

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرمartial

سال هفتم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، (پیاپی ۲۶): صص ۷-۱۸

تعیین اولویت قطع خطوط متصل به پست برای کاهش خسارات ناشی از

بمب‌های گرافیتی

رضا غفارپور^۱، امیر احمدی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۸

چکیده

یکی از کاربردهای نظامی گرافیت تولید بمب گرافیتی است. پست برق (محلی که چند خط به هم می‌رسند) بهترین محل برای حمله گرافیتی است؛ زیرا با یک حمله چند خط از مدار خارج خواهد شد. هدف از این پژوهش ارائه طرحی برای کاهش خسارات ناشی از حملات گرافیتی و افزایش پایداری دینامیکی سیستم قدرت است. طرح پیشنهادی به این صورت است که قبل از برخورد الیاف گرافیت به شبکه و قطع خطوط متصل به پست توسط سیستم حفاظتی، خطوط با یک برنامه‌ریزی مشخص و از پیش تعیین شده قطع گردند. به منظور قطع برنامه‌ریزی شده خطوط ابتدا باید ترتیب و اولویت قطع خطوط مشخص شده و سپس زمان قطع هر خط مشخص گردد. برای تعیین اولویت بندی خطوط جهت قطع از شاخص استاتیکی میانگین نرخ تغییرات توان اکتیو خطوط و برای تعیین فاصله زمانی بین قطع خطوط از شاخص دینامیکی خیز اول ژنراتورها استفاده شده است. طرح پیشنهادی روی شبکه ۳۹ باسه IEEE پیاده‌سازی گردیده است. در نهایت نتایج نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی اثربخش بوده و پایداری دینامیکی شبکه را بهبود می‌بخشد.

کلیدواژه‌ها: بمب گرافیتی، اتصال کوتاه، پایداری سیستم قدرت، قطع برنامه‌ریزی شده خطوط

۱- مربی و عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، Rghaffarpour@ihu.ac.ir - نویسنده مسئول

۲- کارشناسی ارشد دانشگاه شهید بهشتی

۱. مقدمه

یکی از کاربردهای نظامی گرافیت تولید بمب گرافیتی است. هدف این بمبها شبکه‌های قدرت و تجهیزات الکترونیکی هستند زیرا می‌توانند بدون ایجاد انفجار کارکرد عادی شبکه‌های قدرت را مختل کنند. تماس الیاف گرافیت یا پودر گرافیت با تجهیزات شبکه موجب اتصال کوتاه و خارج شدن آن‌ها از شبکه می‌گردد. پست برق (محلی که چند خط به هم می‌رسند) بهترین محل برای حمله گرافیتی است زیرا با یک حمله چند خط از مدار خارج خواهند شد [۱]. روش‌های مقابله با این بمبها دو دسته است [۲].

۱. اقدامات قبل از تماس گرافیت با تجهیزات شبکه

۲. اقدامات پس از تماس گرافیت با تجهیزات شبکه

در این مقاله فرض بر این است که وقوع یک حمله گرافیتی شناسایی شده و هدف کلی مقاله ارائه طرحی جهت تجدید ساختار شبکه قدرت و کاهش آسیب شبکه قبل از تماس گرافیت با تجهیزات است.

در این راستا در بخش ۲ معرفی بیشتری از بمب‌های گرافیتی و روش‌های مقابله با آن‌ها ارائه شده است. در بخش ۳ معیار دینامیکی خیز اول ژنراتورها و نقش آن در سنجش پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت توضیح داده شده است. در ادامه و در بخش ۴ طرح پیشنهادی معرفی گردیده است. در بخش ۵ نیز طرح پیشنهادی روی شبکه ۳۹ باس IEEE با کمک نرم‌افزار DigSILENT شبیه‌سازی شده و سپس نحوه عملکرد طرح تبیین شده و در نهایت صحت طرح پیشنهادی اثبات شده است. در پایان نیز در بخش ۶ نتیجه‌گیری شده است.

۲. بمب‌های گرافیتی

بمب‌های گرافیتی در زمره بمب‌های نرم و تسلیحات غیرکشنده طبقه‌بندی می‌شوند. این بمبها برای از کار انداختن نیروگاه‌ها و تاسیسات برق بدون ایجاد صدمات عمرانی ناشی از مواد منفجره طراحی شده‌اند. این بمب ابتدا اثر تخریبی ندارد، اما باعث قطع شدن جریان برق می‌شود. در این بمبها اغلب از گرافیت که نوعی زغال سنگ نرم است استفاده شده است. همان‌طور که می‌دانید کاربرد عمده گرافیت در برخی راکتورهای هسته‌ای، باتری‌های معمولی، مغز مداد و برخی کارهای صنعتی دیگر است. اما مهمترین خاصیت آن این است که قوی‌ترین رسانای جریان برق می‌باشد. به نظر می‌رسد در بمب گرافیتی از این خاصیت استفاده شده است. بدین صورت که پس از انفجار، گرافیت که بیش‌تر از جنس کربن است با مواد حلال کربن ترکیب شده و به صورت بخار در می‌آید. اما این بخار، سنگین بوده و به‌زودی بر سطح زمین می‌نشیند. بنابراین استفاده از این

بمب در نیروگاه‌های برق باعث آلودگی سطح تجهیزات نیروگاه شده و باعث اتصالی و از کار افتادن نیروگاه می‌شود. در ضمن برای پاک‌سازی نیروگاه و راه‌اندازی مجدد نیاز به چند ماه زمان است. سابقه استفاده از این بمبها به سال ۱۹۹۱ میلادی برمی‌گردد که تاسیسات برق عراق مورد حمله قرار گرفت و ۸۵٪ از شبکه برق عراق از کار افتاد. پس از آن، در سال ۱۹۹۹ میلادی این بمبها علیه یوگوسلاوی 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]. طبق مراجع [۴-۳] از جمله راه‌های مقابله با این دسته تسلیحات عبارتند از:

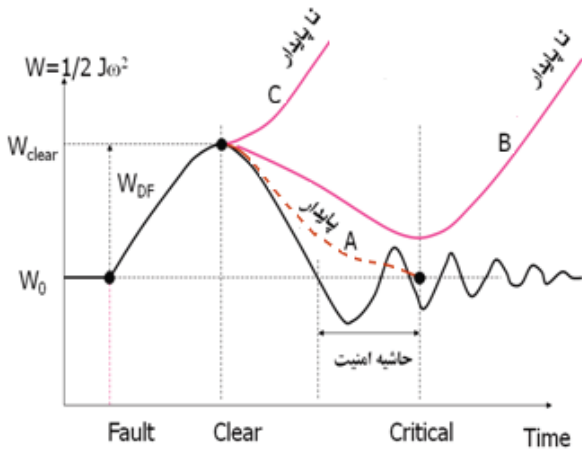
- ایزولاسیون بدنه ساختمان، تاسیسات برق و اتاق‌های کنترل و فرمان
- عایق اسپری برای مدارات الکترونیکی
- استفاده از فیلترهای الکترواستاتیک برای باردار کردن ذرات گرافیت و سپس جذب ذرات با استفاده از میدان مغناطیسی
- استفاده از سقف فلزی یا توری پلاستیکی برای جلوگیری از تماس الیاف با تجهیزات
- استفاده از چتر برای جمع کردن گرافیت پخش شده در هوا
- استفاده از دمنده‌های قوی برای دور کردن پودر یا الیاف گرافیت از محل
- آموزش تیم‌های ویژه برای پاک‌سازی محل پس از تماس الیاف گرافیت با تجهیزات

همان‌طور که اشاره شد در صورت تماس گرافیت با تجهیزات ایجاد اتصال کوتاه، الیاف به تجهیزات جوش خواهند خورد و سیستم حفاظتی، محل حمله را از شبکه جدا خواهد کرد. در این صورت هم پاک‌سازی محل حمله مشکل است و هم ممکن است اختلالی که در شبکه به‌وجود آمده در شبکه گسترش پیدا کند. لذا ارائه راه‌کارهایی جهت جلوگیری از تماس الیاف گرافیت به شبکه در موقع حملات گرافیتی بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

۳. مروری بر پایداری سیستم‌های قدرت

سیستم‌های قدرت مجموعه‌ای از مراکز تولید توان الکتریکی هستند که از طریق شبکه‌های انتقال و توزیع به‌همراه کلیه تجهیزات و ادوات حفاظتی و کنترلی موجود در آن، به مراکز مصرف انرژی در سطوح

تغییرات خیز اول ژنراتورها را در موقع حملات گرافیتی کاهش می‌دهد.



