

حل مسئله طرح توسعه شبکه انتقال به منظور کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری با رویکرد تحلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های انتقال

علی حسامی نقشبندی^{۱*}، صابر ارمغانی^۲ و سید محمد شهرتاش^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۳۱	در سال‌های اخیر، مسئله‌ی طرح توسعه شبکه‌های انتقال به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری به‌عنوان یکی از مسائل مهم در بحث طراحی و برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت مطرح شده است. حل مسئله‌ی طرح توسعه‌ی شبکه‌ی قدرت با هدف کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری با استفاده از رویکرد تحلیل و ارزیابی باعث می‌شود که اثرات نامطلوب خرابی آبخاری به‌صورت مؤثرتری نسبت به رویکرد بهینه‌سازی کاهش یابد. رویکرد تحلیلی یک مجموعه از مستعدترین خطوط را تشکیل داده و احداث خطوط موازی با تمام اعضای مجموعه‌ی خطوط مستعد خرابی آبخاری را به‌عنوان طرح توسعه شبکه معرفی می‌کند. اما احداث همزمان یک خط موازی به ازای تمام اعضای موجود در مجموعه‌ی مستعدترین خطوط، طرحی غیر فنی و غیراقتصادی است. در این مقاله تلاش می‌شود به‌منظور پیشنهاد طرح توسعه شبکه انتقال به‌صورت فنی و اقتصادی، با استفاده از تحلیل عواقب نامطلوب خرابی آبخاری، خط مستعد خرابی آبخاری شناسایی شده و از طریق آن و راهبرد یک شین دورتر، ناحیه‌ی آسیب‌پذیر شناسایی می‌شود. طرح‌های مختلف از توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر برنامه‌ریزی شده و استحکام‌بخشی هر طرح توسعه با استفاده از معیار استحکام‌بخشی پیشنهادی مورد ارزیابی و اولویت‌بندی قرار می‌گیرد. رویکرد پیشنهادی در طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال بر روی سیستم قدرت آزمون ۳۹ شین آزمایش شده و نتایج عددی، توانایی روش پیشنهادی در کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری را نشان می‌دهد.
واژگان کلیدی: خرابی آبخاری، شناسایی ناحیه‌ی آسیب‌پذیر، شاخص استحکام‌بخشی به، شبکه‌ی انتقال، طرح توسعه‌ی شبکه‌های، انتقال.	

۱- مقدمه

بعد از رخ دادن خرابی آبخاری و وقوع خاموشی سراسری حاصل از آن در کشورهای امریکا در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱ [۱-۲] و هندوستان در سال ۲۰۱۲ [۳] که خسارات شدید اقتصادی و اجتماعی را در آن کشورها به وجود آورد، مشخص شد که شبکه‌های انتقال همگام با رشد بارها توسعه نیافته‌اند. به‌عبارت‌دیگر، شبکه‌های انتقال کفایت تأمین بارهای موردنیاز خود را به اندازه مطلوب ندارند. به‌طوری‌که امروزه از شبکه‌های انتقال نزدیک به قیود مربوط به امنیت

آن‌ها بهره‌برداری می‌شود [۴]. در نتیجه طرح‌های حفاظتی سنتی نمی‌توانند پایداری شبکه در برابر اغتشاش را حفظ کنند و شبکه دچار خرابی آبخاری و در نهایت ناپایداری ولتاژ و یا گذرا خواهد شد [۵]. از این‌رو، در دهه‌های اخیر مسئله‌ی طرح توسعه‌ی شبکه‌ی قدرت باهدف کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری به یکی از مسائل مهم در بحث مطالعات مربوط به برنامه‌ریزی در شبکه‌های انتقال مبدل شده است. طرح توسعه‌ی شبکه‌های انتقال مسئله‌ای است که امروزه با

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hesami@uok.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه قدرت، دانشگاه کردستان

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، گروه قدرت، دانشگاه کردستان

۳. استاد، قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران

باعث می‌شود از طریق احداث کمترین تعداد خط، وقوع تعداد زیادی از رخداد خرابی آبخاری کاهش پیدا کند. اما ممکن است خطی در بیشتر رخداد از خرابی آبخاری شرکت کند اما به دلیل آنکه در مکان‌های آخر از توالی قطع‌شدگی در هر سناریو قرار دارد، ممانعت از قطع شدن آن خط باعث کاهش رخداد خرابی آبخاری نشود. از این رو در نظر گرفتن مکان خطوط در توالی قطع‌شدگی باعث افزایش کارایی و اقتصادی‌تر شدن طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال به‌منظور کاهش رخداد و اثرات نامطلوب خرابی آبخاری می‌شود.

به‌منظور تحلیل خصوصیت انتشاردهندگی خطوط انتقال در رخداد خرابی آبخاری نیاز است که سناریوهای مختلف از رخداد خرابی آبخاری تولید شود. سه نوع مدل رخداد خرابی آبخاری وجود دارد که عبارتند از: (۱) مدل دینامیکی رخداد خرابی آبخاری با استفاده از معادلات دیفرانسیل-جبری-گسسته [۳۴]، (۲) مدل شبه استاتیکی رخداد خرابی آبخاری با استفاده از تحلیل حالت دائمی شبکه بعد از هر اغتشاش [۲۱-۲۳، ۳۰، ۳۳، ۳۵]، و (۳) مدل ترکیبی رخداد خرابی آبخاری که بعد از هر اغتشاش شبکه‌ی انتقال تحت تحلیل حالت دائمی و شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان قرار می‌گیرد تا پایداری دینامیکی ژنراتورها در تولید سناریوهای مختلف لحاظ شود [۲۹ و ۳۶]. اگرچه (به دلیل سرعت در تولید سناریو) مدل شبه استاتیکی بیشتر از مدل‌های دیگر مورد توجه محققان بوده است، اما مدل‌سازی نوع سوم دارای سرعتی به مراتب بیشتر از مدل‌سازی نوع اول است و نیز دارای دقتی به مراتب بیشتر از مدل‌سازی نوع دوم است.

در این مقاله رویکردی جدید در توسعه‌شبکه‌ی انتقال در مرحله‌ی برنامه‌ریزی به منظور کاهش آثار نامطلوب رخداد خرابی آبخاری در شبکه‌ی قدرت ارائه می‌شود. در این رویکرد، با تعریف ناحیه‌ی آسیب‌پذیر به جای مجموعه‌ی خطوط آسیب‌پذیر، از روش تحلیلی جدیدی استفاده می‌شود که مبتنی بر طرح‌های توسعه‌ی مختلف و ارزیابی-رتبه‌بندی آن‌ها، مناسب‌ترین طرح توسعه را که استحکام‌بخشی الکتریکی بیشتری در شبکه ایجاد می‌کند ارائه می‌نماید. نوآوری‌هایی که در این مقاله ارائه شده‌اند عبارتند از:

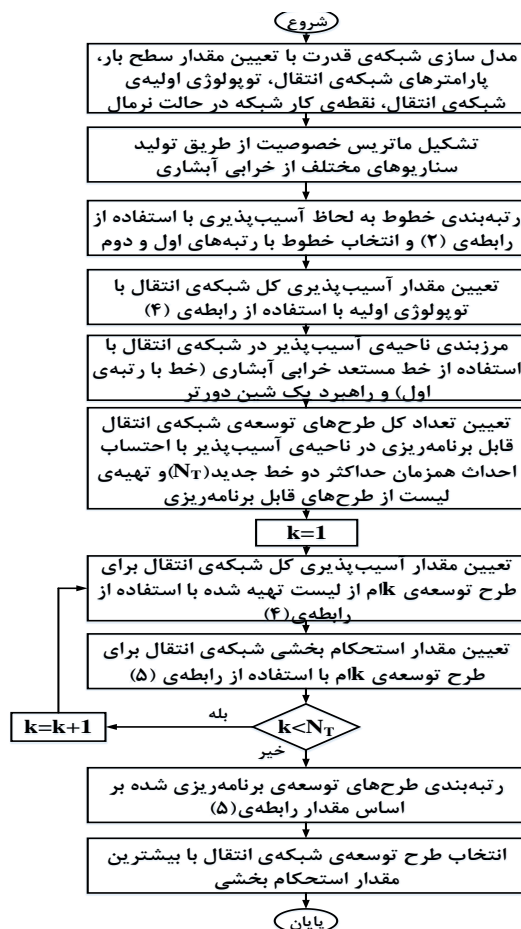
(۱) در این مقاله از یک رویکرد تحلیلی جدید استفاده می‌شود که مبتنی بر شناسایی یک ناحیه‌ی آسیب‌پذیر به‌جای شناسایی یک مجموعه از خطوط مستعد خرابی

هدف افزایش کفایت شبکه انتقال در تأمین بارهای مصرفی متصل به شبکه‌ی توزیع [۶ و ۷] و انتقال [۸-۱۱] با در نظر گرفتن منابع تولید تجدیدپذیر تعریف می‌شود. اما با رشد بار و به وجود آمدن مسائل پایداری در شبکه‌های انتقال، مسئله‌ی طرح توسعه‌ی شبکه‌ی قدرت به سمت برآورده‌سازی اهداف افزایش امنیت و قابلیت اطمینان در برابر اغتشاشات "N-1" [۱۲-۱۶]، اغتشاشات همزمان "N-k" [۱۷-۲۰]، و اغتشاشات یکی پس از دیگری "N-k" (مدل‌سازی خرابی آبخاری) [۲۱ و ۲۲] نیز پیش رفته است. تحقیقات نشان دادند که مدل‌سازی خرابی آبخاری تطابق بیشتری با رخداد واقعی خرابی آبخاری دارد. در نتیجه دقت مدل‌سازی طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال پیشنهاد شده در [۲۱ و ۲۲] بیشتر از مدل‌های [۱۷-۲۰] است.

