Archive of SID

مدیریت مخاطرات محیطی (دانش مخاطرات سابق)/ دورهٔ ۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۸/ ص ۸۱-۶۷
DOI: 10.22059/jhsci.2019.275852.442

واکاوی آسیب‌پذیری و امنیت خطوط انتقال برق در استان زنجان

مجید خانمحمدی
دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه خوارزمی
حسین محمدی*
استاد و عضو هیأت علمی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ جغرافیا، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۲۲ – تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۳/۲۶)

چکیده

شرایط بد آب‌وهوایی ممکن است امنیت انتقال برق را در شبکهٔ انتقال بر اثر خرابی‌های آبشاری به خطر اندازد. برطرف نشدن این خرابی‌ها، استفاده از این خطوط را دشوار و حتی ناممکن می‌کند. هدف از تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری، یافتن زیرساختارهای ضعیف یا موقعیت‌های بحرانی است تا تصمیم‌گیرندگان، اقدامات احتمالی را برای کاهش ضعف‌ها و حالت بحرانی انجام دهند؛ بر این اساس باید سنجه‌های آسیب‌پذیری برای کمک به تصمیم‌گیرندگان ایجاد شوند. شاخص کلی آسیب‌پذیری، عاملی ضروری برای مقایسهٔ موارد مختلف آسیب‌پذیری شبکهٔ انتقال یا رویدادهای شرایط آب‌وهوایی نامساعد است. نکتهٔ مهم‌تر این است که باید مناطق ضعیف در شبکه مشخص شوند تا اقداماتی برای کاهش آسیب‌پذیری انجام گیرد. در نتیجه، این مدل ارزیابی آسیب‌پذیری همبستگی‌های مکان – زمان شرایط دشوار آب‌وهوایی را در نظر می‌گیرد و مفاهیم موجود را در چارچوبی واحد تلفیق می‌کند. هدف اصلی این مقاله، بحث در زمینهٔ آسیب‌پذیری خطوط انتقال برق در مقابل مخاطرات جوی است؛ روش‌های کنونی به‌طور همزمان، همبستگی‌های مکانی- زمانی شرایط آب‌وهوایی و مدل‌های الکتریکی سیستم‌های قدرت را در نظر نمی‌گیرند. آنها بر شبیه‌سازی سیستم‌های برق بدون توجه به شرایط دشوار آب‌وهوا یا بر پیش‌بینی قطع برق خطوط هوایی انتقال برق بدون توجه به پیامدهای قطع برق تمرکز می‌کنند. بنابراین در این پژوهش هستهٔ اصلی ارزیابی آسیب‌پذیری با آنالیز اقتضایی انجام می‌گیرد تا شاخص‌های آسیب‌پذیری اقتباس شوند. در نهایت می‌توان اقداماتی را برای کاهش آسیب‌پذیری مشخص کرد.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، خطوط انتقال برق، شرایط آب‌وهوایی، زنجان.

* نویسندهٔ مسئول
Email: hmmohammadi@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

صنعت برق که بیش از دو قرن پیش پدید آمده، تأثیر شگرفی در زندگی انسان داشته و به جرأت می‌توان گفت آسایش امروزی بشر تا حد زیادی مدیون شکوفایی این صنعت است [۳]. میانگین مصرف انرژی برق، سالانه ۲/۴ درصد افزایش می‌یابد. این عدد در کشورهای آسیایی در حال توسعه در حدود ۲/۷ درصد است. با این‌حال، هنوز ۱/۶ میلیارد نفر در جهان از انرژی برق بی‌بهره‌اند که تا سال ۲۰۲۰ ممکن است به ۲ میلیارد نفر برسند. اعداد مذکور، سرمایه‌گذاری‌های کلان کشورهای مختلف برای تأمین، انتقال، توزیع و کنترل انرژی برق را توجیه می‌کند [۹]. یکی از عوامل مؤثر در ناپایداری سیستم‌های انتقال برق، ناهماهنگی در تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی به‌علت به‌کارگیری تجهیزات نامناسب است. عملکرد صحیح و بهینهٔ مقره‌ها به شرایط محیطی بستگی دارد؛ از این‌رو آلودگی محیط در فروپاشی مقره‌های خطوط انتقال تأثیر زیادی دارد [۱۲].

خطوط نیروی طولانی‌تر که برای توزیع برق احداث می‌شوند، در برابر برخی عوامل نامساعد جوی همچون بادهای شدید و رطوبت زیاد، آسیب‌پذیرند [۲]. از مشکلات خطوط انتقال نیرو در مناطق برفگیر و بادگیر، می‌توان به نوسان هادی‌ها و پارگی آنها در اثر وجود یخ روی آنها و نیز وزش بادهای شدید اشاره کرد. توفان‌های یخی یا سرماریزه از مخاطرات مهم زمستان محسوب می‌شود. در پی این توفان‌ها، قطر یخ شفاف روی سطوح باز افزایش می‌یابد و در نتیجه ممکن است وزن یخ به اندازه‌ای برسد که آنها را پایین بیاورد [۱۴]. نشست آلودگی روی عایق خارجی خطوط و شبکه‌های انتقال و توزیع در مناطق ساحلی جنوب کشور (خلیج فارس و دریای عمان)، عامل اصلی خطاهای عایقی و خاموشی‌های ناخواسته محسوب می‌شود. شدت و نوع آلودگی دریایی (بیابانی در کنار شرایط حاد محیطی منطقه به لحاظ دورهٔ بارش، ترکیبات، دما)، رطوبت و بادهای دریایی و وقوع مکرر پدیدهٔ شبنم، سبب حل شدن لایهٔ آلوده بر روی مقره می‌شود که در پی آن، مسیری الکترولیت پدید می‌آید که موجب عبور جریان نشتی و در نهایت، تخلیهٔ سطحی می‌شود [۱۰]. هادی‌های آلومینیومی به‌کاررفته در خطوط انتقال برق باید دارای ویژگی‌های مطلوبی همچون هدایت الکتریکی و پایداری زیاد، مقاومت در برابر خوردگی، استحکام ، وزن، قطر مناسب و ... باشند [۱۳]. دمای زیاد نیز از دیگر عوامل آب‌وهوایی است که تأثیرات نامطلوبی بر دستگاه‌های الکتریکی دارد و سبب اختلال در کار آنها می‌شود. توجه به تأثیرات دما بر قسمت‌های حساس وسایل و تجهیزات الکتریکی از اهمیت خاصی برخوردار است [۶]. از دیگر عوامل نیز می‌توان هوای شرجی، خاک‌های حاوی نمک، دوره‌های خشکی طولانی، توفان‌های گردوخاک به‌ویژه در فصل گرما، پرتو شدید خورشید و به‌طور کلی جو آلوده را نام برد که بر تجهیزات و ملزومات شبکه‌های نیرو تأثیر می‌گذارند [۸].