شکل ۱- تغییرات زاویه روتور ژنراتور بعد از یک رخداد

۴. طرح پیشنهادی

در این مقاله فرض شده که وقوع حمله گرافیتی روی یک پست شناسایی شده است. این کار توسط یک سنسور که وجود الیاف گرافیتی را در هوا تشخیص دهد انجام می‌شود [۲]. از طرفی هنوز الیاف گرافیت به پست نرسیده و مدت زمانی طول می‌کشد تا الیاف گرافیت با شبکه تماس پیدا کنند. این مدت زمان در این مقاله ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این مدت می‌توان با ارائه راه‌کارهایی خسارات ناشی از حمله گرافیتی را کاهش داد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد هدف این مقاله نیز پیشنهاد طرحی است که مقدار تغییرات خیز اول ژنراتورها را در موقع حملات گرافیتی کاهش دهد که این امر منجر به کاهش خسارات و افزایش پایداری دینامیکی سیستم قدرت می‌شود.

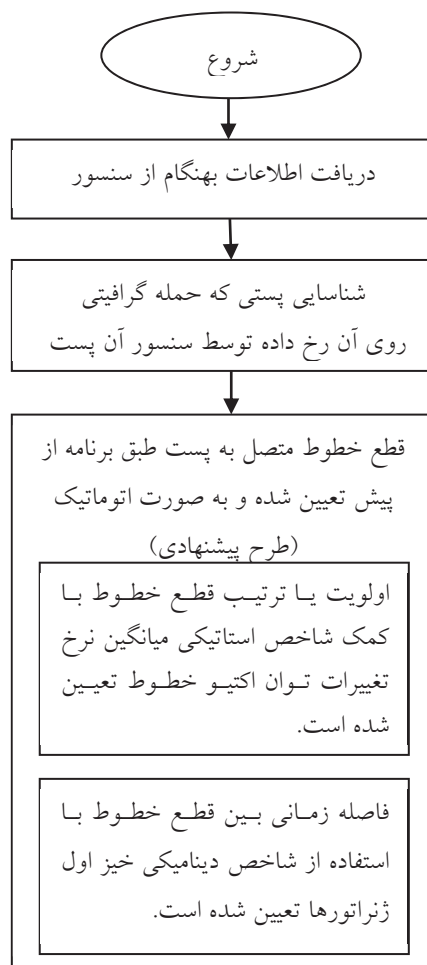
کلید طرح پیشنهادی به این صورت است که قبل از برخورد الیاف گرافیت به شبکه و قطع بدون برنامه تمامی خطوط متصل به پست توسط سیستم حفاظتی، خطوط متصل به پست با یک برنامه‌ریزی مشخص و از پیش تعیین شده قطع گردند. در این صورت هم شبکه در کنترل ما خواهد بود و هم پاک‌سازی محل حمله گرافیتی به راحتی انجام خواهد شد زیرا اتصال کوتاه به وجود نمی‌آید. به منظور قطع برنامه‌ریزی شده خطوط ابتدا باید ترتیب و اولویت قطع خطوط مشخص شده و سپس زمان قطع هر خط مشخص گردد. به عبارت ساده‌تر ابتدا باید مشخص کرده که کدام یک از خطوط متصل به پست باید قطع شود. بعد از قطع خط مشخص شده، حال باید تعیین گردد که با چه فاصله زمانی پس از قطع خط اول می‌بایستی خط دوم قطع شود. تمام این اقدامات با این هدف است

ولتاژی مختلف متصل می‌گردند [۵].

در پی وقوع یک اختلال شدید (مانند حملات گرافیتی)، تعادل بین قدرت مکانیکی ورودی و قدرت الکتریکی خروجی ژنراتورها تحت تأثیر قرار گرفته و در نتیجه ژنراتورها شروع به نوسان می‌کنند [۹-۶]. در صورت ضعف پایداری سیستم قدرت، خیز اول زوایای روتور ژنراتورهای شبکه، خصوصاً ژنراتورهایی که در نزدیکی محل خطا قرار دارند افزایش خواهد یافت. توان عبوری از خطوط و ولتاژ باس‌ها از این نوسانات تأثیر پذیرفته به طوری که می‌توانند زمینه‌های خروج‌های پی‌درپی را در سیستم فراهم آورده و باعث ایجاد خاموشی سراسری در شبکه گردند. لذا وقوع یک پیشامد شدید، ممکن است سیستم قدرت را وارد شرایط بحرانی کند که باعث ناپایداری ژنراتورهای شبکه و خروج از سنکرون آن‌ها شود [۱۰]. حوادث پی‌درپی باعث تشدید ناپایداری گشته و نهایتاً سیستم را به چند جزیره جدا از هم تجزیه می‌نماید [۱۱]. برای جلوگیری از این امر باید با کمک راه‌کارهایی پایداری دینامیکی سیستم قدرت افزایش یافته و از ورود سیستم قدرت به این شرایط بحرانی جلوگیری شود [۱۵-۱۲].

با افزایش پایداری، امنیت دینامیکی سیستم قدرت تأمین می‌شود. امنیت دینامیکی بیانگر توانایی سیستم قدرت برای حفظ پایداری در دوره گذرای وقوع یک اختلال مانند اتصال کوتاه، خروج خط، خروج ترانسفورماتور و نیروگاه است. در امنیت دینامیکی، رفتار دینامیکی سیستم در حین دوره گذرای وقوع اختلال مورد توجه خواهد بود. برای تعیین درجه امنیت یک سیستم قدرت لازم است که شاخص‌های امنیتی تعریف شود. ویژگی یک شاخص امنیتی این است که باید یک درک فیزیکی و ملموس از وضعیت امنیتی سیستم ارائه نماید و همچنین به سادگی قابل محاسبه باشد. شاخص دینامیکی مورد بررسی در این مقاله که پایداری دینامیکی شبکه بر مبنای آن سنجیده می‌شود نرخ تغییرات خیز اول ژنراتورها است. هرچه این شاخص کم‌تر باشد تنش کم‌تر شده و شبکه از نظر دینامیکی پایدارتر است [۱۸-۱۶].

برای درک بهتر این شاخص شکل (۱) ارائه شده است. این شکل تغییرات زاویه روتور یک ژنراتور را بعد از یک رخداد نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود زاویه روتور بعد از خیز اول می‌تواند به سمت سه حالت A، B، و C میل کند. دو حالت B و C که در شکل با خط پر مشخص شده است ناپایدار می‌باشند و فقط حالت A که در شکل با خط چین مشخص شده پایدار است. حال اگر بتوان با کمک راه‌کارهایی مقدار تغییرات خیز اول را کاهش داد احتمال این که تغییرات زاویه روتور به سمت حالت پایدار A حرکت کند افزایش می‌یابد که این امر پایداری دینامیکی شبکه را افزایش می‌دهد. در این مقاله نیز طرحی پیشنهاد شده است که مقدار



شکل ۲- فلوچارت فرآیند کلی اعمال طرح پیشنهادی

که شاخص تغییرات خیز اول ژنراتورهای نزدیک محل خطا به کمترین مقدار خود برسد.

برای تعیین اولویت بندی خطوط جهت قطع از شاخص استاتیکی میانگین نرخ تغییرات توان اکتیو خطوط و برای تعیین فاصله زمانی بین قطع خطوط از شاخص دینامیکی خیز اول زاویه روتور ژنراتورها استفاده شده است که نحوه عملکرد این دو شاخص در اولویت بندی و قطع خطوط در ادامه کار و با انجام شبیه سازیها تبیین می گردد.