مسئله‌ی طرح توسعه‌ی شبکه قدرت اکثراً به‌صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی، و غیر محدب مدل‌سازی شده و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف حل می‌شود [۵-۲۲]. رویکرد بهینه‌سازی می‌تواند یک فضای محدود از ناحیه‌ی جواب را در مدت‌زمان طولانی جستجو کند. در نتیجه دقت و بازدهی رویکرد بهینه‌سازی در حل طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با هدف کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری پایین است. به‌منظور غلبه بر مشکلات تشریح شده، یک رویکرد مبتنی بر تحلیل و ارزیابی در [۲۳ و ۲۴] پیشنهاد شد. در این رویکرد، یک مجموعه از خطوط مستعد خرابی آبخاری تشکیل شده و آن مجموعه به‌عنوان بهترین مکان برای نصب خطوط انتقال جدید پیشنهاد می‌شود. طرح توسعه‌ی پیشنهاد شده در [۲۳ و ۲۴] طرحی غیر فنی و غیراقتصادی است. زیرا برای استحکام‌بخشی به شبکه‌ی انتقال نیاز است که به ازای تمام خطوط موجود در مجموعه، یک خط موازی در توپولوژی اولیه احداث گردد.

دو نوع خطوط مستعد خرابی آبخاری وجود دارد. نوع اول، خطوطی هستند که قطع شدن آن‌ها به‌عنوان اغتشاش آغازکننده‌ی خرابی آبخاری باعث ایجاد خسارات به شبکه‌ی انتقال می‌شود [۲۵-۲۸]. نوع دوم، خطوطی هستند که خرابی آبخاری را انتشار می‌دهند یا به‌عبارت‌دیگر در اکثر رخدادهای خرابی آبخاری شرکت دارند [۲۳، ۲۴، ۲۹-۳۳]. طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با در نظر گرفتن خصوصیت انتشاردهندگی به همراه آغازکنندگی بسیار اقتصادی‌تر از در نظر گرفتن صرفاً آغازکننده‌ی خرابی آبخاری است. زیرا

ماتریس مذکور شامل شماره‌ی خطوطی است که در رخداد خرابی آبخاری از شبکه‌ی انتقال به صورت پی‌درپی قطع شده‌اند.



شکل ۱- روندنمای روش پیشنهادی در طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال به منظور کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری

هر خط از شبکه‌ی انتقال می‌تواند به عنوان یک اغتشاش آغازکننده‌ی خرابی آبخاری محسوب شود. بنابراین تعداد سطرهای ماتریس مذکور برابر با تعداد خطوط موجود در شبکه‌ی انتقال است. هر سطر از ماتریس یک سناریو محسوب می‌شود که قطع شدن آن ممکن است باعث قطع شدن پی‌درپی خطوط دیگر شود. در مدل‌سازی رخداد خرابی آبخاری از نوع شبه استاتیکی و ترکیبی، تعریف کردن یک معیار برای مشخص کردن پدیده‌ی اضافه بار شدن خطوط بعد از هر اغتشاش بسیار مهم است. در این مقاله یک شاخص تفکیک‌کننده برای یافتن خطوط اضافه بار شده در طی رخداد خرابی آبخاری و قطع آن با مشخصه عملکرد آبی رله‌ها پیشنهاد شده است که در رابطه‌ی (۱) نشان داده شده است.

آبخاری است تا طرحی فنی‌تر و اقتصادی‌تر از [۲۳] پیشنهاد شود.

۲) ارزش‌گذاری چند معیاره بر اساس خصوصیت انتشاردهندگی و جایگاه خطوط در توالی قطع‌شدگی برای شناسایی خطوط مستعد خرابی آبخاری
 ۳) کمی‌سازی آسیب‌پذیری کل شبکه‌ی انتقال با استفاده از مقدار شاخص آسیب‌پذیری خطوط.
 ۴) ارائه‌ی شاخص استحکام‌بخشی به منظور تحلیل و بررسی در مورد مقدار مؤثر بودن طرح‌های مختلف توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر
 ۵) بهبود مدل‌سازی خرابی آبخاری ارائه‌شده در حل مسئله‌ی طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با مدل‌سازی خرابی آبخاری از نوع ترکیبی.

قسمت‌های باقیمانده از این مقاله به این صورت بخش‌بندی می‌شود در بخش دوم، نحوه‌ی شناسایی ناحیه‌ی آسیب‌پذیر در شبکه‌ی انتقال تشریح خواهد شد. در بخش سوم، شاخص‌های آسیب‌پذیری شبکه و شاخص استحکام‌بخشی تشریح می‌شوند. در بخش چهارم عملکرد و کارایی رویکرد تحلیلی پیشنهادی در شبکه‌ی انتقال ۳۹ شین مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتیجه‌گیری در بخش پنجم بیان می‌شود.

۲- شناسایی ناحیه‌ی آسیب‌پذیر در شبکه‌های انتقال
 روندنمای روش تحلیلی پیشنهادی برای تولید طرح توسعه‌ی مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، نحوه‌ی شناسایی ناحیه‌ی آسیب‌پذیر در شبکه‌های انتقال و مکان‌یابی نصب خط جدید در آن ناحیه مهم‌ترین قسمت الگوریتم است که در ادامه تشریح می‌شوند.

مرزهای ناحیه‌ی آسیب‌پذیر، از طریق شناسایی خط مستعد خرابی آبخاری و راهبرد یک شین دورتر تعیین می‌گردد. با توجه به ناحیه‌ی آسیب‌پذیر مرزبندی شده، طرح‌های مختلف از توسعه‌ی خطوط انتقال در آن ناحیه برنامه‌ریزی شده و در نهایت طرحی که بیشترین استحکام‌بخشی در شبکه‌ی انتقال را حاصل کند، به عنوان طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در نظر گرفته می‌شود.

۱-۲- مدل‌سازی رخداد خرابی آبخاری

شناسایی خطوط مستعد خرابی آبخاری از طریق تشکیل ماتریس سناریوی خرابی آبخاری و تحلیل خصوصیات خرابی آبخاری در آن ماتریس انجام می‌شود. درایه‌های

شناسایی وضعیت ناپایداری دینامیکی ژنراتور از معیار ارائه شده در [۳۷] استفاده شده است.

گام پنجم: بررسی توپولوژی شبکه انتقال به لحاظ یکپارچگی و ارتباطات موجود بین شین‌ها، در صورتی که شبکه‌ی انتقال به چندین جزیره تقسیم شده باشد، تعداد جزایر مشخص شده و در هر جزیره گام ششم اجرا می‌شود. در صورت جزیره نشدن، گام ششم برای شبکه‌ی انتقال یکپارچه اجرا می‌شود.

گام ششم: محاسبه‌ی پخش بار بهینه‌ی متناوب، در صورتی که پخش بار بهینه‌ی متناوب همگرا نشد گام هفتم اجرا می‌شود و در غیر این صورت گام هشتم اجرا خواهد شد.

گام هفتم: بررسی توازن بین تولید و مصرف در جزایر، در صورتی که مجموع بارهای مصرفی بیشتر از مجموع حد بیشینه ظرفیت واحدها باشد حذف بار با روش [۳۰] انجام می‌شود. در صورتی که مجموع بار مصرفی در هر یک از جزایر کمتر از مجموع کمینه ظرفیت تولید باشد حذف ژنراتور به روش [۳۸] انجام می‌شود. بعد از برقراری توازن تولید و مصرف اگر پخش بار بهینه‌ی متناوب همگرا نشد، عمل حذف بار انجام می‌شود. اگر تعداد بار حذف شده بیشتر از تعداد مجاز شود، ناپایدار بلندمدت ولتاژ رخ داده است [۳۹]. در صورت بروز ناپایداری بلندمدت ولتاژ گام نهم اجرا شود و در غیر این صورت گام هشتم اجرا می‌شود.