www.SID.ir

Archive of SID

برای تجزیه‌وتحلیل بهتر، با توجه به همبستگی مکان- زمان و تأثیر CMC[1] بـر امنیـت تـأمین برق، به‌طور خاص بر ارزیابی احتمال بروز شرایط اقتضایی حالت متداول (CMC) تمرکز مـی‌شـود. روش‌های ارزیابی تأثیر آب‌وهوا بر امنیت تأمین برق را می‌توان به سه گروه تفکیک کرد.

۱. روش بیلینگتون و همکاران

در این روش، ارزش پایایی طی شرایط آب‌وهوایی نرمال، نامساعد و شدید ارزیابی مـی‌شـود. هـدف از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو این است که رفتار واقعی سیستم در زمینـهٔ سـطح مصـرف و حالـت‌هـای خطوط انتقال برق مشخص شود. این خطوط در دو حالت (در حال اجرا و خراب) هستند. انتقال بین این دو حالت ناشی از نرخ خرابی و تعمیر است. ایـن روش مـی‌توانـد پایـایی سیسـتم‌هـای پیچیـدهٔ الکتریکی را براساس شاخص‌های گوناگون ارزیابی کند؛ بـا وجـود ایـن، ارزیـابی پایـایی طـی شـرایط دشوار آب‌وهوا به یک ایراد بزرگ دچار است که همبستگی مکانی– زمـانی شـرایط آب‌وهـوایی را در نظر نمی‌گیرد. شرایط آب‌وهوایی با توجه به زمان، مکان و شدت بسیار متغیرنـد کـه نشـان مـی‌دهـد شرایط بد آب‌وهوایی بعدی می‌تواند بسیار متفاوت با چیزی باشد که پیشتر تجربه شده است.

۲. دومین روش دارای مزیت مجموعه داده‌های مربوط به خرابی‌هـای مـرتبط بـا شـرایط دشـوار آب‌وهوایی است. این روش یادگیری آماری به استنباط بین خسارت‌های واقعی و متغیرهای توصـیفی می‌پردازد. گیکما به بررسی روش‌های اصلی و محدودیت‌های آنها مـی‌پـردازد. مـدل ترکیبـی خطـی برای پیش‌بینی تعداد توفان‌ها و یخبندان‌ها و رابطهٔ آن با قطع برق توسط لئو و همکاران به‌کار گرفتـه شده‌اند. این مدل براساس تعمیم رگرسیون حداقل مربع اسـت کـه اثرهـای تصـادفی پـس از توزیـع نرمال را در بر می‌گیرد. پیش‌بینی خسارت‌های وارد به زیرسـاختارها در سـطح یـک شـهر مـی‌توانـد اطلاعات مناسبی را پیش از وقوع مخاطرات طبیعی در اختیار شرکت‌های تأمین برق قـرار دهـد، امـا فقط خسـارت‌هـای فیزیکـی وارد بـه زیرسـاختارهای توزیـع بـرای یـک شـرایط آب‌وهـوایی معـین پیش‌بینی‌پذیر است و با این روش نمی‌توان امنیت تأمین برق را ارزیابی کرد، زیـرا هـیچ مـدلی بـرای سیستم‌های الکتریکی وجود ندارد.

۳. آخرین روش مورد تحقیق براساس شـبیه‌سـازی‌هـای مکـانی– زمـانی بـا توجـه بـه شـرایط آب‌وهوایی است. این روش شامل اعمال یک توالی از نقشـه‌هـای شـرایط آب‌وهـوایی در یـک قلمـرو حاوی زیرساختارهای آسیب‌پذیر است؛ بنابراین در معرض قرار گرفتن آنهـا از طریـق توابـع خسـارت مورد انتظار تغییر می‌کند. این روش در حال حاضر برای برآورد خسـارت بیمـه در زمینـهٔ مخـاطرات

۱. شرایط بد آب‌وهوایی

www.SID.ir

Archive of SID

طبیعی چون توفان یا زلزله به‌کار رفته است. این روش می‌تواند همبستگی مکانی – زمانی شرایط بد آب‌وهوایی را مدل‌سازی کند.

در نتیجه این سه روش مزایا و معایبی با الهام از شیوهٔ جدید ارزیابی آسیب‌پذیری در شرایط شدید آب‌وهوایی براساس شبیه‌سازی‌ها دارند. می‌توان همبستگی‌های مکانی– زمانی و توزیع جغرافیایی خطوط انتقال هوایی را تلفیق کرد تا CMCهای احتمالی شناسایی شود؛ بنابراین هستهٔ اصلی ارزیابی آسیب‌پذیری با آنالیز اقتضایی انجام می‌گیرد تا شاخص‌های آسیب‌پذیری با الهام از اولین روش اقتباس شوند. در نهایت می‌توان اقداماتی را برای کاهش آسیب‌پذیری مشخص کرد.