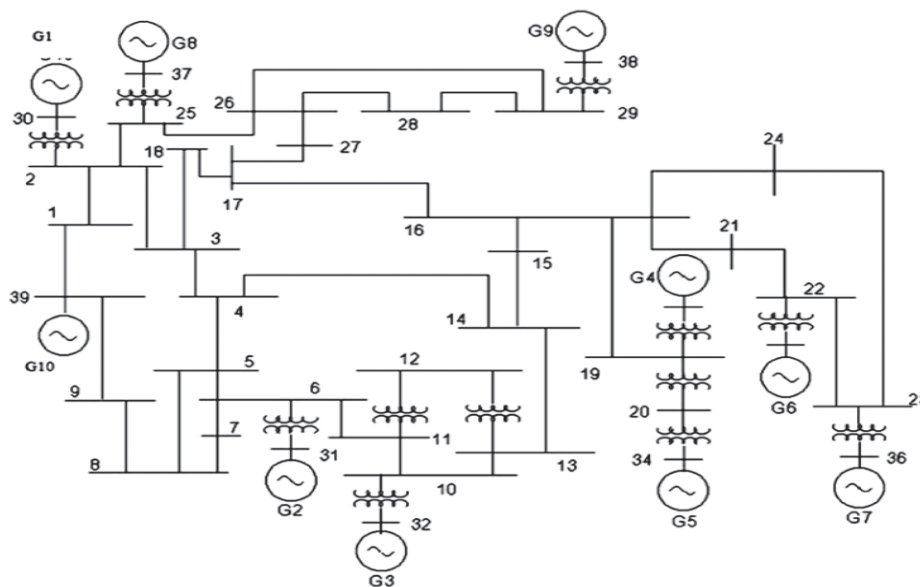
شکل (۲) فلوچارت فرآیند کلی اعمال طرح پیشنهادی در موقع حملات گرافیتی را نشان می دهد.

۵. شبیه سازی طرح پیشنهادی

۵-۱. شبکه مورد مطالعه

به منظور نشان دادن صحت طرح پیشنهادی و توانایی آن جهت افزایش امنیت دینامیکی هنگام حملات گرافیتی، طرح پیشنهادی بر روی شبکه ۳۹ باسه IEEE که شامل ۱۰ ژنراتور است پیاده سازی گردیده است. مطالعات پایداری در نقطه کاری صورت گرفته که توان اکتیو تولیدی شبکه برابر ۶۱۷۷ مگاوات است. مقادیر پارامترهای شبکه ۳۹ باسه نیز مطابق مرجع [۲] می باشد.

در مطالعات انجام شده، اطلاعات بهره برداری شبکه ۳۹ باسه IEEE از محاسبات شبیه سازی توسط نرم افزار DigSILENT برای یک نقطه کار معین حاصل شده است. در واقع مطالعات فوق در یک شرایط خاص بهره برداری انجام شده است. بدیهی است که این مطالعات می تواند در بازه های زمانی مشخصی که تغییرات شرایط بهره برداری شبکه محسوس است تکرار شود.



شکل ۳- شبکه مورد مطالعه- ۳۹ باسه IEEE

۵-۲. سناریوهای مورد مطالعه

طرح پیشنهادی مدعی است، اگر با کمک شاخص استاتیکی نرخ تغییرات توان اکتیو خطوط، ابتدا اولویت‌بندی قطع خطوط مشخص شود و سپس با کمک شاخص دینامیکی خیز اول ژنراتورها فاصله زمانی بین قطع خطوط تعیین گردد و بدین صورت خطوط متصل به پست به صورت برنامه‌ریزی شده قطع گردند، در این صورت پایداری دینامیکی شبکه در موقع حملات گرافیتی بهبود می‌یابد. به منظور یافتن چگونگی عملکرد طرح پیشنهادی، سناریوهای مختلفی بررسی شده است. در هر یک از سناریوهای مورد مطالعه، حمله گرافیتی روی یکی از پست‌های شبکه صورت می‌گیرد.

روش کار در هر سناریو به این صورت است که در ابتدا همه حالات و اولویت‌های ممکن برای قطع خطوط متصل به پست در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال برای پستی که دو خط A و B دارد، ۲ حالت مختلف برای قطع وجود دارد، بدین صورت که در حالت ۱، اول خط A قطع شود و سپس خط B قطع گردد و در حالت ۲ برعکس حالت ۱ رخ دهد یعنی اول خط B قطع شود و سپس خط A قطع گردد.

حال باید برای هر یک از حالات، فواصل زمانی مختلفی بین قطع خطوط در نظر بگیریم. به عنوان مثال برای پستی که دو خط A و B دارد همان‌طور که در بالا اشاره شد ۲ حالت مختلف برای قطع وجود دارد بدین صورت که در حالت ۱، اول خط A در ثانیه صفر قطع شود و سپس خط B قطع گردد. به همین ترتیب در حالت ۲، اول خط B در ثانیه صفر قطع شود و سپس خط A قطع گردد.

پس تا اینجا کاری که صورت گرفته این بود که تمام حالات ممکن برای قطع برنامه‌ریزی شده خطوط متصل به پست در نظر گرفته شده است. در این حالات تمام اولویت‌های ممکن برای قطع و همچنین تمام فواصل زمانی ممکن بین قطع خطوط در هر اولویت در نظر گرفته شده است. بعد از شبیه‌سازی هر حالت نیز تغییرات خیز اول ژنراتوری که در نزدیکی محل حمله گرافیتی قرار دارد ثبت شده است. در ادامه از بین همه حالات ممکن بررسی شده برای تعیین اولویت قطع خطوط و فواصل زمانی بین قطع خطوط حالتی را که در آن شاخص دینامیکی خیز اول ژنراتور به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد به عنوان حالت بهینه انتخاب می‌شود. در حالت بهینه انتخاب شده بررسی می‌شود که اولویت قطع خطوط به چه ترتیب بوده و همچنین فاصله زمانی بین قطع خطوط در این حالت چند میلی‌ثانیه بوده است. بدین ترتیب هم ترتیب و اولویت قطع خطوط مشخص می‌شود و هم فاصله زمانی بین قطع خطوط.

از طرفی بررسی همه سناریوها نشان می‌دهد که حالت بهینه انتخاب شده در هر سناریو که اولویت و فاصله زمانی بین قطع خطوط را تعیین می‌نماید همگی از یک دستورالعمل مشخص پیروی می‌کنند. بدین صورت که در هر سناریو اولویت قطع بهینه و انتخابی دارای این خصوصیت است که اول خطی قطع شده که در صورت قطع آن خط مقدار شاخص استاتیکی میانگین نرخ تغییرات توان اکتیو خطوط در شبکه افزایش بیش‌تری داشته است. همچنین، در هر سناریو فاصله زمانی بین قطع خطوط انتخابی دارای این خصوصیت است که بعد از قطع خط اول و نوسان ژنراتورهای موجود در شبکه، خط دوم زمانی قطع گردیده که زاویه روتور ژنراتور موجود در نزدیکی محل بروز خطا به خیز اول رسیده‌اند. بدین ترتیب یک دستورالعمل مشخص برای قطع خطوط متصل به پست پیدا شده است که اساس طرح پیشنهادی در این مقاله می‌باشد. در ادامه نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی سناریوها آورده شده است.

سناریو ۱: حمله گرافیتی روی باس ۷

دو خط ۷-۶، ۷-۸ به این باس متصل هستند. همچنین ژنراتور شماره ۳۱ نزدیک‌ترین ژنراتور به باس مورد حمله است و بیش‌ترین تأثیر را می‌پذیرد لذا پایداری دینامیکی این ژنراتور مورد بررسی قرار گرفته است. طبق توضیحات داده شده در قسمت ۵-۲ با قطع خطوط متصل به پست با اولویت‌ها و فواصل مختلف زمانی قطع، مطالعات پایداری گذرا در حوزه زمان صورت پذیرفته و تغییرات خیز اول ژنراتور ۳۱ مورد بررسی قرار گرفته که نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است.

برای توضیح جدول (۱) می‌توان گفت که دو خط به باس متصل است لذا دو حالت برای قطع خطوط داریم. البته حالت سومی هم هست که قطع همزمان خطوط را نشان می‌دهد. این حالات در ستون اول جدول با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. ستون دوم نیز زمان قطع اولین قطع را نشان می‌دهد. در مطالعات بلافاصله پس از شناسایی حمله گرافیتی توسط سنسور یعنی در ثانیه صفر خط اول قطع می‌گردد. با قطع اولین خط، میانگین نرخ تغییرات توان اکتیو خروجی خطوط محاسبه شده است که در ستون سوم جدول نشان داده شده است. در ادامه خط دوم نیز قطع شده است. ستون پنجم زمان قطع دومین خط را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دومین خط در زمان‌های مختلفی قطع شده است که بین لحظات صفر تا ۱۰ ثانیه بوده و در ستون چهارم جدول نام‌گذاری شده است. سؤالی که پیش می‌آید این است که چرا این لحظات به عنوان زمان قطع خط دوم برگزیده شده‌اند.

