13.33	124.01
lne_8_7	8 BUS-8	7 BUS-7	0.48	5.48	65.53
lne_9_8	9 BUS-9	8 BUS-8	2.74	43.21	319.60

جدول ۳- اطلاعات زنراتورهای شبکه ارائه شده

نام زنراتور	باس اتصال	X2(pu)	Sn(MVA)	Rs(pu)
sym_30_1	B30	0.2	2000	0.10
sym_31_1	B31	0.2	2000	0.27
sym_32_1	B32	0.2	2000	0.40
sym_33_1	B33	0.2	2000	0.20
sym_34_1	B34	0.2	2000	0.10
sym_35_1	B35	0.2	2000	0.06
sym_36_1	B36	0.2	2000	0.30
sym_37_1	B37	0.2	2000	0.70
sym_38_1	B38	0.2	2000	0.30
sym_39_1	B39	0.2	2000	0.10

جدول ۴- اطلاعات بارهای شبکه ارائه شده

نام بار	باس اتصال	P(MW)	Q(MVAR)
lod_12_1	B12	8	88
lod_15_1	B15	320	153
lod_16_1	B16	329	32
lod_18_1	B18	500	100
lod_20_1	B20	680	103
lod_21_1	B21	274	115
lod_23_1	B23	247	84
lod_24_1	B24	308	-92
lod_25_1	B25	224	47
lod_26_1	B26	139	17
lod_27_1	B27	281	75
lod_28_1	B28	206	27
lod_29_1	B29	283	26
lod_31_1	B31	9	4
lod_39_1	B39	1104	250
lod_3_1	B3	322	2
lod_4_1	B4	500	184
lod_7_1	B7	233	84
lod_8_1	B8	522	176

جدول ۵- اطلاعات ترانسفورماتورهای شبکه ارائه شده

نام ترانس	Sn(MVA)	HV(KV)	LV(KV)	Uk%
tr_10_32_0	100	345	22	2
tr_12_11_0	100	345	230	4.51
tr_12_13_0	100	345	230	4.51
tr_19_20_0	100	345	230	1.45
tr_19_33_0	100	345	22	1.49
tr_20_34_0	100	230	22	1.88
tr_22_35_0	100	345	22	1.42
tr_23_36_0	100	345	22	2.76
tr_2_39_0	100	345	22	2.38
tr_29_38_0	100	345	22	1.63
tr_2_39_0	100	345	22	1.8
tr_6_31_0	100	345	22	2.5

8. H. Razmi, H. A. Shayanfar, and M. Teshnehlab, "Steady state voltage stability with AVR voltage constraints," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, pp. 650-659, (2012).
9. M. S. Alwan and X. Liu, "Stability of singularly perturbed switched systems with time delay and impulsive effects," *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, vol. 71, pp. 4297-4308, (2009).
10. J. L. Domínguez-García, O. Gomis-Bellmunt, F. D. Bianchi, and A. Sumper, "Power oscillation damping supported by wind power: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 4994-5006, (2012).
11. G. Shabib, "Implementation of a discrete fuzzy PID excitation controller for power system damping," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 3, pp. 123-131, (2012).
12. C.-F. Yang, G. G. Lai, C.-H. Lee, C.-T. Su, and G. W. Chang, "Optimal setting of reactive compensation devices with an improved voltage stability index for voltage stability enhancement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 37, pp. 50-57, (2012).
13. T. Wang, D. Mantha, and R. G. Reddy, "Thermal stability of the eutectic composition in LiNO₃-NaNO₃-KNO₃ ternary system used for thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 100, pp. 162-168, (2012).
14. S. Ding, S. Li, and W. X. Zheng, "Nonsmooth stabilization of a class of nonlinear cascaded systems," *Automatica*, vol. 48, pp. 2597-2606, (2012).
15. W. Li, L. Vanfretti, and Y. Chompoobutrgool, "Development and implementation of hydro turbine and governor models in a free and open source software package," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 24, pp. 84-102, (2012).
16. F. Guerin, D. Lefebvre, and V. Loisel, "Supervisory control design for systems of multiple sources of energy," *Control Engineering Practice*, vol. 20, pp. 1310-1324, (2012).
17. H. Huang, Q.-H. Wu, and H. Li, "Synthesis for Spatially Interconnected Systems with Distributed Output Feedback Controllers," *Acta Automatica Sinica*, vol. 35, pp. 1128-1135, (2009).
18. A. Khodabakhshian and R. Hemmati, "Multi-machine power system stabilizer design by using cultural algorithms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp. 571-580, (2013).

جدول ۶- اطلاعات مربوط به ثابت اینرسی ژنراتورها

باس	ژنراتور	توان (MW)	ثابت اینرسی
39	G1	572.9	2.64
31	G2	650	6.15
32	G3	632	2.62
33	G4	508	3.39
34	G5	650	6.15
35	G6	560	2.64
36	G7	540	3.39
37	G8	830	9.5
38	G9	1000	8.4
30	G10	250	4.77

مراجع

۱. ابراهیم‌نژاد، محمد؛ آشنایی با تسلیحات غیر کشنده؛ انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، (۱۳۸۶).
2. A. R. Abbasi and A. R. Seifi, "A new coordinated approach to state estimation in integrated power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 45, pp. 152-158, (2013).
3. S. Miao-ping, N. Xiao-hong, and P. Huan, "Delay-dependent robust stabilization for steam valve opening of uncertain time-delay multi-machine power system with sector saturating actuator," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp. 153-159, (2013).
4. M. A. Mahmud, M. J. Hossain, and H. R. Pota, "Effects of large dynamic loads on power system stability," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp. 357-363, (2013).
5. D. You, K. Wang, L. Ye, J. Wu, and R. Huang, "Transient stability assessment of power system using support vector machine with generator combinatorial trajectories inputs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp. 318-325, (2013).
6. M. Gharebaghi and R. Ghazi, "Proposed mechanism for performance of power system stabilizers in the condition of strong resonance," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp. 259-266, (2013).
7. A. E. Leon, J. A. Solsona, and M. I. Valla, "Comparison among nonlinear excitation control strategies used for damping power system oscillations," *Energy Conversion and Management*, vol. 53, pp. 55-67, (2012).

Reduction of Graphite Bomb Damages by Considering Power System Stability

R. Ghafar Pour¹

S. R. Mir Motahari²

Abstract

Graphite bombs are one of the important threats of power systems. These bombs can create several short circuits on the network elements. Protection system will remove faulted area without human intervention. In fact these systems have to move from one state to another state. Removal of elements from system can change its configuration and may decrease stability margins and affect its control process. This paper first demonstrates a thin coverage on graphite bombs and power system stability concepts. Then a scheme is presented for the Reduction of Graphite Bomb damage by taking into account power system stability. The scheme is based on detection of graphite attack before probabilistic faults on the network and transmission lines elimination to reduce disturbances effect on the network. Finally the presented method on the small section of New England 39_BUS network (one bus & connected lines) has been simulated. Results showed that the method is useful in passive defense against graphite bomb.

Key Words: *Graphite Bomb, Graphite Threats, Power System Stability, Transmission Lines, Short Circuit*

1- Researcher of the Faculty and Research Center of Passive Defense, Imam Hossein Comprehensive University (Reza.Ghaffarpour@ihu.ac.ir)
- Writer in Charge

2- Researcher of the Faculty and Research Center of Passive Defense, Imam Hossein Comprehensive University