گام هشتم: محاسبه‌ی معیار اضافه‌بار (رابطه‌ی (۱)) بعد از قطع شدن هر خط انتقال برای تمام خطوط انتقال باقی‌مانده در شبکه. خطوطی که دارای معیار اضافه‌بار بیشتر از عدد صفر شده باشند در یک مجموعه قرار می‌گیرند و آن خطی که دارای بیشترین مقدار معیار اضافه‌بار باشد از شبکه انتقال قطع شده و گام چهارم مجدداً اجرا می‌شود. در صورتی که مجموعه تهی باشد، یعنی هیچ خطی اضافه‌بار نشده است و گام نهم اجرا می‌شود.

گام نهم: در صورت بروز ناپایداری زاویه‌ی روتور، یا ناپایداری بلندمدت ولتاژ، و یا متوقف شدن رخداد اضافه‌بار در خطوط در الگوریتم، تولید توالی قطع‌شدگی خطوط متوقف خواهد شد و شرط در نظر گرفتن تمام خطوط انتقال به‌عنوان اغتشاش آغازکننده‌ی خرابی آبخاری مورد واری قرار می‌گیرد. اگر تمام اعضای مجموعه اغتشاشات سناریوهای مختلف خرابی آبخاری پایان یافته است، در غیر این صورت توپولوژی شبکه انتقال به حالت اولیه بازگردانده شده، عضو

$$FC_i^l = \left(\frac{S_{LO}^{l,k} - S_{norm}^l}{S_{max}^l} \right) \times \left[\min \left\{ 1, \exp \left(\frac{S_{LO}^{l,k} - S_{max}^l}{S_{max}^l} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

که در آن $S_{LO}^{l,k}$ توان ظاهری منتقل‌شده از خط l ام در حالتی است که خط k ام از شبکه انتقال قطع شده باشد، S_{norm}^l توان ظاهری منتقل‌شده از خط l ام در شرایط بهره‌برداری عادی، S_{max}^l حد بیشینه‌ی ظرفیت خط l ام در انتقال توان ظاهری، FC_i^l شاخص تعیین‌کننده‌ی خط اضافه‌بار شده است، و [.] عملگر جزء صحیح است. در صورتی که توان عبوری از خط انتقال بعد از قطع شدن خط انتقال دیگر بیشتر از حد بیشینه‌ی ظرفیت قابل تحمل خود شود، مقدار تابع نمایی بزرگ‌تر از عدد ۱ می‌شود و مقدار آن توسط تابع مینیمم به عدد ۱ برش می‌خورد. در نهایت عبارت داخل عملگر جزء صحیح به ازای رخداد اضافه‌بار در خط l ام برابر عدد ۱ می‌شود. اما در صورتی که خطی دچار اضافه‌بار نشود، مقدار تابع نمایی کمتر از عدد ۱ خواهد شد. در نهایت عبارت داخل جزء صحیح برابر صفر می‌شود. در صورتی که توان عبوری از خط انتقال بعد از قطع شدن خط انتقال دیگر بیشتر از حد بیشینه‌ی ظرفیت قابل تحمل خود شود، از بین خطوط دچار اضافه‌بار شده، خطی که دارای بیشترین مقدار فاصله‌ی نرمالیزه‌شده از مقدار قبل آغاز رخداد خرابی آبخاری باشد (دارای بیشترین مقدار FC باشد) به‌عنوان خط اضافه‌بار شده انتخاب شده و از شبکه‌ی انتقال حذف می‌شود.

الگوریتم تشکیل ماتریس سناریوهای خرابی آبخاری را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

گام اول: دانستن اطلاعات لازم از شبکه‌ی انتقال برای انجام پخش بار بهینه‌ی متناوب، تعیین تعداد بارهای مجاز به حذف شدن تحت شرایط افت ولتاژ و در نظر گرفتن شرایط بار پیک برای شبکه انتقال.

گام دوم: تشکیل یک مجموعه از اغتشاشات آغازکننده‌ی سناریو که هر خط انتقال یکی از اعضای آن مجموعه بوده و تعداد مجموعه برابر تعداد خطوط انتقال است.

گام سوم: انتخاب اولین خط از اعضای مجموعه‌ی آغازکننده‌ی سناریو و قطع کردن آن از شبکه انتقال.

گام چهارم: بررسی پایداری زاویه‌ی ژنراتورها [۲۲،۳۶]. در صورت ناپایدار بودن حداقل یک ژنراتور، گام نهم اجرا شده و در غیر این صورت گام پنجم اجرا می‌شود. به‌منظور

(۲) معیار رتبه‌بندی خطوط مبتنی بر اثرات نامطلوب خرابی آبخاری که تشریح شدند را نشان می‌دهد.

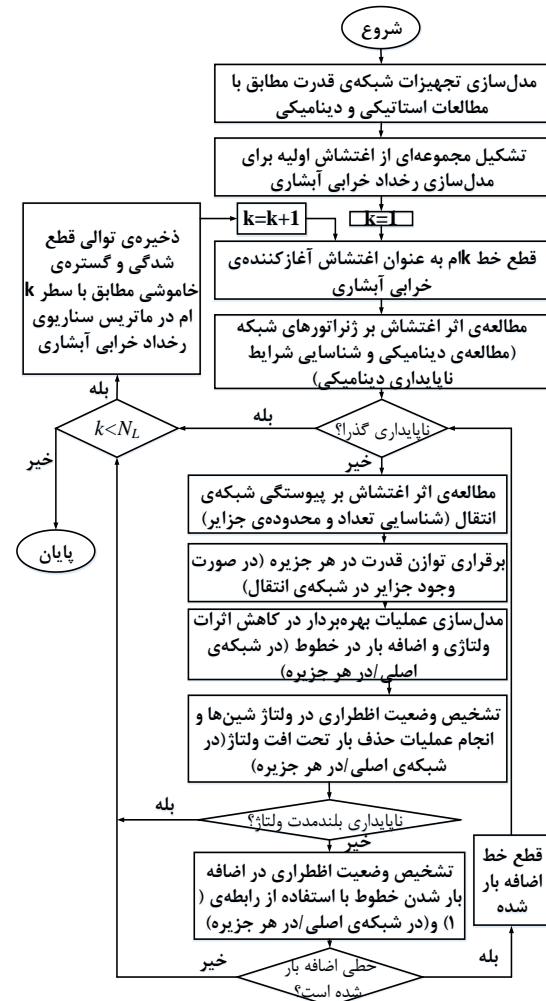
$$MVI_j = \omega_1 L_{\Delta_j} + \omega_2 CS_j + \omega_3 DS_j \quad (2)$$

که در آن MVI_j معیار خط Z است که حاوی چندین خصوصیت است، $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ضرایب وزنی است که مجموع آن‌ها برابر ۱ است و توسط برنامه‌ریز تعیین می‌شوند (در این مقاله، ضرایب وزنی به ترتیب برابر $0/23, 0/25, 0/53$ انتخاب شده است)، L_{Δ_j} مجموع درصد خاموشی مربوط به سناریوهای مختلفی است که خط Z در آن‌ها شرکت داشته است، CS_j مجموع تعداد دفعاتی است که Z در آن‌ها شرکت داشته است (خصوصیت انتشار دهندگی)، و DS_j مجموع فاصله‌ایی است که خط Z از آخرین خط قطع شده در سناریوهایی که خط Z در آن شرکت داشته است (خصوصیت جایگاه خط در توالی قطع شدگی) دارد. تحلیل خصوصیت DS_j مکان و موقعیت خط Z در توالی‌های مختلف از قطع شدگی و در سناریوهای مختلف از خرابی آبخاری را در شناسایی خطوط مستعد خرابی آبخاری در نظر می‌گیرد. هر چه خط Z در مکان‌های نزدیک به اغتشاش آغازکننده خرابی آبخاری باشد دارای اهمیت بیشتری می‌شود زیرا با ممانعت از اضافه‌بار شدن آن می‌توان از رخداد خرابی آبخاری جلوگیری کرد. درنهایت، خطوط در شبکه‌ی انتقال بر اساس معیار MVI رتبه‌بندی شده و خطی که دارای بیشترین MVI باشد به‌عنوان خط مستعد خرابی آبخاری و مرکز ناحیه‌ی آسیب‌پذیر تعیین می‌شود.

۲-۳- مرزبندی ناحیه‌ی آسیب‌پذیر با استفاده از راهبرد یک شین دورتر

خط مستعد خرابی آبخاری که از طریق قسمت قبل شناسایی شد به‌عنوان مرکز ناحیه‌ی آسیب‌پذیر در نظر گرفته شده و شین‌های ابتدایی و انتهایی که به خط مستعد خرابی آبخاری متصل هستند به ترتیب به‌عنوان شین‌های مرکزی اول و دوم در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر انتخاب خواهند شد. با استفاده از ماتریس تلاقی مربوط به شین‌های مرکزی اول و دوم، یک شین دورتر از آن‌ها به‌عنوان شین مرزی در نظر گرفته شده و در حقیقت، مرزهای ناحیه‌ی آسیب‌پذیر توسط شین‌های مرزی مشخص می‌شوند. شکل ۳- الف به‌صورت شماتیک ناحیه‌ی آسیب‌پذیر برای یک شبکه‌ی انتقال با توپولوژی اولیه را نشان می‌دهد که در آن

بعدی مجموعه‌ی آغازکننده‌ی سناریو در نظر گرفته شده و از شبکه‌ی انتقال قطع، و گام چهارم اجرا می‌شود. شکل (۲) نحوه‌ی ارتباط گام‌های اول الی نهم را نشان می‌دهد.