بنا به یافته‌های میشل و باگدن [۲۶]، پدیده‌های آب‌وهوایی شدید با تأثیر بر خطوط انتقال برق از عوامل مهم تضعیف شبکهٔ انتقال قدرت به‌شمار می‌روند. تراکم برف در خطوط انتقال قدرت می‌تواند سبب اضافه‌بار بیش از حد استقامت مکانیکی شود. به گفتهٔ مک‌کانن [۲۶]، وقوع تلفات کرونا در کابل‌های انتقال برق با ضخامت شبنم یخ‌زده در طی مدلی از داده‌های میدانی مشاهده‌شده، بیانگر آن است که با افزایش ضخامت شبنم یخ‌زده، هدررفت نیز افزایش یافته است. پرچکانی [۴] روش تجزیه‌وتحلیل جدیدی را برای تعیین بارگذاری باد در هادی‌های خطوط انتقال براساس تعامل مایع ساختار (FSI)[1] ارائه کرده است. نتایج FSI عملکرد نمایش دقیق‌تر بارهای فشار اقدام به حرکت هادی، با استفاده از محاسبهٔ فشار شبکهٔ استاتیک براساس معادلهٔ BER-nouulli شده است. برنارد دل و پیر آدمیرات [۱۶] دریافتند که در شرایط یکسان برف و باد، براساس افزایش سختی پیچش هادی‌های انتقال، مقاومت هادی‌ها در برابر پارگی افزایش پیدا می‌کند. مشانیر [۷] با ارائهٔ مدلی، خواص مکانیکی یخ در جو را بررسی کرد. خواص مکانیکی یخ در جو به وفور دارای زایده‌هایی است که تا کنون به رسمیت شناخته نشده‌اند و در نتیجه مدل‌سازی تحلیلی از مواد ضمنی است. مدلی ریاضی با استفاده از نرم‌افزار Minitab_15 برای پیش‌بینی شرایط تجمع یخ ایجاد شده است. تجزیه‌وتحلیل دقیق نشان می‌دهد که ضرایب تعاملات این متغیرها به استحکام کششی یخ در جو چندان کمک نمی‌کند.

داده‌ها و روش

مفاهیم آسیب‌پذیری و امنیت خطوط انتقال برق، ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند، زیرا در یک مفهوم کلی می‌توان آنها را به‌عنوان متضاد هم به‌کار برد [۱۷].

1. Fluid–structure interaction

www.SID.ir

Archive of SID

آسیب‌پذیری: آسیب‌پذیری را می‌توان ناتوانی سیستم یا کاهش توانایی آن برای مقاومت در برابر یک موقعیت ناخواسته، محدود کردن پیامدها و بازیابی و تثبیت پس از بروز شرایط ناخواسته تعریف کرد. از طرف دیگر تضمین امنیت تأمین برق، مستلزم رعایت دو معیار اصلی یعنی کفایت و امنیت سیستم است. اعتبار الکتریکی آمریکای شمالی برای این دو معیار، تعاریف مناسبی را مطرح کرده است [۱۸]:

کفایت که عبارت است از توانایی کل سیستم قدرت در تأمین تقاضای کلی برق و نیازمندی‌های انرژی مشتریان در همهٔ زمان‌ها با توجه به قطع برق زمان‌بندی‌شده و زمان‌بندی‌نشدهٔ مورد انتظار ناشی از اجزای سیستم.

امنیت که توانایی کل سیستم قدرت در مقاومت در برابر اختلال‌های ناگهانی مانند مدار اتصال کوتاه الکتریکی یا خسارت پیش‌بینی‌نشدهٔ اجزای سیستم ناشی از شرایط اقتضایی معتبر است.

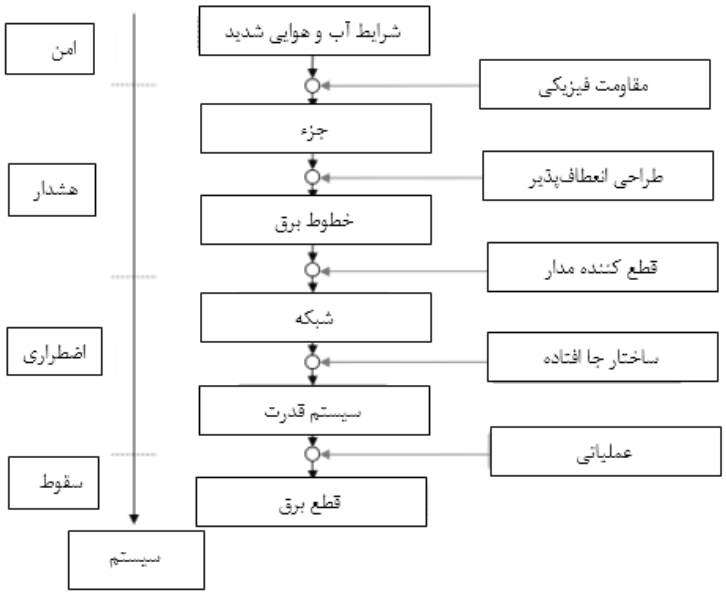
استانداردهای پایایی آمریکای شمالی [۱۹] و راهنمای اجرایی ENTSO [۱۸] دو نمونه از استانداردهای بین‌المللی هستند. براساس این تعاریف و در زمینهٔ رویدادهای آب‌وهوایی باید گفت هنگامی که اختلال‌های مربوط به شرایط آب‌وهوایی توسط سیستم قدرت مورد مقاومت قرار نمی‌گیرند، امنیت تأمین برق تضمین نمی‌شود؛ در این مورد، سیستم، آسیب‌پذیر تلقی می‌شود. اولین گام در ارزیابی آسیب‌پذیری شامل یافتن شرایطی است که امنیت تأمین برق را به خطر می‌اندازد. اگر سیستم تحت بررسی، یک سیستم انتقال قدرت باشد، CMCهای احتمالی به‌عنوان شرایط مورد جست‌وجو هستند. گام بعدی شناخت چگونگی به خطر افتادن امنیت خطوط انتقال برق از طریق CMC است که به شیوه‌های مناسبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری منجر می‌شود. فینک و کارلسن [۲۱] یک طرح مفهومی را از چهار حالت اجرایی سیستم مطرح کردند که شروع خوبی برای پاسخگویی به این پرسش است و طرح ذیل الهام‌گرفته از اثر آنهاست.