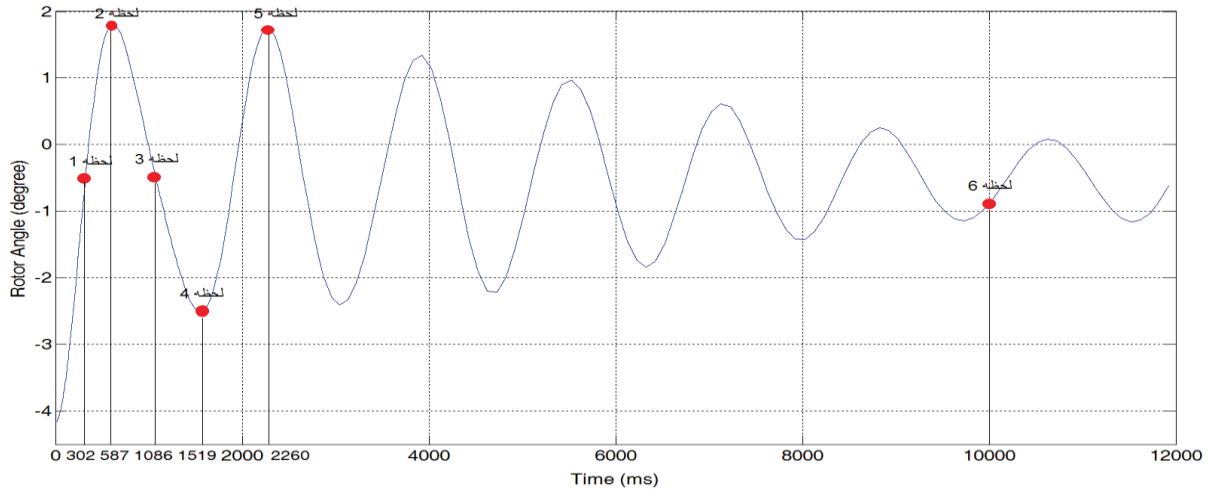
جدول ۱- تغییرات زاویه روتور ژنراتور ۳۱ به ازای اولویت‌ها و زمان‌های مختلف قطع خطوط (مقدار اولیه زاویه روتور ۴,۱-)

| حالت | اولویت قطع | | | | حالت |
|--------|-----------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|------|
| بهبینه | دوم قطع خط ۸-۷ | | اول قطع خط ۶-۷ | | ۱ |
| | خیز اول ژنراتور | زمان قطع خط (ثانیه) | نرخ تغییرات توان خروجی خطوط | زمان قطع خط (ثانیه) | |
| | ۴,۵۸ | ۰,۳۰۲ | ۱۶۲,۹۱ | . | ۱-۱ |
| ✓ | ۳,۷ | ۰,۵۸۷ | | | ۲-۱ |
| | ۷,۱۰ | ۱,۰۸۶ | | | ۳-۱ |
| | ۶,۸۶ | ۱,۵۱۹ | | | ۴-۱ |
| | ۴,۹۶ | ۲,۲۶۰ | | | ۵-۱ |
| | ۵,۲۱ | ۱۰ | | | ۶-۱ |
| | دوم قطع خط ۶-۷ | | اول قطع خط ۸-۷ | | ۲ |
| | خیز اول | زمان قطع خط (ثانیه) | نرخ تغییرات توان خروجی خطوط | زمان قطع خط (ثانیه) | |
| | ۵,۷۶ | ۰,۲۹۱ | ۷۶ | . | ۱-۲ |
| | ۵,۴۲ | ۰,۵۸۷ | | | ۲-۲ |
| | ۶,۲۳ | ۱,۰۴۶ | | | ۳-۲ |
| | ۶,۴۹ | ۱,۶۰۱ | | | ۴-۲ |
| | ۵,۵۷ | ۲,۲۲۶ | | | ۵-۲ |
| | ۵,۸۲ | ۱۰ | | | ۶-۲ |
| | خیز اول | قطع همزمان خطوط | | | ۳ |
| | ۶,۰۲ | | | | |

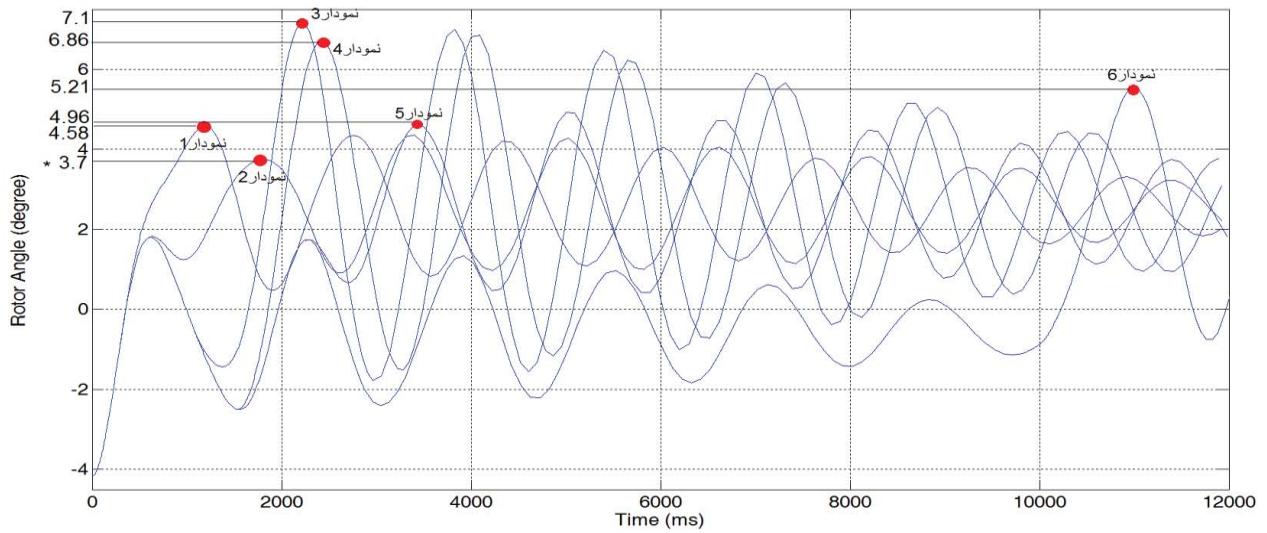
شکل (۶) مشخص گردیده خط دوم یعنی خط ۶-۷ در یکی از لحظات ۷ تا ۱۲ قطع گردیده است که این لحظات در ستون چهارم جدول (۱) نیز قابل مشاهده است. با قطع خط دوم یعنی خط ۶-۷ در یکی از لحظات ۷ تا ۱۲، تغییرات نهایی زاویه رتور ژنراتور ۳۱ به صورت ۶ نمودار حاصل می‌شود که در شکل (۷) با عنوان نمودار ۷ تا ۱۲ قابل مشاهده است.

به این نکته باید توجه داشت که زمان‌های قطع خط دوم یعنی لحظات ۱ تا ۱۲ که به آن‌ها اشاره شد زمان‌های کلیدی برای قطع خط دوم می‌باشند. در این زمان‌ها تغییرات زاویه رتور ژنراتور ۳۱ در نقاط مینیمم و یا ماکزیمم است و یا در شیب صعودی و یا نزولی قرار دارد. این زمان‌های کلیدی برای قطع خط دوم یعنی لحظات ۱ تا ۱۲ به طور کامل در جدول (۲) توضیح داده شده‌اند. بدین ترتیب سعی شده که زمان‌های قطع خط دوم متنوع بوده و بازه زمانی جامعی را پوشش دهد.