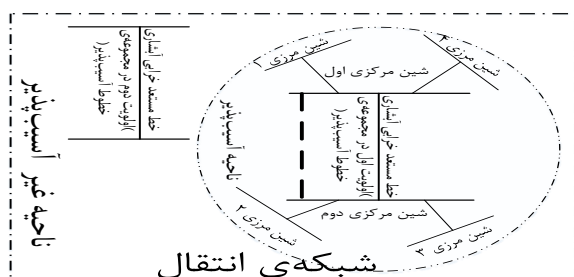
شکل ۲- روندنمای مدل پیشنهادی از رخداد خرابی آبخاری

۲-۲- شناسایی خط مستعد خرابی آبخاری

به‌منظور تعریف معیاری که مقدار مستعد بودن هر خط را بعد از تشکیل شدن ماتریس سناریوهای خرابی آبخاری مقدار دهی کند، تعداد دفعاتی که هر خط در درایه‌های مختلف از ماتریس قرار داشته است شمارش شده و به‌عنوان خصوصیت انتشار دهندگی رخداد خرابی آبخاری در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این مقاله مکان هر یک از خطوط در هر سناریو از آخرین خط قطع شده در آن سناریو نیز به‌عنوان خصوصیت جایگاه خط در توالی قطع شدگی در نظر گرفته شده است. به‌علاوه مجموع خاموشی هر سناریو که هر خط در آن شرکت داشته‌اند نیز به‌عنوان یک اثر نامطلوب خرابی آبخاری در نظر گرفته شده است. رابطه‌ی

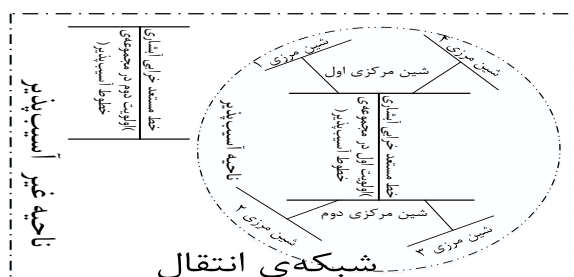
طرح‌های مختلف از توسعه‌ی شبکه انتقال را برنامه‌ریزی و از بین طرح‌های مختلف، طرحی که دارای معیار. استحکام‌بخشی بیشتری است را انتخاب کرد. شکل (۳) قسمت ب الی قسمت ح انواع مختلف از طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال برای احداث همزمان حداکثر دو خط موازی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته نشده است. در قسمت الف، خط مستعد خرابی آبخاری (خطی که در مجموعه‌ی خطوط آسیب‌پذیر در رتبه‌ی اول قرار می‌گیرد و به‌عنوان اولویت اول برای احداث خط موازی قلمداد می‌شود)، شین‌های مرکزی اول و شین‌های مرکزی دوم و شین‌های مرزی مشخص شده‌اند با مشخص شدن ناحیه‌ی آسیب‌پذیر و مرزبندی آن، می‌توان



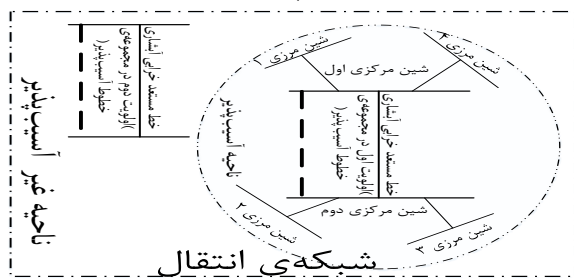
شبکه‌ی انتقال

(ب)



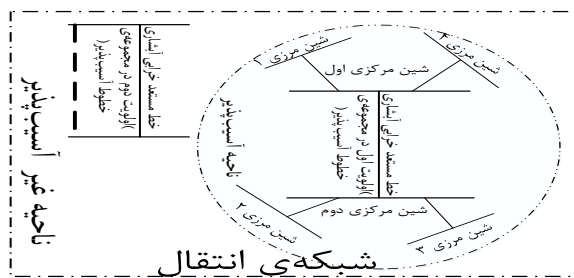
شبکه‌ی انتقال

(الف)



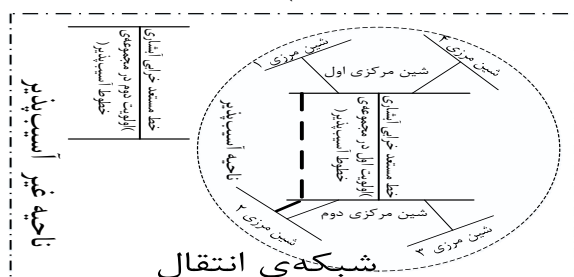
شبکه‌ی انتقال

(د)



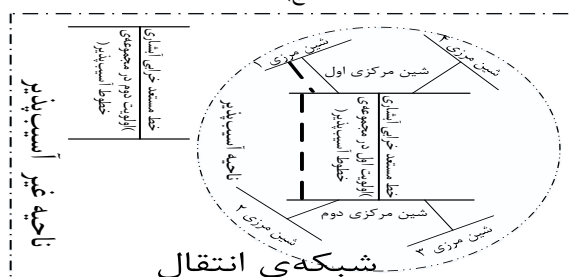
شبکه‌ی انتقال

(ج)



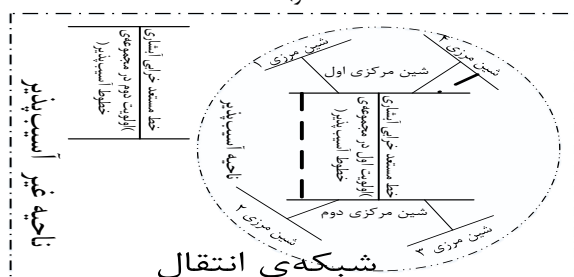
شبکه‌ی انتقال

(و)



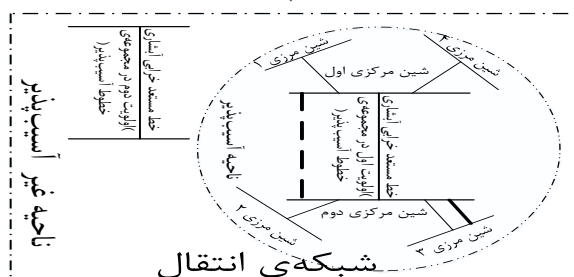
شبکه‌ی انتقال

(ه)



شبکه‌ی انتقال

(ح)



شبکه‌ی انتقال

(ز)

شکل ۳: شمایی از نحوه‌ی مرزبندی ناحیه‌ی آسیب‌پذیر، (الف) ناحیه‌ی آسیب‌پذیر و توپولوژی اولیه‌ی آن. (ب) احداث خط موازی با خط با اولویت اول برای احداث خط موازی (ج) نصب خط موازی با خط با اولویت دوم برای احداث خط موازی. (د) احداث همزمان دو خط موازی با اولویت اول و دوم برای احداث خط موازی. (ه) احداث همزمان دو خط موازی با خطوط بین شین ۱ و شین مرکزی دوم. (و) احداث همزمان دو موازی با خطوط بین شین ۲ و شین مرکزی اول. (ز) احداث همزمان دو موازی با خطوط بین شین ۳ و شین مرکزی اول. (ح) احداث همزمان دو موازی با خطوط بین شین ۴ و شین مرکزی دوم

معیار ارزش هر خط در مستعد بودن به لحاظ خرابی آبخاری (MVI) حاصل می‌شود. معیار رتبه‌بندی خطوط در بخش ۲ تشریح شده است. اگر معیار رتبه‌بندی مربوط به خط j در توپولوژی اولیه به صورت MVI_j باشد، مقدار نرمالیزه شده‌ی معیار رتبه‌بندی با استفاده از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید.

$$\overline{MVI}_j = \frac{MVI_j}{\sum_{j=1}^{NL} MVI_j} \quad (3)$$

که در آن NL تعداد خطوط موجود در شبکه‌ی انتقال و \overline{MVI}_j معیار نرمالیزه شده‌ی رتبه‌بندی خطوط است. در این صورت معیار آسیب‌پذیری شبکه‌ی انتقال با استفاده از رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود:

$$Val = \frac{FN}{NL \times NL} \sum_{s=1}^M \sum_{j=1}^{a_j} \overline{MVI}_j^s \quad (4)$$

که در آن NL تعداد خطوط موجود در شبکه‌ی انتقال، M تعداد سناریوهای خرابی آبخاری، a_j تعداد خطوط قطع‌شده در سناریوی s ام از خرابی آبخاری، FN تعداد سناریوهایی که جزو دسته‌ی سناریوهای خرابی آبخاری قرار گرفته‌اند و Val شاخص آسیب‌پذیری کل شبکه‌ی انتقال است.