شکل ۱ نشان‌دهندهٔ حالت‌های سیستم اجرایی در زمینهٔ موقعیت قطع برق در سیستم‌های انتقال قدرت است که از شرایط بد آب‌وهوایی ناشی شده است. در سمت راست نمونه‌ای از موانع قطع برق ارائه شده‌اند. نقص عملکرد یا خسارت‌های دربرگیرنده یک حالت هشدارند که شاخص مشکل‌های احتمالی بزرگ‌تر را نشان می‌دهند. اگر نقص عملکرد موقتی سبب قطع خطوط انتقال برق شود، متوقف‌کنندهٔ مدار بستن اتوماتیک به‌طور معمول می‌تواند موارد قطع برق خزشی را متوقف کند. در مقابل نبود دسترسی پایدار به خطوط انتقال برق ممکن است سبب موارد دیگری از قطع برق در شبکه شود. شایان ذکر است که این حالت‌ها را باید با مرزهای فازی و نه دقیق مدنظر قرار داد. ساختار غربالی سیستم انتقال قدرت دارای انعطاف‌پذیری محدودی است که بر

www.SID.ir

Archive of SID

تعداد زیادی از قطعی‌های همزمان برق می‌تواند غلبه کند. سیستم انتقال برق در یک حالت اضطراری است و این مرحله درست پیش از اختلال در برق ایجاد می‌شود.



شکل ۱. حالت‌های اجرایی سیستم در زمینهٔ موقعیت قطع برق

این دیدگاه پایین – بالا به حالت خزشی قطع برق در یک سیستم سبب می‌شود که بتوان شیوه‌های مختلف تجزیه‌وتحلیل موجود را شرح داد. در سطوح خطوط انتقال برق و اجزا، می‌توان از تئوری پایایی کلاسیک در مواجهه با مدل‌سازی سازوکارهای قطع برق استفاده کرد. در سطح شبکه، مدل‌های الکتریکی سیستم ضروری هستند. این مدل‌ها متعددند و توانایی آنها توجه به پدیده‌های دینامیکی در حالت‌های اضطراری و هشدار است. مرور جامع و کلی شیوه‌های موجود در تحقیق بالدیک و همکاران [۱۵] ارائه شده است. ازآنجا که هدف این پژوهش، بررسی آسیب‌پذیری استاتیکی است، یک مدل‌سازی حالت یکنواخت مانند مدل جریان قدرت AC با توجه به تجزیه‌وتحلیل اقتضایی می‌تواند رضایت‌بخش باشد. این روش به محاسبهٔ حالت سیستم براساس جریان قدرت و ولتاژها می‌پردازد که ناشی از خرابی‌های اجزا یا CMC است، در نتیجه شرایط گذرا یا دیگر پدیده‌های دینامیکی از این تجزیه‌وتحلیل حالت

www.SID.ir

Archive of SID

یکنواخت کنار گذاشته شده‌اند. روش‌های پیچیده‌تر بدین منظور توسعه یافته‌اند تا خرابی‌های آبشاری و اقدامات احتمالی برای کاهش آنها مانند روش‌های به‌کاررفته در TRELSS را در نظر بگیرند که یک ابزار صنعتی است [۳۳].

کنترل عدم قطعیت

عدم قطعیت را می‌توان در دو طبقه‌بندی اصلی تفکیک کرد [۲۷]. اولین طبقه‌بندی شامل عدم قطعیت ذهنی ناشی از شناخت ناقص مدل‌ساز است [۲۱]. این عدم قطعیتِ ناشی از غفلت، به‌طور معمول با مطالعهٔ بیشتر کاهش می‌یابد؛ در مقابل، عدم قطعیت اتفاقی، ناشی از تنوع فرایندهای زیربنایی است که عدم قطعیت عینی نامیده می‌شود، زیرا این تنوع به‌عنوان ویژگی هدف مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود. در این صورت، تحقیقات بیشتر نمی‌تواند عدم قطعیت را کاهش دهد. این طبقه‌بندی را می‌توان بیشتر گسترش داد که کلیر و اسمیت [۲۵] این کار را انجام دادند. مجموع ادبیات تحقیق دربارهٔ مدل‌سازی عدم قطعیت بسیار مهم است و پیچیدگی آن در حال افزایش است، اما نکتهٔ اساسی، توانایی تشخیص این دو نوع عدم قطعیت متفاوت در هنگام مدل‌سازی سیستم است.

این دو نوع عدم قطعیت در مدل‌سازی سیستم‌های قدرت الکتریکی و شرایط آب‌وهوایی ارائه می‌شوند. این عدم قطعیت‌ها سبب ایجاد تعداد زیادی از حالت‌ها یا آینده‌های احتمالی می‌شوند. باید شیوه‌های درستی را انتخاب کرد تا بدون ساده کردن بیش از حد موضوع بتوان با این مشکل‌ها مواجه شد. غفلت در زمینهٔ سیستم‌های مورد مطالعه، متداول‌تر از عدم قطعیت تنوع است. در واقع مسئلهٔ اصلی در ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم‌های انتقال قدرت کنونی و آینده، تحت تأثیر شرایط دشوار آب‌وهوایی، دربرگیرندهٔ تعامل اجزای مختلف است که احتمال شناخت کامل همهٔ این سیستم‌ها توسط مدل‌ساز را از بین می‌برد. در مواجهه با عدم قطعیت ذهنی مرتبط با تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری به‌طور معمول این دو روش ترجیح داده می‌شوند.

اولین روش دربرگیرندهٔ تفکر مبتنی بر سناریو یا برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریو در مواجهه با توصیف‌های احتمالی سیستم‌های آینده است. این روش به ایجاد مدل‌های معتبر در دنیا تحت شرایط متغیر منجر می‌شود. تفکر مبتنی بر سناریو به سازماندهی طرح‌های طولانی‌مدت پیچیده و انعطاف‌پذیر منجر می‌شود. سناریوها براساس ترکیبی از عوامل متعدد ایجاد می‌شوند که ممکن است بر سیستم تحت بررسی تأثیر داشته باشند. تفکر مبتنی بر سناریو شامل ساختار سناریوهاست که دیدگاه ثابتی را در زمینهٔ آینده و شناخت آنچه در آینده پیش‌بینی‌پذیر نیست، اما محتمل است ارائه می‌دهد. این روش منطبق بر دانش مبهم و مجزا

www.SID.ir

Archive of SID

دربارهٔ واقعیت است (نوعی عدم قطعیت شناختی). تفکر مبتنی بر سناریو در طی دهه‌ها در بخش اطلاعات نظامی برای متخصصان راهبردهای تجاری و در بسیاری از رشته‌های علمی به‌کار رفته است [۳۱]. روش کلی تفکر مبتنی بر سناریو علاوه بر سایر منابع آشکار شده است [۲۸]. در فرایند کلی با اقتباس از آنالیز آسیب‌پذیری می‌توان مطالب زیر را خلاصه کرد:

۱. تعریف اهداف تجزیه‌وتحلیل؛
۲. شناسایی محرک‌های مرتبط با تغییر و موضوعات مورد توجه در زمینهٔ اهداف؛
۳. ایجاد چارچوب منسجم برای ساخت سناریوهای موجهه و ثابت؛
۴. آنالیز سناریوها و تفسیر پیامدها.