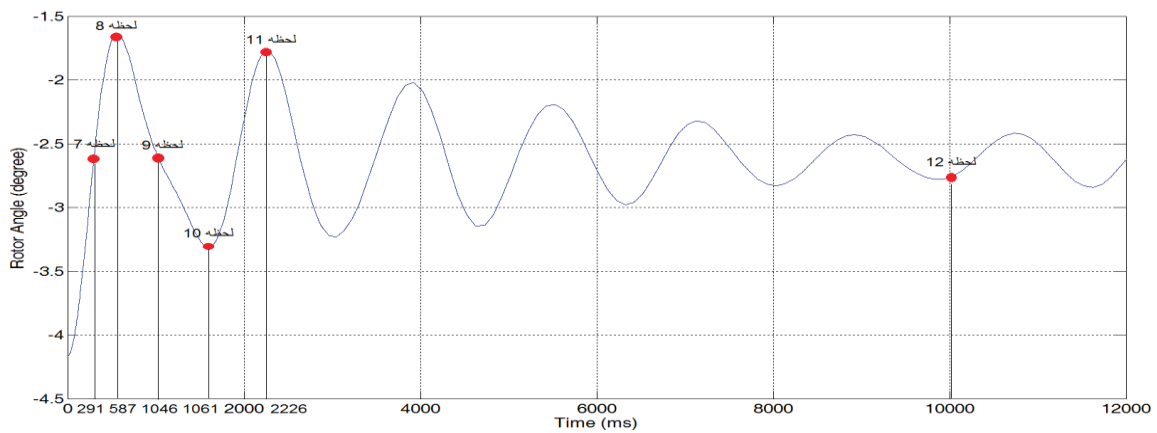
با قطع خط اول یعنی خط ۶-۷ زاویه رتور ژنراتور ۳۱ مطابق شکل (۴) نوسان خواهد کرد. در ادامه همان‌طور که در شکل (۴) مشخص گردیده خط دوم یعنی خط ۸-۷ در یکی از لحظات ۱ تا ۶ قطع گردیده است که این لحظات در ستون چهارم جدول (۱) نیز قابل مشاهده است. با قطع خط دوم یعنی خط ۸-۷ در یکی از لحظات ۱ تا ۶، تغییرات نهایی زاویه رتور ژنراتور ۳۱ به صورت ۶ نمودار حاصل می‌شود که در شکل (۵) با عنوان نمودار ۱ تا ۶ قابل مشاهده است. به عنوان مثال، نمودار ۱ در شکل (۵) نشان‌دهنده تغییرات نهایی زاویه رتور ژنراتور ۳۱ می‌باشد بدین صورت که در ابتدا خط ۶-۷ در ثانیه صفر قطع شده و سپس خط ۸-۷ در ثانیه ۰,۳۰۲ و یا همان لحظه ۱ که در شکل (۴) نشان داده شده قطع می‌گردد. خیز اول نوسانات زاویه رتور در این حالت ۴,۵۸ درجه است. به همین ترتیب اگر اول خط ۸-۷ قطع گردد زاویه رتور ژنراتور ۳۱ مطابق شکل (۶) نوسان خواهد کرد. در ادامه همان‌طور که در



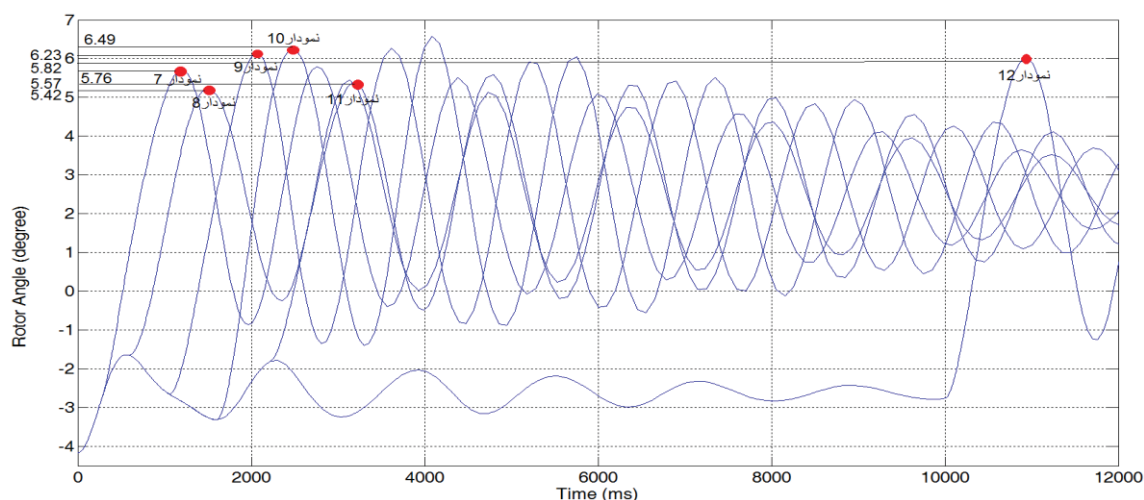
شکل ۴- تغییرات زاویه روتور ژنراتور ۳۱ در صورت قطع خط ۶-۷ در ثانیه ۰



شکل ۵- تغییرات زاویه روتور ژنراتور ۳۱ در صورت قطع خط ۶-۷ در ثانیه ۰ و سپس قطع خط ۷-۸ در لحظات ۱ تا ۶ نشان داده شده در شکل ۴



شکل ۶- تغییرات زاویه روتور ژنراتور ۳۱ در صورت قطع خط ۷-۸ در ثانیه ۰



شکل ۷- تغییرات زاویه روتور ژنراتور ۳۱ در صورت قطع خط ۷-۸ در ثانیه ۰ و سپس قطع خط ۶-۷ در لحظات ۷ تا ۱۲ نشان داده شده در شکل ۶

بیش تر است. با این توضیحات می توان دستورالعمل زیر را استخراج نمود:

تعیین اولویت و ترتیب قطع خطوط با کمک شاخص استاتیکی میانگین نرخ تغییرات توان اکتیو خطوط: بر مبنای این شاخص اول باید خطی قطع شود که در صورت قطع آن خط مقدار این شاخص در شبکه افزایش بیش تری دارد.

همچنین، در حالت بهینه انتخابی بعد از قطع خط اول یعنی خط ۶-۷ و نوسان ژنراتورهای موجود در شبکه طبق شکل (۴)، خط دوم یعنی خط ۷-۸ در لحظه ۲ قطع شده یعنی زمانی که زاویه روتور ژنراتور موجود در نزدیکی محل بروز خطا یعنی ژنراتور ۳۱ به خیز اول رسیده است. با این توضیحات می توان دستورالعمل زیر را استخراج نمود:

تعیین فاصله زمانی بین قطع خطوط با استفاده از شاخص دینامیکی خیز اول ژنراتورها: بدین صورت که ابتدا یک خط قطع می گردد (با کمک شاخص استاتیکی معرفی شده در قسمت قبل مشخص می شود کدام خط اول قطع شود). در این صورت زاویه روتور ژنراتورهای موجود در شبکه نوسان می کنند. در ادامه خط دوم زمانی باید قطع گردد که زاویه روتور ژنراتور موجود در نزدیکی محل بروز خطا به خیز اول رسیده باشد (در پیک نوسانات باشد).

بدین ترتیب دستورالعملی استخراج گردید که این دستورالعمل همان طرح پیشنهادی در این مقاله است و همان طور که مشاهده شد به درستی توانست اولویت و فاصله زمانی بین قطع خطوط را تعیین نماید.

پس در مجموع طرح پیشنهادی بدین صورت عمل می کند که با کمک شاخص استاتیکی ابتدا اولویت و ترتیب قطع و با کمک شاخص دینامیکی فاصله زمانی بین قطع خطوط را تعیین کرده و خطوط متصل به پست را به صورت برنامه ریزی شده قطع می کند. با اعمال این

به این ترتیب بعد از قطع هر دو خط متصل به پست، ۱۲ نمودار حاصل شد که در شکل های (۵) و (۷) قابل مشاهده است. سپس شاخص خیز اول که ملاک سنجش میزان پایداری دینامیکی در این مقاله بود برای آن ها محاسبه گردید که مقادیر به دست آمده در ستون آخر جدول (۱) قابل مشاهده است..

همان طور که مشاهده می شود شاخص خیز اول ژنراتور برای نمودار ۲ که متناظر با حالت ۱-۲ در جدول (۱) و یا همان لحظه ۲ است به کم ترین مقدار خود یعنی ۳٫۷ درجه رسیده است. لذا این حالت به عنوان حالت بهینه برگزیده جهت قطع برنامه ریزی شده خطوط متصل به پست برگزیده می شود. نتیجه به دست آمده از بررسی حالت ۱-۲ به صورت زیر است:

• اولویت قطع خطوط:

اول قطع خط ۶-۷، دوم قطع خط ۸-۷

• فاصله زمانی بین قطع خطوط:

قطع خط ۶-۷ در ثانیه صفر، قطع خط ۸-۷ در ثانیه ۰٫۵۸۷

به زبان ساده تر یعنی این که اول باید خط ۶-۷ قطع شود و بعد از گذشت ۵۸۷ میلی ثانیه خط ۸-۷ قطع گردد.