۳-۲- معیار استحکام‌بخشی به شبکه‌ی انتقال

اگر فرض شود مقدار شاخص آسیب‌پذیری شبکه‌ی انتقال با توپولوژی اولیه به صورت Val^B تعریف شود و مقدار شاخص آسیب‌پذیری شبکه‌ی انتقال بعد از توسعه یافتن برابر Val^E باشد، در این صورت شاخص استحکام‌بخشی از طریق رابطه‌ی (۵) بدست می‌آید.

(۵)

$$STN = \frac{Val^B - Val^E}{Val^B}$$

که در آن STN شاخص استحکام‌بخشی به شبکه‌ی انتقال است. اضافه کردن خطوط انتقال ممکن است شبکه را استحکام ببخشد و یا آن را به لحاظ الکتریکی تضعیف نماید. به‌طوریکه $STN > 0$ نشان دهنده‌ی مستحکم‌تر شدن شبکه‌ی انتقال است. همچنین $STN < 0$ نشان می‌دهد که شبکه‌ی انتقال تضعیف شده است.

۴- مطالعه موردی و نتایج عددی

در شکل (۳ قسمت ب) الی (قسمت ج) طرح‌های مختلف برای توسعه شبکه‌ی انتقال به صورت خط چین نشان داده است. از شکل (۳ قسمت ب الی قسمت ج)، مشخص می‌شود که دو نوع طرح توسعه مؤثر می‌تواند در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر وجود داشته باشد. طرح توسعه‌ی نوع اول، یعنی موازی کردن یک خط با خط مستعد خرابی آبخاری است. طرح توسعه‌ی نوع اول می‌تواند به دو طریق انجام شود، یا خط جدید با خط موجود در رتبه‌ی اول به لحاظ آسیب‌پذیری (شکل ۳ قسمت ب)، طرح توسعه در داخل ناحیه‌ی آسیب‌پذیر (و یا در اولویت دوم (شکل ۳ قسمت ج)، طرح توسعه در ناحیه‌ی غیر آسیب‌پذیر) احداث می‌شود. اما طرح نوع دوم احداث همزمان دو خط موازی است (شکل ۳ قسمت د الی قسمت ح). شکل (۳ قسمت د) رویکرد مرجع [۲۳] برای توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال با هدف کاهش رخداد خرابی آبخاری را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، طرح توسعه‌ی [۲۳] تنها شامل یک طرح توسعه می‌شود و آن، احداث خطوط جدید و موازی با تمام خطوط موجود در مجموعه‌ی خطوط آسیب‌پذیری است (شکل ۳ قسمت د). اما در این مقاله با استفاده از تعریف ناحیه‌ی آسیب‌پذیر با راهبرد یک شین دورتر به جای مجموعه‌ی خطوط آسیب‌پذیر، طرح‌های مختلف توسعه از نوع اول و دوم (شکل ۳ قسمت ب الی ج) برنامه‌ریزی شده و از بین طرح‌های برنامه‌ریزی شده طرحی که دارای معیار استحکام‌بخشی بالاتری باشد انتخاب می‌شود. در نتیجه طرح‌های توسعه با رویکرد ناحیه‌ی آسیب‌پذیر (شکل ۳ قسمت ب الی ج و قسمت ه الی ح) کارتر از طرح توسعه با رویکرد [۲۳] است (شکل ۳ قسمت د).

۳- معیار استحکام‌بخشی به شبکه‌ی انتقال با

استفاده از شاخص آسیب‌پذیری شبکه‌ی انتقال

در این مقاله به منظور ارزیابی مقدار استحکام‌بخشی طرح‌های مختلف توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر، معیارهای آسیب‌پذیری کل شبکه‌ی انتقال و معیار مقدار استحکام‌بخشی به کل شبکه‌ی انتقال پیشنهاد می‌شود. از معیار آسیب‌پذیری کل شبکه‌ی انتقال به منظور محاسبه‌ی معیار استحکام‌بخشی استفاده می‌شود که در ادامه تشریح خواهد شد.

۳-۱- معیار آسیب‌پذیری شبکه‌ی انتقال

در این مقاله، معیار آسیب‌پذیری شبکه‌ی انتقال از طریق

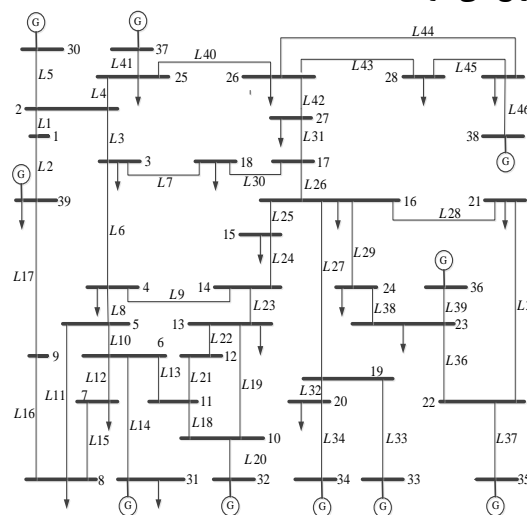
ژنراتور است. تعداد ۱۰ ژنراتور موجود در این سیستم با مدل مرتبه ۴ تعریف و مجهز به سیستم تحریک *IEEE-DCI* شده‌اند [۴۰ و ۴۲]. همچنین اطلاعات مربوط به هزینه احداث خطوط با یکدیگر برابر در نظر گرفته شده است [۴۳]. شکل (۴) نمودار تک‌خطی مربوط به این شبکه را نشان می‌دهد. توپولوژی شبکه‌ی انتقال نشان داده شده در شکل (۴)، به‌عنوان توپولوژی اولیه در نظر گرفته شده و طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال بر اساس آن طرح‌ریزی می‌شود. به‌منظور مشخص کردن حداکثر تعداد خطوطی که می‌تواند به‌صورت همزمان نصب شود، ابتدا تحلیل سود-هزینه برای شبکه‌ی مذکور انجام شد. تحلیل سود-هزینه با معیار نسبت استحکام‌بخشی طرح توسعه به تعداد خطوط نصب شده، نشان داد که احداث همزمان حداکثر دو خط موازی برای شبکه‌ی نمونه مناسب خواهد بود. بنابراین، نتایج به‌ازای طرح توسعه‌ی احداث همزمان حداکثر دو خط تشریح می‌شود.

۴-۲- مکانیابی نصب خط جدید در شبکه‌ی ۳۹ شین
روش تحلیلی پیشنهادی برای کاهش رخداد خرابی آبخاری با طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در قالب دو نمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

الف) مورد اول: خطوط موجود در توپولوژی اولیه‌ی شبکه‌ی انتقال شبکه‌ی ۳۹ شین با روش تحلیلی که در بخش ۲ تشریح شده بود مورد رتبه‌بندی و ارزیابی قرار می‌گیرد. به این منظور ابتدا ماتریس سناریوی خرابی آبخاری برای این شبکه‌ی قدرت تشکیل می‌شود که در شکل (۵) نشان داده شده است همان‌طور که از این شکل مشخص می‌شود ستون اول از ماتریس سناریوهای خرابی آبخاری مربوط به خطوطی است که قطع شدن آن‌ها باعث رخداد خرابی آبخاری می‌شود. همچنین خطوطی که با قطع شدن آن‌ها الگوریتم مدل خرابی آبخاری نیز متوقف شده است، در انتهای توالی قطع‌شدگی خطوط قرار دارند. همان‌طور که از شکل مذکور مشخص می‌شود، تعداد ۱۹ سناریو منجر به رخداد خرابی آبخاری شده است که خط شماره ۳ در تمام سناریوهای خرابی آبخاری شرکت دارد. شاخص آسیب‌پذیری برای خط مذکور از رابطه‌ی (۲)، با توجه به مقادیر پارامترهای مربوط به این خط در رابطه‌ی مذکور که به ترتیب برابر ۱۲/۴۱۲۰، ۱۹ و ۴۹ هستند برابر با

به‌منظور شبیه‌سازی و پیاده‌سازی طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال برای کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری در شبکه‌های نمونه ۳۹ شین، از نرم‌افزار مت‌پاور^۱ [۴۰] و متداین^۲ [۴۱] تحت نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

۴-۱- معرفی سیستم قدرت نمونه‌ی ۳۹ IEEE شین
شبکه قدرت ۳۹ شین با مجموع توان اکتیو و راکتیو مصرفی به ترتیب برابر با ۶۰۹۷/۱ مگاوات و ۱۴۰۹/۵ مگاوار است. این شبکه‌ی قدرت دارای ۳۹ شین، ۴۶ خط انتقال و ۱۰ ژنراتور است. تعداد ۱۰ ژنراتور موجود در این سیستم با مدل مرتبه ۴ تعریف و مجهز به سیستم تحریک *IEEE-DCI* شده‌اند [۴۰ و ۴۲]. همچنین اطلاعات مربوط به هزینه احداث خطوط با یکدیگر برابر در نظر گرفته شده است [۴۳]. شکل (۴) نمودار تک‌خطی مربوط به این شبکه را نشان می‌دهد. توپولوژی شبکه‌ی انتقال نشان داده شده در شکل (۴)، به‌عنوان توپولوژی اولیه در نظر گرفته شده و طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال بر اساس آن طرح‌ریزی می‌شود. به‌منظور مشخص کردن حداکثر تعداد خطوطی که می‌تواند به‌صورت همزمان نصب شود، ابتدا تحلیل سود-هزینه برای شبکه‌ی مذکور انجام شد. تحلیل سود-هزینه با معیار نسبت استحکام‌بخشی طرح توسعه به تعداد خطوط نصب شده، نشان داد که احداث همزمان حداکثر دو خط موازی برای شبکه‌ی نمونه مناسب خواهد بود. بنابراین، نتایج به‌ازای طرح توسعه‌ی احداث همزمان حداکثر دو خط تشریح می‌شود.