دو نوع سناریو در این تحقیق برای سیستم‌های انتقال قدرت و شرایط دشوار آب‌وهوایی ایجاد شده است. سناریوی اول دربرگیرندهٔ همهٔ پارامترهای مربوط به آنالیز آسیب‌پذیری مانند مدل‌های جریان بار، آثار مکانی خطوط هوایی یا مقاومت مکانیکی تحت بارهای مربوط به آب‌وهواست. این اطلاعات از امکانات مربوط به برق و اپراتورهای شبکه به‌دست آمده است. سناریوهای رویدادهای دشوار آب‌وهوایی نمایش مکانی و زمانی براساس رویدادهای گذشته‌اند که ایستگاه‌های هواشناسی یا شبیه‌سازی‌های کامپیوتری آنها را اندازه‌گیری می‌کند. این سناریوها در مسیر ایجاد خود، موجه تلقی می‌شوند. آنها براساس اطلاعات موجود در طی مرحلهٔ گردآوری طبق دانش متخصصان و استدلال‌های ساده ایجاد شده‌اند. جدول ۱ دربرگیرندهٔ برخی از موضوع‌های مورد توجه پیش از احداث سیستم‌های انتقال قدرت و سناریوهای شرایط دشوار آب‌وهوایی است.

جدول ۱. موضوع‌های مورد توجه پیش از ایجاد سناریو

سیستم‌های انتقال قدرت	شرایط بد آب‌وهوایی
افزایش مصرف، زیرساختارهای جدید انتقال برق، محدودیت سیستم قدرت الکتریکی، نیروگاه‌های جدید برق، آزادسازی بازار، منبع انرژی تجدید پذیر و ناپیوسته، فرسوده شدن زیرساختارها، چارچوب قانونی، قوانین اجرایی و برنامه‌ریزی ...	توجه به شرایط خطرناک، تأثیر تغییرات آب‌وهوایی، فصل/ زمان تجزیه‌وتحلیل، تعداد سناریوها، رویدادهای گذشته و یا شبیه‌سازی‌شده، منبع داده‌ها، ...

دومین روش، مرتبط با احتمال ذهنی یا تفسیر مفهوم احتمالات است. احتمال ذهنی به اندازه‌گیری حالت دانش می‌پردازد [۳۳] که برخلاف احتمال عینی است که بسامد یا تکرار بروز یک رویداد را اندازه‌گیری می‌کند. احتمال ذهنی برای تعیین باور افراد در زمینهٔ فرضیه‌ها یا

www.SID.ir

Archive of SID

نظرهایی به‌کار می‌رود که در تحقیق ما شامل احتمال تکرار بروز CMC است. در واقع آنها در سناریوهای سیستم‌های انتقال قدرت گنجانده نمی‌شوند. شبیه‌سازی مکان- زمان به ارزیابی احتمال ذهنی بروز آنها در زمان معین می‌پردازد که CMCهای توجیه‌پذیر را شناسایی می‌کنند. ارزیابی احتمال CMC براساس نظریهٔ پایایی است که شاخه‌ای از آمار است. این نظریه در طی دهه‌ها در حوزه‌های متعدد مهندسی مانند آنالیز ریسک، مدیریت کیفیت یا بهینه‌سازی نگهداری و عملیات با موفقیت کاربرد داشته است. آنالیز پایایی، مبنای مفهومی نیرومندی را فراهم می‌کند و دارای دهه‌ها پیشرفت در حیطهٔ سیستم قدرت بوده است [۳۳].

در ادامهٔ این پژوهش، احتمال ذهنی به‌طور خلاصه به‌عنوان احتمال ذکر شده است. در این زمینه، توجیه‌پذیر نیز به‌جای محتمل به‌کار رفته است با این‌حال، باید به یاد داشت که توجیه‌پذیر بودن چند تعریف دیگر نیز دارد [۳۰]. به‌طور خاص باید معنای محتمل بودن را در رابطه با تئوری دمستر – شافر در زمینهٔ تئوری ریاضیاتی شواهد و مدارک متمایز دانست [۲۹]. در نتیجه عدم قطعیت شناختی و اتفاقی باید مشخص شود. حالت اول ناشی از بی‌دانشی یا ناآگاهی مدل‌ساز است و حالت دوم ویژگی ذاتی سیستم تلقی می‌شود. این طبقه‌بندی منحصربه‌فرد نیست. هرچند برخی این تمایز را بی‌نقص می‌دانند که فقط باید عدم قطعیت اتفاقی را در نظر بگیرند [۳۲]. در اینجا منظور ما نوع دوم است در نتیجه در این آنالیز آسیب‌پذیری دو روش مناسب با توجه به نبود دانش و شناخت به‌کار گرفته شده است. روش مبتنی بر سناریو برای مدل‌سازی سیستم‌های انتقال قدرت و رویدادهای بد آب‌وهوایی به‌کار می‌رود که سبب تفکر غیرخطی، مدل‌سازی سیستم‌های احتمالی و فرضی، به‌روز کردن پارامترها و تقویت فرایند یادگیری می‌شود؛ اما CMC احتمالی خطوط انتقال ناشی از سناریوهایی است که به‌طور عمده شبیه‌سازی آنها براساس نظریهٔ پایایی است. احتمال ذهنی این باور را تعیین می‌کند که CMC در زمان معین اتفاق می‌افتد. شایان ذکر است که در احتمالات ذهنی به فرضیه‌های مربوط به نظریهٔ احتمال عینی کلاسیک توجه می‌شود. حالت قبلی، ماهیت تصادفی نبود دانش در مدل‌ساز را تفسیر می‌کند.

سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی

سیستم‌های مدیریت داده به کنترل ثبات پایگاه دادهٔ جغرافیایی می‌پردازند تا عملکردهای مناسب را حتی برای سیستم‌های بزرگ تضمین کنند و اغلب پلتفرم‌های چندین کاربر را به‌روز می‌کنند. یکی از توانایی‌های اساسی GIS توانایی آنالیز داده‌های جغرافیایی است که به تعدادی از آنها اشاره شده است:

www.SID.ir

Archive of SID

- بازیابی، تعمیم و خلاصه کردن نقشه؛
- هم‌پوشانی لایه‌ها؛
- جست‌وجوی داده‌ها با توجه به اطلاعات مکانی؛
- اندازه‌گیری طول، سطح و زاویه؛
- آنالیز دیجیتالی شبکه و زمین‌ها.

آنالیز استاندارد براساس عملکردهایی است که در جعبه ابزار نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق که ArcGis است؛ گروه‌بندی می‌شوند [۲۰]. برای بررسی مختصر اما کامل GIS می‌توان به مقالهٔ کاکس و گریفورد [۲۴] مراجعه کرد. کاربرد GIS در طی دهه‌های اخیر در بسیاری از حوزه‌های علمی مانند علوم محیطی، اکولوژی، مهندسی، علوم کامپیوتر، جغرافیا یا کشاورزی در حال افزایش بوده است.

GIS اگر شامل اطلاعات مکانی باشد، در زمینهٔ ارزیابی آسیب‌پذیری دارای اهمیت اساسی است. این ارزیابی‌ها مرتبط با خطرهای طبیعی یا انسانی مانند زلزله، آلودگی آب‌وهوا، آتش‌سوزی جنگل‌ها و رانش زمین هستند. با وجود این، در تعداد محدودی از مقاله‌ها به تأثیر شرایط آب‌وهوایی بر سیستم‌های خطوط انتقال برق توجه شده است. نمونه‌ای بارز از این مقاله‌ها دربارهٔ موضوع مربوط به برآورد توزیع مکانی قطع برق ناشی از توفان‌هاست [۲۲]، اما پویایی یا دینامیک شرایط آب‌وهوایی به‌طور آشکار در نظر گرفته نشده است. در واقع مدل‌سازی پویایی یا دینامیک مذکور در GIS دشوار است، زیرا بیشتر مبتنی بر مدل‌سازی پدیده‌های استاتیکی یا ثابت است. یک توضیح آن دربارهٔ فعالیت اصلی GIS در زمینهٔ نقشه‌های استاتیکی و آنالیزها است. GIS به‌طور گسترده در بسیاری از رشته‌های علمی پراکنده شده است، اما ارزیابی آسیب‌پذیری مرتبط با سیستم تأمین برق و GIS، اقدام متداولی نیست از این گذشته ابعاد مکانی و زمانی به‌طور کافی با GIS در نظر گرفته نشده‌اند؛ در نتیجه شناسایی CMC با توجه به همبستگی‌های مکانی – زمانی اقدام چالش‌برانگیزی است.

GIS برای مدل‌سازی مسیرهای خطوط انتقال و شرایط آب‌وهوایی به‌کار می‌رود که به‌صورت نقشه یا نقشه‌های متوالی ذخیره می‌شود تا در گذر زمان شبیه‌سازی شود. GIS هنگام کاربرد این مدل‌ها با توجه به زیرساختارهای پیچیده یا ماهیت طبیعی که در مقیاس‌های بزرگ گسترده شده است، مناسب و گاه ضروری است. GIS سبب ایجاد تجسم و تعامل با مدل‌ها برای تغییرات سریع و مناسب می‌شود. با این‌حال، محیط GIS آشکارا برای شبیه‌سازی‌های مکانی- زمانی به‌کار نمی‌رود. این شبیه‌سازی‌ها در محیط Matlab که دارای توانایی‌های تعبیه‌شدهٔ GIS هستند انجام می‌گیرند. هرچند GIS آنالیزهای پیشرفته را فراهم می‌سازد، یک سیستم اطلاعات جغرافیاییِ زمانی می‌تواند شبیه‌سازی‌هایی را انجام دهد که در حیطه‌های متعددی ارزشمندند.

www.SID.ir

Archive of SID

یافته‌های پژوهش

ارزیابی آسیب‌پذیری با روش مبتنی بر سناریو سیستم‌های انتقال برق و شرایط آب‌وهوایی تأیید شد. این روش سبب مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده در شرایط عدم قطعیت شد. تفکر مبتنی بر سناریو سبب ارزیابی آسیب‌پذیری موقعیت‌های آینده می‌شود که بسیار متفاوت با مواردی است که در گذشته با آن مواجه بوده‌ایم. سناریوهای احتمالی سیستم‌های خطوط انتقال برق و شرایط دشوار آب‌وهوایی در یک چارچوب زمانی آینده و برای هر سیستم قدرت قابل تصور یا هر شرایط آب‌وهوایی ایجاد شد.

سطح آسیب‌پذیری سیستم قدرت برق با شاخص کلی اندازه‌گیری می‌شود که ترکیبی از شاخص‌های احتمال و شدت CMC است. احتمال با شبیه‌سازی مکانی و زمانی با توجه به توزیع جغرافیایی شبکه‌های انتقال برق، همبستگی زمانی و مکانی شرایط بد آب‌وهوایی و فرایندهای اختلالات خطوط برق و اتصال مجدد در رابطه با زمان ارزیابی می‌شوند. شدت در رابطه با فراتر بودن از محدوده‌های امنیت است که دربرگیرندهٔ انحراف ولتاژ باس‌ها و بار اضافی جریان خط انتقال برق است. شدت را می‌توان با آنالیز اقتضایی براساس مدل جریان قدرت AC ارزیابی کرد که مهم‌ترین مؤلفه‌های سیستم قدرت الکتریکی مانند نیروگاه‌های برق، شبکه‌های انتقال برق، مبدل‌ها، سیستم‌های امنیتی و بارها در نظر گرفته می‌شوند.