از طرفی مشاهده می شود که حالت بهینه انتخابی برای قطع برنامه ریزی شده خطوط از یک دستورالعمل مشخص پیروی کرده است که به قرار زیر است:

در حالت بهینه انتخابی، مقدار شاخص استاتیکی میانگین نرخ تغییرات توان اکتیو خطوط در شبکه نسبت به حالت دیگر افزایش بیش تری داشت. به عبارت دیگر همان طور که در ستون سوم جدول (۱) نشان داده شده است، در صورتی که اول خط ۶-۷ قطع شود مقدار این شاخص ۱۶۲٫۹۱ است و در صورتی که اول خط ۸-۷ قطع شود مقدار این شاخص ۷۶ است. طبق حالت بهینه انتخابی، اول خط ۶-۷ قطع شده است و همان طور که مشاهده می شود مقدار این شاخص در آن

طرح پیشنهادی در موقع حمله گرافیتی، پیک کلی نوسانات یا همان شاخص دینامیکی تغییرات خیز اول ژنراتورها به کم‌ترین مقدار خود خواهد رسید و امنیت دینامیکی شبکه در موقع حملات گرافیتی افزایش خواهد یافت.

جدول ۲- لحظاتی که خط دوم در آن لحظات قطع گردیده است

| شماره | توصیف لحظه‌ی قطع خط دوم |
|---------|--|
| لحظه ۱ | زمانی است که خط ۶-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ در حال افزایش به سوی خیز اول است. زاویه روتور در این زمان برابر با حالت ماندگار زاویه روتور ژنراتور ۳۱ است. |
| لحظه ۲ | زمانی است که خط ۶-۷ قطع شده و زاویه‌ی روتور ژنراتور ۳۱ به خیز اول رسیده است. |
| لحظه ۳ | زمانی است که خط ۶-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ از خیز اول گذشته است. زاویه روتور در این زمان برابر با حالت ماندگار زاویه روتور ژنراتور ۳۱ است. |
| لحظه ۴ | زمانی است که خط ۶-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ به خیز دوم رسیده است. |
| لحظه ۵ | زمانی است که خط ۶-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ به خیز سوم رسیده است. |
| لحظه ۶ | زمانی است که خط ۶-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ به مقدار ماندگار رسیده است. |
| لحظه ۷ | زمانی است که خط ۸-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ در حال افزایش به سوی خیز اول است. زاویه روتور در این زمان برابر با حالت ماندگار زاویه روتور ژنراتور ۳۱ است. |
| لحظه ۸ | زمانی است که خط ۸-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ به خیز اول رسیده است. |
| لحظه ۹ | زمانی است که خط ۸-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ از خیز اول گذشته است. زاویه روتور در این زمان برابر با حالت ماندگار زاویه روتور ژنراتور ۳۱ است. |
| لحظه ۱۰ | زمانی است که خط ۸-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ به خیز دوم رسیده است. |
| لحظه ۱۱ | زمانی است که خط ۸-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ به خیز سوم رسیده است. |
| لحظه ۱۲ | زمانی است که خط ۸-۷ قطع شده و زاویه روتور ژنراتور ۳۱ به مقدار ماندگار رسیده است. |

گرافیتی است و باعث افزایش پایداری سیستم قدرت در موقع حملات گرافیتی می‌گردد.

همچنین به این نکته باید توجه کرد که این مطالعات آفلاین است و با کمک طرح پیشنهادی می‌توان برای هر پست از قبل اولویت قطع و فاصله زمانی بین قطع خطوط را مشخص کرد و برنامه تهیه شده را به سیستم اعمال نمود. با این اقدام در موقع اعلام حمله گرافیتی به یک پست و قبل از تماس الیاف گرافیت با شبکه، تصمیم‌گیری در خصوص قطع برنامه‌ریزی شده خطوط متصل به پستی که مورد حمله واقع شده با کمک طرح پیشنهادی و به صورت خودکار صورت می‌پذیرد.

نکته دیگری که می‌توان به آن توجه کرد این است که در سناریوهایی که تا کنون بررسی گردید با وقوع حمله گرافیتی و قطع خطوط متصل به پست، شبکه از سنکرون خارج نمی‌شود و می‌توان با کمک طرح پیشنهادی اولویت و فاصله زمانی بین خطوط را تعیین کرده و خطوط متصل به پست را به صورت برنامه‌ریزی شده قطع کرد. اما در بعضی از سناریوها در صورت قطع حتی یک خط از خطوط متصل به پستی که مورد حمله واقع شده، شبکه از سنکرون خارج می‌شود و در واقع قطع خطوط، باعث ناپایداری می‌گردد و در این مواقع طرح پیشنهادی کارساز نیست. لذا در این مواقع می‌توان اقدام به جزیره‌سازی ناحیه بروز خطا کرد. در ادامه یک نمونه از این گونه سناریوها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

نکته دیگری که در جدول (۱) باید به آن توجه داشت این است که شاید انتظار می‌رفت هرچه فاصله زمانی بین قطع خطوط بیش‌تر باشد (لحظات ۶ و ۱۲) شاخص مورد بررسی یعنی تغییرات خیز اول ژنراتورها کم‌تر شود، اما نتایج نشان دادند که این‌گونه نیست و فاصله زمانی بین قطع خطوط باید طبق طرح پیشنهادی تعیین شود.

تاکنون نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریو ۱ به‌طور کامل توضیح داده شد و نتایج استخراجی از آن به‌طور کامل تجزیه و تحلیل گردید و صحت طرح پیشنهادی مشخص شد. اما از آنجایی که روش پیشنهادی یک روش سناریو محور است با یک سناریو نمی‌توان درستی آن را اثبات کرد و نیاز به ایجاد سناریوهای بیش‌تر و بررسی آن‌ها می‌باشد.

در ادامه سناریوهای دیگری ایجاد می‌شود و تمام مطالعات انجام شده برای سناریوی ۱ برای بقیه سناریوها نیز صورت می‌پذیرد که نتایج بررسی‌ها به‌طور خلاصه در جدول (۳) نشان داده شده است.

در جدول (۳) اولویت و فاصله زمانی بین قطع خطوط با کمک طرح پیشنهادی به‌دست آمده و با حالت بهینه‌ای که با بررسی همه حالات به‌دست آمده و جوابی صد در صد صحیح است مقایسه شده است. همان‌طور که از جدول فوق مشاهده می‌شود نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی در همه سناریوها حالت بهینه قطع خطوط را به دست می‌آورد، لذا طرح پیشنهادی طرحی قابل‌اتکا برای تعیین اولویت و فاصله زمانی بین قطع خطوط در موقع حملات

جدول ۳- قطع برنامه‌ریزی شده خطوط متصل به پست در سناریوهای مختلف حمله گرافیتی

| شماره سناریو | محل حمله گرافیتی | اولویت قطع خطوط | | فاصله زمانی بین قطع خطوط (ثانیه) | |
|--------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| | | با کمک بررسی همه حالات | با کمک طرح پیشنهادی | با کمک بررسی همه حالات | با کمک طرح پیشنهادی |
| سناریو ۲ | باس ۲۸ | اول قطع خط ۲۹-۲۸ دوم قطع خط ۲۶-۲۸ | اول قطع خط ۲۹-۲۸ دوم قطع خط ۲۶-۲۸ | ۰,۵۶۵ | ۰,۵۶۵ |
| سناریو ۳ | باس ۱ | اول قطع خط ۲-۱ دوم قطع خط ۳۹-۱ | اول قطع خط ۲-۱ دوم قطع خط ۳۹-۱ | ۱,۰۱ | ۱,۰۱ |
| سناریو ۴ | باس ۱۷ | اول قطع خط ۱۶-۱۷ دوم قطع خط ۱۷-۱۸ | اول قطع خط ۱۶-۱۷ دوم قطع خط ۱۷-۱۸ | ۰,۷۵۳ | ۰,۷۵۳ |
| سناریو ۵ | باس ۲۴ | اول قطع خط ۲۴-۱۶ دوم قطع خط ۲۴-۲۳ | اول قطع خط ۲۴-۱۶ دوم قطع خط ۲۴-۲۳ | ۰,۹۵۳ | ۰,۹۵۳ |
| سناریو ۶ | باس ۲۱ | اول قطع خط ۲۱-۱۶ دوم قطع خط ۲۱-۲۲ | اول قطع خط ۲۱-۱۶ دوم قطع خط ۲۱-۲۲ | ۲,۱۳۴ | ۲,۱۳۴ |
| سناریو ۷ | باس ۱۲ | اول قطع خط ۱۲-۱۳ دوم قطع خط ۱۲-۱۱ | اول قطع خط ۱۲-۱۳ دوم قطع خط ۱۲-۱۱ | ۱,۲۴۰ | ۱,۲۴۰ |
| سناریو ۸ | باس ۱۳ | اول قطع خط ۱۳-۱۰ دوم قطع خط ۱۳-۱۲ | اول قطع خط ۱۳-۱۰ دوم قطع خط ۱۳-۱۲ | ۱,۲۰۲ | ۱,۲۰۲ |
| سناریو ۹ | باس ۹ | اول قطع خط ۹-۸ دوم قطع خط ۹-۳۹ | اول قطع خط ۹-۸ دوم قطع خط ۹-۳۹ | ۰,۷۴۳ | ۰,۷۴۳ |