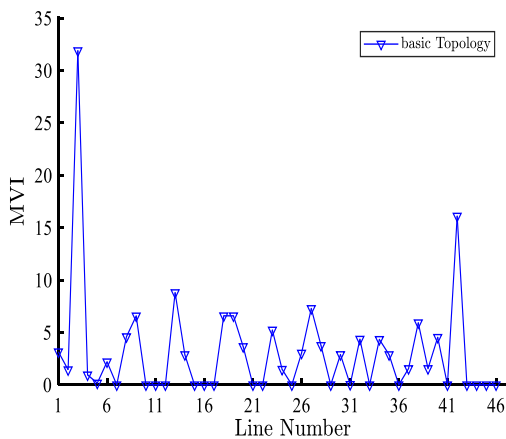


شکل ۴- نمودار تک‌خطی شبکه قدرت ۳۹ IEEE شین

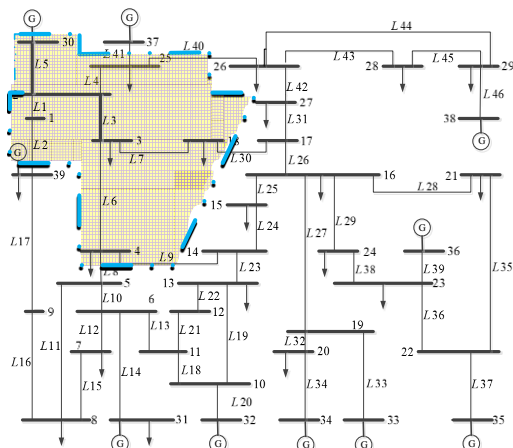
² MatDyn

¹ Matpower

یک خط موازی با خط شماره ۳ که بین دو شین مرکزی وجود داشته است، (۲) احداث یک خط موازی با خط شماره ۴۲ خارج از ناحیه آسیب‌پذیر، (۳) احداث همزمان دو خط موازی بین شین مرکزی شماره ۱۸ و شین مرکزی دوم، و شین مرکزی اول و شین مرکزی دوم، همزمان دو خط موازی بین شین مرکزی ۱ و شین مرکزی اول، و شین مرکزی اول و شین مرکزی دوم، (۵) احداث همزمان دو خط موازی بین شین مرکزی شماره ۳۰ و شین مرکزی اول، و شین مرکزی اول و شین مرکزی دوم، (۶) احداث همزمان دو خط موازی با خطوط موجود بین شین مرکزی ۲۵ و شین مرکزی اول، و شین مرکزی اول و شین مرکزی دوم، طرح توسعه‌ی نوع دوم، (۷) احداث همزمان دو خط موازی بین شین مرکزی شماره ۴ و شین مرکزی دوم، و شین مرکزی اول و شین مرکزی دوم، (۸) احداث همزمان دو خط موازی با خط شماره ۳ و خط شماره ۴۲ (اجرای رویکرد مرجع [۲۳]).

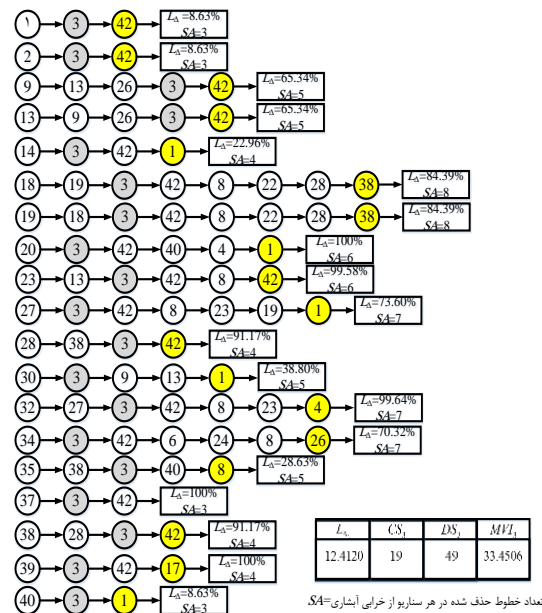


شکل ۶: مقادیر معیار MVI مربوط به هر خط از شبکه‌ی انتقال



شکل ۷- محدوده‌ی ناحیه‌ی آسیب‌پذیر (ناحیه‌ی هاشور خورده)

۳۳/۴۵۰۶ بدست می‌آید. این مقدار در مقایسه با شاخص آسیب‌پذیری سایر خطوط در شکل (۶) نشان داده شده است. این در حالی است که با توجه به شکل (۶)، خط ۴۲ دارای رتبه‌ی دوم به لحاظ آسیب‌پذیری است. احداث همزمان دو خط موازی با خط شماره ۳ و ۴۲ (اولویت‌های اول و دوم برای احداث خطوط موازی جدید) تنها طرح توسعه‌ای است که با در نظر گرفتن رویکرد [۲۳] برای این شبکه بدست می‌آید.



شکل ۵- ماتریس سناریوهای مختلف خرابی آشناری برای شبکه‌ی قدرت ۳۹ شین

ولی در رویکرد پیشنهادی، امکان ارزیابی طرح‌های مختلف توسعه با تعریف ناحیه‌ی آسیب‌پذیر بوجود می‌آید. به‌طوریکه، خط شماره ۳ به‌عنوان خط مرکزی در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر در نظر گرفته شده و شین‌های دو طرف آن به شماره‌های ۲ و ۳ به ترتیب شین‌های مرکزی اول و دوم هستند. با استفاده از ماتریس تلاقی، شین‌های ۱، ۲۵، ۳۰ و به‌عنوان شین‌های مرزی متصل به شین ۲ و شین‌های ۴ و ۱۸ به‌عنوان شین‌های مرزی متصل به شین شماره ۳ در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۷) محدوده‌ی ناحیه‌ی آسیب‌پذیر برای شبکه‌ی انتقال شبکه‌ی ۳۹ شین را نشان می‌دهد. همچنین معیار آسیب‌پذیری شبکه‌ی انتقال مربوط به توپولوژی اولیه با استفاده از رابطه‌ی ۴ حاصل شده است که برابر مقدار ۰/۰۹۵۱ است.

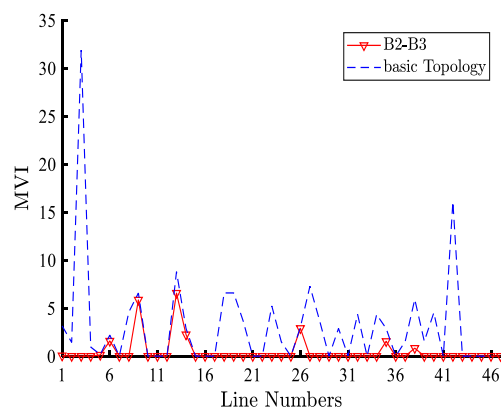
طرح‌های مختلفی از توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال که در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر برنامه‌ریزی می‌شوند عبارتند از: (۱) احداث

موازی با خط ۴۲ باعث کاهش یافتن کمترین اثرات نامطلوب خرابی آبخاری به نسبت ردیف طرح شماره ۱ شده است. این به آن معناست که طرح توسعه‌ای کارا است که حتماً خطی جدید موازی با خط آسیب‌پذیر با اولویت اول احداث شده باشد. اما احداث همزمان دو خط جدید که باعث استحکام بخشی به شبکه‌ی انتقال شود هدف اصلی این مقاله است. از این‌رو، مقدار استحکام بخشی طرح موازی کردن همزمان دو خط بین‌شینه‌های مرزی و مرکزی اول و دوم در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر با مقدار استحکام بخشی موازی کردن همزمان دو خط با خطوط مستعد خرابی آبخاری با یکدیگر و با رویکرد [۲۳] (ردیف طرح شماره ۸) مقایسه شده است. جدول ۱ نشان می‌دهد که مقدار معیار آسیب‌پذیری شبکه‌ی انتقال (*Val*) و معیار استحکام بخشی (*STN*) مربوط به احداث همزمان دو خط موازی بین شینه‌های ۲ و ۳۰، و شینه‌های ۲ و ۳ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را دارد.