مفهوم ماتریس آسیب‌پذیری بر مناطق عمدهٔ آسیب‌پذیری تأکید دارد که ناشی از شاخص کلی آسیب‌پذیری است. مناطق عمدهٔ آسیب‌پذیری به‌طور مشخص نشان‌دهندهٔ شاخص آسیب‌پذیری در زیرساختارهایی است که در CMC نقش دارند و فراتر از محدوده‌های ایمنی هستند. مناطق عمدهٔ آسیب‌پذیری، زیرساختارهای انتقال قدرت اثرگذار در آسیب‌پذیری را مشخص می‌سازند تا جست‌وجوی مؤثر اقدامات متقابل آسان‌تر شود.

اقدامات متقابل برای مناطق عمدهٔ آسیب‌پذیری شامل کاهش آسیب‌پذیری است و همچنین هدف آن، بهبود انعطاف‌پذیری ساختاری سیستم‌های انتقال برق از طریق افزودن یا تغییر خطوط قدرت یا تغییر توپولوژی شبکه است. این اقدامات متقابل می‌تواند جایگزین‌های مکملی را برای طرح‌های کنونی توسعهٔ سیستم قدرت الکتریکی فراهم کند.

ارزیابی احتمال CMC با توجه به دینامیک تعامل‌های زیرساختارهای انتقال با شرایط آب‌وهوایی به‌طور قطع یک نکتهٔ اصلی است. این امر بدون استفاده از GIS در ترکیب با شبیه‌سازی‌های تأییدشده با تئوری پایایی امکان‌پذیر نخواهد بود. این ترکیب در منابع علم، دست‌کم در زمینهٔ ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم‌ها در مقیاس بزرگ به‌ندرت انجام می‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID

افزون‌بر مدل جغرافیایی، خطوط انتقال برق در پیوند با مدل الکتریکی است. این امر سبب محاسبهٔ متغیرهای حالت‌های مربوط در سیستم‌های الکتریکی می‌شود تا بتوان آسیب‌پذیری ساختاری را ارزیابی کرد. ابزار برنامه‌ریزی شبکه‌های سنتی آنالیز اقتضایی برای ارزیابی شدت CMC به‌کار می‌رود، اما مجموعهٔ CMCهای احتمالی از روش‌های احتمالی یا قطعی صادر شده‌اند که همبستگی مکانی- زمانی شرایط بد آب‌وهوایی، توزیع جغرافیایی خطوط انتقال بار اضافی یا مقاومت فیزیکی آنها را در نظر نمی‌گیرند. توجه به این سه نکته می‌تواند ارزیابی واقعی‌تری را در زمینهٔ آسیب‌پذیری در طی شرایط دشوار آب‌وهوایی فراهم کند.

نتایج

به‌طور خلاصه روش‌های کنونی به‌طور هم‌زمان، همبستگی‌های مکانی- زمانی شرایط آب‌وهوایی و مدل‌های الکتریکی سیستم‌های قدرت را در نظر نمی‌گیرند. آنها یا بر شبیه‌سازی سیستم‌های برق بدون توجه به شرایط دشوار آب‌وهوا تمرکز دارند یا بر پیش‌بینی قطع برق خطوط هوایی انتقال برق بدون توجه به پیامدهای قطع برق. روش بیلینگتون به‌درستی نمی‌تواند همبستگی مکانی– زمانی شرایط آب‌وهوایی را در نظر بگیرد، اما عملکرد مطلوبی در مدل‌سازی سیستم‌های قدرت الکتریکی دارد. روش‌های آماری نیازمند داده‌های قطع برق هستند که به‌طور معمول در شرایط آب‌وهوایی وخیم و نادر در دسترس نیستند؛ گذشته از این، فقط خسارات فیزیکی وارد بر زیرساختارها پیش‌بینی می‌شود که ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم قدرت الکتریکی را دچار اختلال می‌کند، اما روش‌های آماری، همبستگی‌های مکانی پیچیده را به‌عنوان سومین روش در نظر می‌گیرند. همچنین می‌توان تأثیر شرایط آب‌وهوایی شدید را بر بخش‌های زیرساختارهای انتقال قدرت مانند بخش‌های خطوط انتقال برق تعیین کرد؛ اما سیستم انتقال قدرت کاملاً در شبیه‌سازی‌ها تلفیق نشده است.

در نتیجه این سه روش دارای مزایا و معایبی با الهام از شیوهٔ جدید ارزیابی آسیب‌پذیری طی شرایط شدید آب‌وهوایی براساس شبیه‌سازی‌ها هستند. می‌توان همبستگی‌های مکانی – زمانی و توزیع جغرافیایی خطوط انتقال هوایی را تلفیق کرد تا CMCهای احتمالی را شناسایی کرد؛ بنابراین هستهٔ اصلی ارزیابی آسیب‌پذیری با آنالیز اقتضایی انجام می‌گیرد تا شاخص‌های آسیب‌پذیری با الهام از اولین روش اقتباس شوند. در نهایت می‌توان اقداماتی را برای کاهش آسیب‌پذیری مشخص کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

[۱]. ابوالقاسمی، ناصر؛ و حسینی، سید رسول (۱۳۷۱). «تأثیرات آلودگی و خوردگی در کاهش قابلیت اطمینان عناصر خطوط انتقال و توزیع نیرو»، هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق.

[۲]. اسمیت، کیت. (۱۳۹۲). *مبانی آب‌وهواشناسی کاربردی*، ترجمهٔ دکتر علی‌محمد خورشیددوست. مؤسسهٔ فرهنگی انتشاراتی یاوران.

[۳]. امیری، علی؛ و مستجابی سرهنگی، حمید (۱۳۹۲). «بررسی تهدیدات جغرافیایی خطوط انتقال انرژی در ایران»، مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات محیطی.

[۴]. پرچکانی، پروانه (۱۳۸۳). «همه چیز دربارهٔ زنجان»، تهران.

[۵]. رضایی، مجید؛ شریعتی، محمدرضا؛ طالبی، محمدعلی؛ و دانشور، فرشید (۱۳۸۳). «اثرات تغییرات شرایط آب‌وهوایی بر فرایند نشست آلودگی و خطاهای عایقی»، نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق.

[۶]. زنده‌دل، حسن (۱۳۷۷). «استان زنجان»، تهران؛ نشر ایرانگردان.