جدول ۴- گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری شبکه ۳۹ باسه

| شماره ژنراتور | گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری |
|---------------|--------------------------|
| ۳۸ و ۳۷ | گروه اول |
| ۳۹ و ۳۱ و ۳۰ | گروه دوم |
| ۳۴ و ۳۳ و ۳۲ | گروه سوم |
| ۳۶ و ۳۵ | گروه چهارم |

لازم به ذکر است سناریوهایی که نیاز به جزیره‌سازی دارند اساس کار این مقاله نمی‌باشند و صرفاً برای بررسی تمام حالات ممکن در موقع حملات گرافیتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و البته برای این‌گونه سناریوها یک راه‌کار که همان جزیره‌سازی ناحیه بروز خطا است ارائه گردیده است.

سناریو ۱۰: حمله گرافیتی روی باس ۱۶

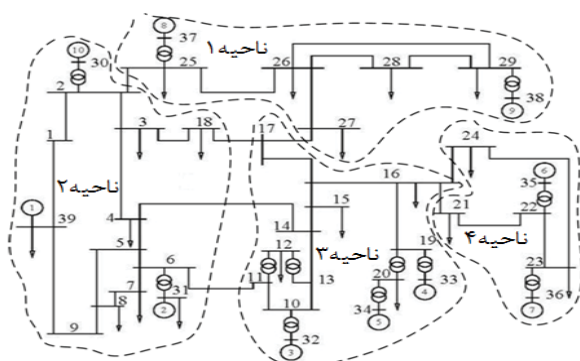
پنج خط به این باس متصل هستند که در صورت قطع خطوط، شبکه ناپایدار می‌گردد، لذا باید قسمتی از شبکه را که باس ۱۶ در

آن واقع شده است را از بقیه شبکه جدا کنیم که این کار را جزیره‌سازی می‌نامند.

در واقع یکی از راه‌کارهایی که برای ارتقاء امنیت سیستم‌های قدرت در برابر ایجاد جزایر ناخواسته و پیدایش خاموشی شبکه می‌توان اعمال کرد، روش تجزیه شبکه قدرت به جزایر عمده و کنترل شده می‌باشد.

در شرایط بحرانی که سیستم قدرت به سمت تجزیه و فروپاشی حرکت می‌کند، چنانچه بتوان شبکه را به جزایر قابل کنترل تجزیه نمود، در این صورت می‌توان با حداقل میزان بار از دست‌رفته میزان خاموشی را کاهش داد.

لازم به ذکر است که شبکه ۳۹ باسه مورد مطالعه به‌گونه‌ای است که از چهار ناحیه هم‌نوی ژنراتوری به شرح جدول زیر تشکیل شده است.



شکل ۸- گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری شبکه ۳۹ باسه

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود این چهار ناحیه هم‌نوی ژنراتوری توسط خطوطی به یک‌دیگر متصل می‌باشند.

باس ۱۶ در ناحیه ۳ قرار دارد و با وقوع حمله گرافیتی روی باس ۱۶ باید ناحیه ۳ که در آن خطا رخ داده است را از بقیه شبکه ایزوله

نظر دینامیکی ناپایدار گشته است.

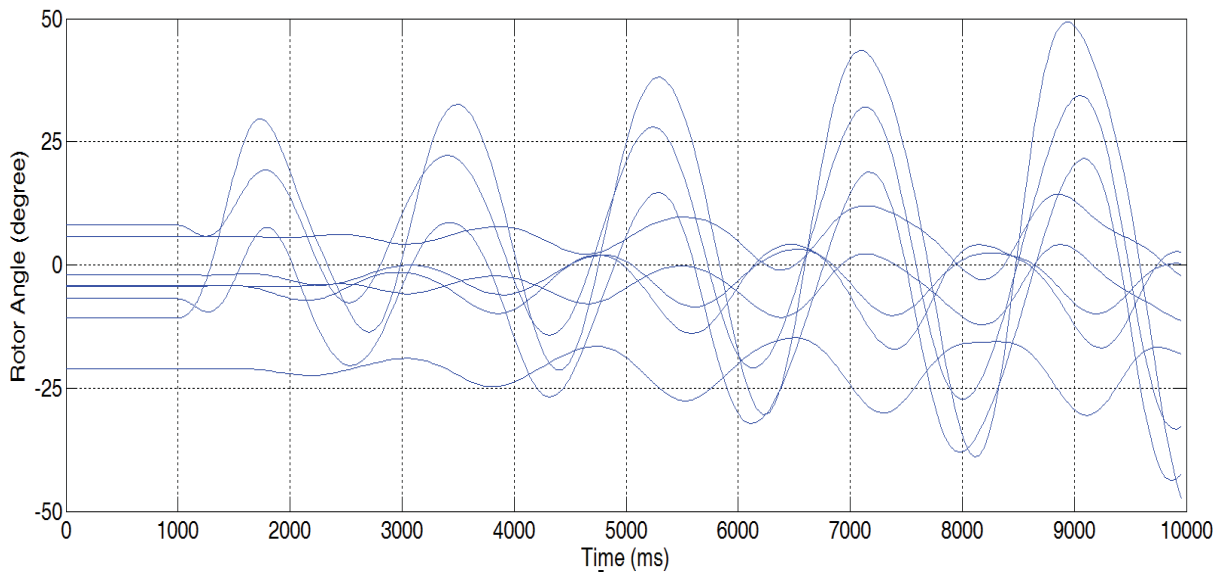
در صورت جزیره‌سازی ناحیه بروز خطا:

در صورت شناسایی حمله گرافیتی و جزیره‌سازی ناحیه بروز خطا تغییرات زاویه روتور ژنراتورهای خارج از ناحیه بروز خطا به صورت شکل (۱۰) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با جزیره‌سازی ناحیه بروز خطا (ناحیه ۳)، بقیه شبکه از نظر دینامیکی پایدار می‌گردد و می‌تواند بدون مشکل به کارکرد عادی خود ادامه دهد.