بنابراین، بهترین طرح برای احداث همزمان دو خط جدید موازی، طرح ردیف شماره ۵ است. همچنین این جدول نشان می‌دهد که احداث همزمان دو خط موازی با خطوط مستعد خرابی آبخاری (ردیف طرح شماره ۸). بهبودی در استحکام بخشی به شبکه‌ی انتقال نسبت به حالت احداث یک خط موازی با مستعدترین خط خرابی آبخاری ایجاد نمی‌کند. زیرا با توجه به شکل (۸)، احداث یک خط موازی باعث شده است که خط شماره ۴۲ غیر آسیب‌پذیر شود و عملاً نصب خط موازی با خط ۴۲ بی‌اثر شود. این به آن معناست که اجرای رویکرد [۲۳] در بعضی از شرایط می‌تواند طرحی غیر اقتصادی شود. زیرا در این مثال خاص، یک خط که تاثیری در استحکام بخشی شبکه ندارد به طور اضافی احداث شده است. اما ردیف طرح شماره ۵ که از رویکرد ناحیه‌ی آسیب‌پذیر بدست آمده است باعث بهبود در استحکام بخشی به شبکه انتقال به اندازه ۹۳/۹۲٪ و نسبت به ردیف طرح شماره ۱ و ۸ به اندازه ۴/۸۲٪ شده است.

به علاوه، مقادیر مختلف معیار *MVI* مربوط به هر یک از طرح‌های توسعه شبکه انتقال با مقدار معیار *MVI* مربوط به توپولوژی اولیه در شکل (۹) نشان داده شده و بایکدیگر مقایسه شده است. شکل (۱۰) توپولوژی شبکه‌ی انتقال ۳۹ شینه را به ازای بهترین طرح توسعه شبکه انتقال با نصب

معیار استحکام بخشی هر یک از طرح‌های توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر مورد ارزیابی قرار گرفته و با رویکرد مرجع [۲۳] مقایسه شده است. شکل (۸) مقدار معیار *MVI* برای طرح شماره ۱ را نشان می‌دهد و با مقدار *MVI* مربوط به توپولوژی اول مقایسه می‌کند. همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است، این طرح توسعه باعث می‌شود مقدار معیار *MVI* برای اکثر خطوط شبکه برابر عدد صفر شود. زیرا مستعدترین خط یعنی خط شماره ۳، خطی است که در اکثر سناریوهای خرابی آبخاری شرکت کرده است و اکثر خطوط دیگر در شبکه‌ی انتقال به دلیل قطع شدن خط شماره ۳ از شبکه انتقال قطع شده‌اند. بنابراین، جلوگیری از اضافه بار شدن خط شماره ۳ از بروز خرابی آبخاری و انتشار آن جلوگیری می‌کند. به طوری که تعداد خطوطی از توپولوژی اولیه شبکه که دارای معیار *MVI* غیر صفر بوده است برابر تعداد ۲۸ است. اما با احداث یک خط موازی با خط شماره ۳، تعداد این خطوط به تعداد ۷ خط کاهش می‌یابد.



شکل ۸- مقادیر معیار *MVI* مربوط به هر خط از شبکه‌ی انتقال در طرح نوع اول توسعه شبکه انتقال

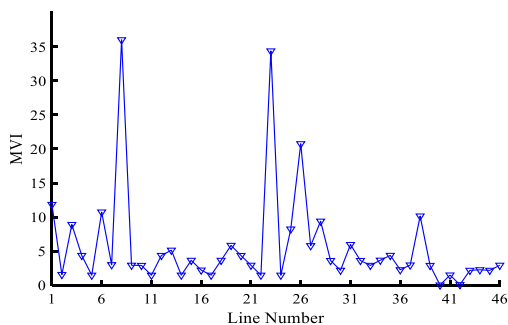
مقدار معیار آسیب‌پذیری شبکه بعد از احداث خط موازی به مقدار ۰/۰۰۹۹ کاهش می‌یابد که باعث ۸۹/۶۰٪ استحکام بخشی به شبکه‌ی انتقال می‌شود. مقادیر مربوط به معیار استحکام بخشی طرح ردیف ۱ در جدول ۱ تشریح شده است. مقدار معیار استحکام بخشی طرح شماره ۲ کمتر از طرح شماره ۱ است. زیرا با توجه به شکل ۵، خط شماره ۴۲ در اکثر سناریوها بعد از قطع شدن خط شماره ۳ در شبکه و معمولاً در مکان‌های ۳ تا آخر قرار دارد. بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رود، احداث یک خط

همزمان دو خط و به منظور کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری را نشان می‌دهد.

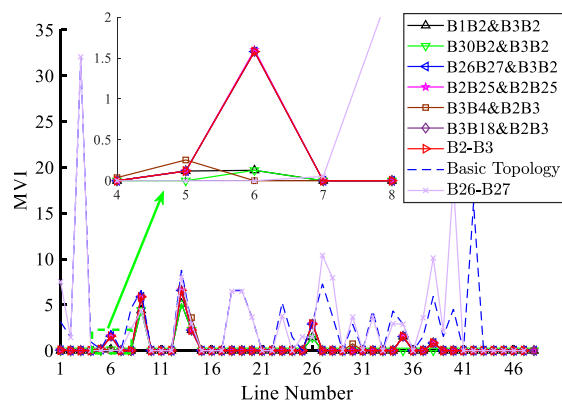
جدول ۱- مقادیر مربوط به معیار استحکام بخشی برای طرح‌های مختلف توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در ناحیه‌ی آسیب پذیر در مورد اول

رتبه	STN	Val	احداث خط دوم		احداث خط اول		ردیف طرح	رویکرد
			شین ابتدایی	شین انتهایی	شین ابتدایی	شین انتهایی		
۴	۰/۸۹۶۰	۰/۰۰۹۹	-	-	۳	۲	۱	ناحیه‌ی آسیب‌پذیر
۵	۰/۰۰۸۶	۰/۰۹۴۳	-	-	۲۷	۲۶	۲	
۴	۰/۸۹۶۰	۰/۰۰۹۹	۳	۲	۳	۱۸	۳	
۲	۰/۹۱۲۰	۰/۰۰۸۴	۳	۲	۲	۱	۴	
۱	۰/۹۳۹۲	۰/۰۰۵۸	۳	۲	۲	۳۰	۵	
۴	۰/۸۹۶۰	۰/۰۰۹۹	۳	۲	۲	۲۵	۶	
۳	۰/۸۹۷۲	۰/۰۰۹۸	۳	۲	۳	۴	۷	
۴	۰/۸۹۶۰	۰/۰۰۹۹	۲۷	۲۶	۳	۲	۸	

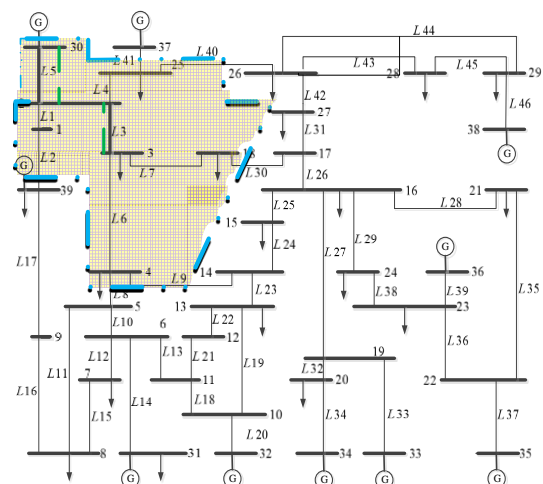
شماره ۲۹ در شکل (۴) از مقدار ۲۸۴/۳ مگاوات به مقدار ۱۰۰۰ مگاوات رشد پیدا کرده است. همچنین سطح بار شبکه به ۶۱۰۱/۹ مگاوات و ۱۰۳۵/۶ مگاوات تغییر کرده است. با توجه به شرایط بهره‌برداری، شبکه‌ی انتقال تحت تحلیل ارزیابی و شناسایی مستعدترین خط انتقال برای خرابی آبخاری قرار گرفت. شکل (۱۱) معیار MVI را برای هر خط انتقال شبکه‌ی ۳۹ شین نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص می‌شود، خطوط با شماره‌های ۸ و ۲۳ به ترتیب اولویت‌های اول و دوم مستعد بودن به لحاظ خرابی آبخاری هستند. بنابراین، خط انتقال شماره‌ی ۸ به‌عنوان خط مرکزی در نظر گرفته می‌شود و شین‌های ۴ و ۵ به ترتیب شین‌های مرکزی اول و دوم هستند. مرزهای ناحیه‌ی آسیب‌پذیر را شین‌های ۳، ۱۴، ۶، و ۸ مشخص می‌کنند. به‌طوری‌که، شین‌های ۳ و ۴ به‌عنوان شین مرکزی متصل به شین مرکزی اول با شماره‌ی ۴ تعریف شده و شین‌های ۶ و ۸ شین‌های مرکزی متصل به شین مرکزی دوم با شماره‌ی ۵ هستند.