[۷]. شرکت سهامی خدمات مهندسی برق (۱۳۷۷). «آیین‌نامه و استاندارد بارگذاری برج‌های انتقال نیرو»، استاندارد جامع مهندسی و طراحی خطوط انتقال نیروی برق.

[۸]. شریعتی، محمدرضا؛ رضایی، مجید؛ و اسکویی، محمد (۱۳۸۴). «نقشهٔ مدل نشست آلودگی تأثیرگذار بر روی ایزولاسیون در مناطق تحت پوشش شرکت توزیع نیروی برق استان بوشهر»، دهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق.

[۹]. طرفدارحق، مهرداد؛ و روشن میلانی، کریم (۱۳۹۰). «شبکه‌های توزیع برق هوایی روکش‌دار و عایق شده»، دانشگاه تبریز.

[۱۰]. طوسی‌پناه، محمدرضا (۱۳۶۹). «تأثیرات آلودگی بر خطوط انتقال نیرو»، پنجمین کنفرانس بین المللی برق.

[۱۱]. فاضلی، سهراب؛ و امیدواری‌نیا، اسداله (۱۳۷۳). «تأثیر سوء درجه حرارت محیط در کارایی تجهیزات از جمله ترانسفورماتورها»، چهارمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیرو.

[۱۲]. کریمی، ابوالقاسم (۱۳۸۱). «بررسی علل فروپاشی مقره‌های خطوط انتقال نیرو در مناطق با آلودگی محیطی»، سومین همایش کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق.

[۱۳]. محجل ولی، بهشته؛ و صمدی، احد (۱۳۹۰). «انواع هادی‌های مورد استفاده در خطوط انتقال برق»، مجله آلومینیوم، ش ۳۱.

[۱۴]. محمدی، حسین (۱۳۸۷). «مخاطرات جوی»، انتشارات دانشگاه تهران.

www.SID.ir

Archive of SID

[15]. BALDICK, R., CHOWDHURY, B., DOBSON, I., DONG, Z. Y., GOU, B., HAWKINS, D., HUANG, Z. Y., JOUNG, M., KIM, J., KIRSCHEN, D., LEE, S., LI, F. X., LI, J., LI, Z. Y., LIU, C. C., LUO, X. C., MILI, L., MILLER, S., NAKAYAMA, M., PAPIC, M., PODMORE, R., ROSSMAIER, J., SCHNEIDER, K., SUN, H. B., SUN, K., WANG, D., WU, Z. G., YAO, L. Z., HANG, P., ZHANG, W. J., ZHANG, X. P. & PREDICTIO, T. F. U. (2009) "Vulnerability Assessment for Cascading Failures in Electric Power Systems", *2009 Ieee/Pes Power Systems Conference and Exposition*, Vols 1-3, pp: 83-91-2078.

[16]. BERNARD DALLE , Pierre Admirat (2011). "Wet snow accretion on overhead lines with French report of experience", *Cold Regions Science and Technology*, 65, pp: 43–51.

[17]. DOORMAN, G., KJOLLE, G., UHLEN, K., HUSE, E. S. & FLATABO, N. (2004) Vulnerability of the nordic power system. Trondheim, SINTEF. ENTSO-E (2008) Statistical Year Book. Brussels, European Network of Transmission System Operators for Electricity.

[18]. ENTSO-E (2009a) P3 – Policy 3: Operational Security. ENTSO-E.

[19]. ENTSO-E (2009b) System Adequacy Forecast for 2010-2025. Brussels, European Network of Transmission System Operators for Electricity. ENTSO-E (2010) Statistical Year Book. Brussels, ENTSO-E.

[20]. ESRI (2010a) ArcInfo: the complete desktop GIS. ESRI

[21]. FINK, L. H. & CARLSEN, K. (1978) Operating under stress and strain. IEEE Spectrum. IEEE.

[22]. HAN, S.-R., GUIKEMA, S. D., QUIRING, S. M., LEE, K.-H., ROSOWSKY, D. & DAVIDSON, R. A. (2009) "Estimating the spatial distribution of power outages during hurricanes in the Gulf coast region", *Reliability Engineering & System Safety*, 94, pp: 199- 210.

[23]. JAYNES, E. T. (2003) *Probability theory: the logic of science*, Cambridge University Press. KELLEY, C. T. (2003) *Solving nonlinear equations with Newton's method*, Philadelphia, SIAM.

[24]. KIESSLING, F., NEFZGER, P., NOLASCO, J. F. & KAINTZYK, U. (2003) *Overhead power lines: planning, design, construction*, New-York, Springer Verlag.

[25]. KLIR, G. J. & SMITH, M. (2001) "On measuring uncertainty and uncertainty-based information:Recent development", *annals of mathematics and artificial intelligence*, 32, pp: 5-33.

[26]. MICHIL Tomaszewski., BogdanRuszczak (2013). Analysis of frequency of occurrence of weather conditions favouring wet snow adhesion and accretion on overhead power lines in Poland, *Cold Regions Science and Technology*, 85, pp: 102–110.

[27]. PATECORNELL, M. E. (1996) "Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment", *Reliability Engineering & System Safety*, 54, pp: 95-111.

[28]. RINGLAND, G. (2006) *Scenario planning: Managing the future*, Chichester, John Wiley and Sons Ltd.

www.SID.ir

Archive of SID

[29]. SHAFER, G. (2009) "A betting interpretation for probabilities and Dempster-Shafer degrees of belief", *International Journal of Approximate Reasoning*, In Press, Corrected Proof.
[30]. VAN DER HELM, R. (2006) "Towards a clarification of probability, possibility and plausibility: How semantics could help futures practice to improve", *Foresight*, 8, pp**:**17-7.
[31]. VARUM, C. A. & MELO, C. (2010) "Directions in scenario planning literature - A review of the past decades", *Futures*, 42, pp: 355-369.
[32]. WINKLER, J., DUEÑAS-OSORIO, L., STEIN, R. & SUBRAMANIAN, D. (2010) "Performance assessment of topologically diverse power systems subjected to hurricane events", 95**,** 323-336.
[33]. ZHANG, P. (2003) TRELSS Application Manual. Palo Alto, EPRI.

www.SID.ir