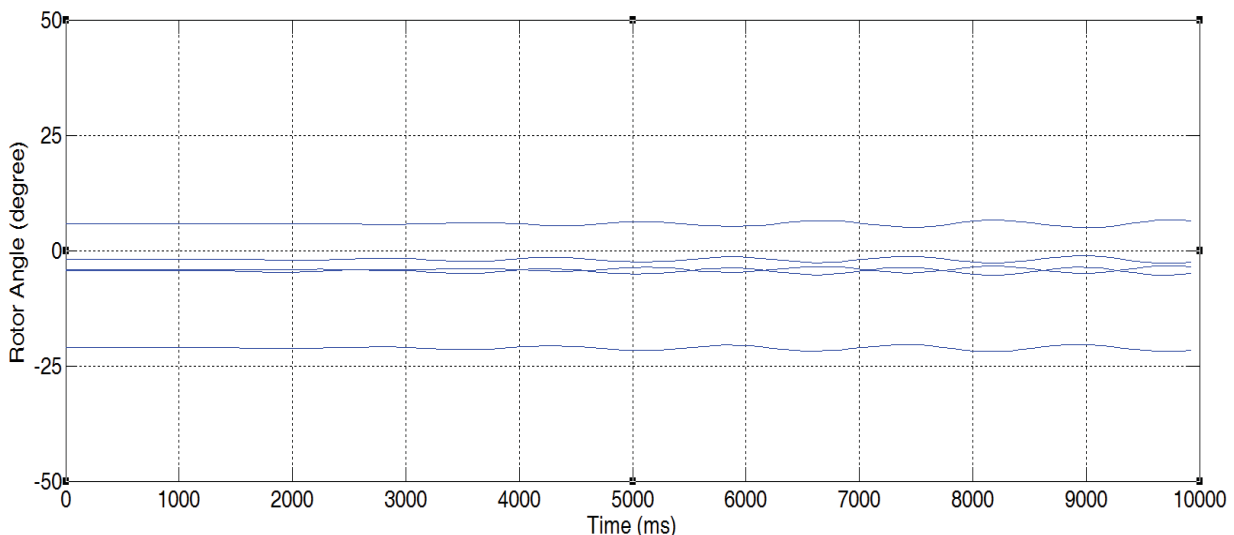
و جزیره‌سازی نمود. برای این منظور باید خطوطی که به ناحیه ۳ متصل هستند قطع شوند. با این کار بقیه نواحی می‌توانند بدون مشکل به فعالیت خود ادامه دهند.

در صورت جزیره‌سازی نشدن ناحیه بروز خطا:

در صورت قطع یکی از خطوط متصل به پست مورد حمله و جزیره‌سازی نشدن ناحیه بروز خطا تغییرات زاویه روتور ژنراتورهای شبکه به صورت شکل (۹) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در صورت جزیره‌سازی نشدن ناحیه بروز خطا، کل شبکه از



شکل ۹- تغییرات زاویه رتور ژنراتورهای شبکه ۳۹ باسه بدون اعمال جزیره‌سازی



شکل ۱۰- تغییرات زاویه رتور ژنراتورهای شبکه ۳۹ باسه (به جز ژنراتورهای ناحیه بروز خطا) در صورت اعمال جزیره‌سازی

systems,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, pp. 152-158, 2013.

6. 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, pp. 153-159, 2013.
7. 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, Issue 1, pp. 357-363, January 2013.
8. 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, Issue 1, pp. 318-325, January 2013.
9. 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, Issue 1, pp. 259-266, January 2013.
10. K. Sun and M. Jin, “Online pre-analysis and real-time matching for controlled splitting of large-scale power network,” Proc. Int. Conf. Futher Power System Netherland, pp. 1-6, 2005.
11. S. S. Ahmad, N. C. Sarker, A. B. Khairuddin, M. R. B. A. Ghani, and H. Ahmad, “A sheme for controlled islanding to prevnt subsequent blackout” IEEE Trans. Power System, Vol. 1, no. 1, pp. 136-143, 2003
12. 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, Issue 7, pp. 4994-5006, September 2012.
13. G. Shabib, “Implementation of a discrete fuzzy PID excitation controller for power system damping,” Ain Shams Engineering Journal, vol. 3, Issue 2, pp. 123-131, June 2012.
14. 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, Issue 1, pp. 50-57, May 2012.
15. S. Ding, S. Li, and W. X. Zheng, “Nonsmooth stabilization of a class of nonlinear cascaded systems,” Automatica, vol. 48, Issue 10, pp. 2597-2606, October 2012.
16. H. Huang, Q. He. Wu, and H. Li, “Synthesis for Spatially Interconnected Systems with Distributed Output Feedback Controllers,” Acta Automatica Sinica, vol. 35, Issue 8, pp. 1128-1135, August 2009.
17. S. Dasgupta, M. Paramasivam, U. Vaidya, and V. Ajjarapu, “PMU-based model-free approach for real-time rotor angle monitoring,” Power Systems, IEEE Transactions, Issue 99, 2014.
18. S. Zadkhast, J. Jatskevich, E. Vaahedi, and A. Alimardani, “A new adaptive dynamic reduction method for power system transient stability problems,” Electric Power Systems Research, vol. 115, pp. 102-110, October 2014.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله طرحی برای کاهش خسارات و افزایش پایداری دینامیکی سیستم قدرت در موقع حملات گرافیتی پیشنهاد گردید. طرح پیشنهادی بر مبنای قطع برنامه ریزی شده خطوط بود به این صورت که ابتدا باید ترتیب و اولویت قطع خطوط متصل به پستی که مورد حمله گرافیتی قرار گرفته مشخص شده و سپس زمان قطع هر خط مشخص می گردید.

طبق طرح پیشنهادی برای تعیین اولویت بندی خطوط جهت قطع از شاخص استاتیکی میانگین نرخ تغییرات توان اکتیو خطوط استفاده شد به این ترتیب که ابتدا باید خطی قطع می گردید که در صورت قطع آن خط مقدار این شاخص استاتیکی در شبکه افزایش بیش تری داشت. همچنین، برای تعیین زمان قطع هر خط از شاخص دینامیکی خیز اول زاویه روتور ژنراتورها استفاده شد به این ترتیب که بعد از قطع خط اول و نوسان ژنراتورهای موجود در شبکه، خط دوم باید زمانی قطع می گردید که زاویه روتور ژنراتور موجود در نزدیکی محل بروز خطا به خیز اول رسیده باشد.

طرح پیشنهادی روی شبکه ۳۹ باسه IEEE پیاده سازی گردید و صحت آن اثبات شد. نتایج نشان دادند با قطع برنامه ریزی شده خطوط متصل به پستی که مورد حمله گرافیتی واقع شده هم شبکه در کنترل بهره بردار خواهد بود و هم پاک سازی محل حمله به راحتی انجام خواهد شد زیرا اتصال کوتاه به وجود نمی آید. در نهایت نیز سیستم کم تر دچار تنش خواهد شد و پایداری دینامیکی شبکه بهبود می یابد. لذا طرح پیشنهادی اثربخش بوده و در موقع حملات گرافیتی می توان از آن استفاده نمود.

همچنین در بعضی پست ها با وقوع حمله گرافیتی و قطع خطوط، شبکه از سنکرون خارج می شد. در این مواقع طرح پیشنهادی کار ساز نبوده و می توان اقدام به جزیره سازی ناحیه بروز خطا کرد.

۷. مراجع

1. M. Ebrahimzhad, “Introduction to non-lethal facility,” Malek Ashtar University Publications, summer 1388.
2. R. Ghaffarpour and S. R. Mirmotahari, “Reduction of graphite bomb damages by considering power system stability” Passive Defense Quarterly, vol. 4, no. 1 (Serial no. 13), Spring 2013.
3. W. Fang, F. Shunshan, W. Wenxuan, and L. Fuwang, “Analysis of action mechanism of graphite bombs and reaction method of power system,” Power System Technology (POWERCON), International Conference on 2010.
4. G. Shaotong, F. Xiang, H. Guodong, T. Jiayan, G. Feng, D. Jianyong, “Defending power systems against graphite bombs using EM early warning system,” Electric Power Construction, vol. 30, no. 4, pp. 48-51, 2009.
5. A. R. Abbasi and A. R. Seifi, “A new coordinated approach to state estimation in integrated power

Determination Priority of Lines Interrupt Connected to Substation for Reduction of Graphite Bomb Damages

R. Ghafarpour*, A. Ahmadi

Abstract

The Graphite Bomb (GB) is one of the military applications of graphite fiber and the power system substations are the critical locations to do this attack. By throwing a GB on a substation, severe short circuit faults and simultaneous lines outages will be very probable which endanger power system stability. With the assumption of graphite attack detection, the purpose of this study is proposing a remedial scheme to reduce the GB damages and to increase the power system dynamic stability consequently. In other words the lines breakers should open by a predetermined plan, before hitting the GB to the substation. To achieve this goal, two issues have been considered, including: the lines outages priority and the time interval between outages. The static index of average rate of change of the line active power and the dynamic index of the first swing of generators used respectively to solve the issues. The proposed scheme performance has been evaluated on the IEEE 39-bus test system and the results show its effectiveness to improve power system dynamic stability.

Key Words: *Graphite Bomb, Short Circuit Fault, Power System Stability, Attacked Substation, Transmission Lines Outage Plan*

* Imam Hussein Comprehensive University (Rghaffarpour@ihu.ac.ir)- Writer-in-Charge