شکل ۱۱- مقادیر معیار MVI مربوط به هر خط از شبکه‌ی انتقال با توپولوژی اولیه مربوط به مورد دوم



شکل ۹- مقدار معیار MVI برای طرح توسعه‌ی با اولویت اول و اولویت دوم



شکل ۱۰- مکان نصب همزمان دو خط موازی

(ب) مورد دوم: به‌منظور صحت سنجی روش پیشنهادی، طرح توسعه انتقال شبکه برای سطح بار و شرایط بهره‌برداری دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شرایط بهره‌برداری جدید، فرض می‌شود که بار متصل به شین

خط موازی خط شماره ۸ باعث کاهش استحکام بخشی به شبکه انتقال به اندازه ۶/۰۷۳ درصد شده و معیار آسیب پذیری شبکه انتقال به مقدار ۰/۲۲ افزایش یافته است. همچنین معیار MVI برای ردیف طرح شماره ۱ در جدول ۲، در شکل ۱۲ نشان داده شده است و با معیار MVI مربوط به توپولوژی اولیه مقایسه شده است.

جدول ۲- مقادیر مربوط به معیار استحکام بخشی برای طرح های مختلف توسعه شبکه انتقال در ناحیه آسیب پذیر

مربوط به مورد دوم

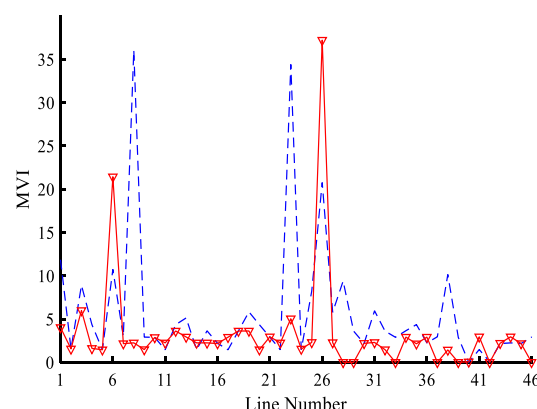
رتبه	STN	Val	احداث خط دوم		احداث خط اول		ردیف طرح	رویکرد
			شین ابتدایی	شین انتهایی	شین ابتدایی	شین انتهایی		
۵	-۰/۰۶۷۳	۰/۲۲۰۰	-	-	۵	۴	۱	ناحیه آسیب پذیر
۶	-۰/۱۵۳۷	۰/۲۳۷۴	-	-	۱۴	۱۳	۲	
۳	۰/۴۲۵۰	۰/۱۱۸۳	۸	۵	۵	۴	۳	
۱	۰/۶۰۹۴	۰/۰۸۰۴	۳	۴	۵	۴	۴	
۷	-۰/۲۴۰۸	۰/۲۵۵۳	۱۴	۴	۵	۴	۵	
۲	۰/۴۶۵۳	۰/۱۱۰۰	۶	۵	۵	۴	۶	[۲۳]
۴	۰/۴۲۴۰	۰/۱۱۸۵	۱۴	۱۳	۵	۴	۷	

باشد. اما این جدول نشان می دهد که برخلاف مورد اول، احداث تنها یک خط جدید باعث استحکام بخشی شبکه انتقال نمی شود. بنابراین نیاز است که طرح های مربوط به احداث همزمان بیشتر از یک خط مورد بررسی قرار بگیرند. ابتدا، مقدار استحکام بخشی طرح توسعه برنامه ریزی شده با رویکرد [۲۳] که در ردیف طرح شماره ۷ در جدول ۲ نشان داده شده است مورد بررسی قرار می گیرد. همان طور که این جدول نشان می دهد، طرح توسعه شماره ۷ باعث استحکام بخشی به شبکه انتقال به اندازه ۴۲/۴۲ درصد می شود. اما احداث همزمان دو خط موازی بین شین های ۴ و ۵، و شین های ۳ و ۴ (ردیف طرح شماره ۴ در جدول ۲) باعث استحکام بخشی ۶۰/۹۲ درصدی به شبکه انتقال خواهد شد. در نتیجه در اولویت و رتبه اول قرار می گیرد. در نتیجه، طرح توسعه ردیف ۴ که با استفاده از رویکرد پیشنهادی برنامه ریزی شده است دارای کارایی بهتری نسبت به طرح ردیف شماره ۷ به اندازه ۳۰/۴۲ درصد در استحکام بخشی به شبکه انتقال است.

۵- نتیجه گیری

خرابی آبخاری یکی از رخدادهای فاجعه باری است که اثرات نامطلوب آن می تواند از طریق توسعه شبکه انتقال کاهش پیدا کند. از این رو، در این مقاله تلاش شد که با

مناسب ترین مکان برای احداث خط موازی در طرح توسعه شبکه انتقال، خط شماره ۸ است. معیار آسیب پذیری شبکه در شرایط بهره برداری جدید برابر مقدار ۰/۲۰۵۷ است. مقدار معیار استحکام بخشی طرح توسعه مذکور به صورت ردیف طرح شماره ۱ در جدول ۲ نشان داده شده است. همان طور که جدول ۲ نشان می دهد، احداث تنها یک



شکل ۱۲- مقادیر معیار MVI مربوط به هر خط از شبکه

شکل (۱۲) نشان می دهد که نه تنها معیار MVI برای بعضی از خطوط کاهش نیافته است، بلکه باعث افزایش معیار MVI برای اکثر خطوط موجود در شبکه انتقال نیز شده است. نتایج حاصل از معیار استحکام بخشی اجرای احداث یک خط موازی با اولویت دوم جدول ۲ نشان داده شده است (طرح ردیف شماره ۲). مقایسه ردیف طرح ۱ و ۲ در جدول ۲ نشان می دهد که طرح توسعه ردیف شماره ۲ دارای معیار استحکام بخشی بیشتری نسبت به طرح توسعه ردیف شماره ۲ در جدول ۲ است. بنابراین، طرح توسعه کارا طرحی است که در آن حتما یک خط موازی با خط مستعد خرابی آبخاری با اولویت اول احداث شده

آسیب‌پذیر شده است. به‌منظور اولویت‌دهی به طرح‌های مختلف توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال و ارزیابی آن‌ها، معیارهای آسیب‌پذیری کل شبکه‌ی انتقال و معیار استحکام‌بخشی به شبکه‌ی انتقال پیشنهاد شدند.

رویکرد پیشنهادی در شبکه‌ی انتقال ۳۹ شین مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. نتایج عددی نشان دادند که احداث همزمان دو خط موازی با مستعدترین خطوط برای خرابی آبخاری به‌عنوان اعضای مجموعه‌ی خطوط مستعد خرابی آبخاری لزوماً باعث بیشترین استحکام‌بخشی به شبکه‌ی انتقال نخواهند شد. در نتیجه، رویکرد تحلیلی پیشنهادی یک نسخه‌ی توسعه یافته‌ای از رویکرد تحلیلی حل مسئله‌ی طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری است که امکان در نظر گرفتن طرح‌های توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال به صورت فنی-اقتصادی را فراهم می‌کند.

پیشنهاد یک رویکرد تحلیلی، طرح توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال به‌صورتی برنامه‌ریزی شود که شبکه به لحاظ الکتریکی مستحکم‌تر شده و رخداد خرابی آبخاری و اثرات نامطلوب آن کاهش یابد. رویکرد پیشنهادی بر اساس شناسایی یک ناحیه‌ی آسیب‌پذیر استوار است که امکان برنامه‌ریزی کردن و ارزیابی کردن طرح‌های مختلف توسعه را ایجاد کرده است. در این مقاله، ناحیه‌ی آسیب‌پذیر با استفاده از روش تحلیل اثرات نامطلوب خرابی آبخاری، شناسایی خط مستعد خرابی آبخاری، ماتریس تلاقی شین‌ها و راهبرد یک شین دورتر شناسایی و مرزبندی شد. همچنین طرح‌های مختلف توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در ناحیه‌ی آسیب‌پذیر شناسایی شد. به‌منظور افزایش بازدهی طرح توسعه، کارایی، و فنی-اقتصادی بودن آن، بجای آنکه طرح توسعه برای تمام اعضای موجود در مجموعه‌ی خطوط مستعد خرابی آبخاری برای شبکه‌ی انتقال برنامه‌ریزی شود، تنها محدود به ناحیه‌ی

مراجع

- [1] U. C. Force, S. Abraham, Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations, US-Canada Power System Outage Task Force, Canada, 2004.
- [2] N. E. Ferc, Arizona-southern California outages on 8 September 2011: causes and recommendations, FERC and NERC, USA, 2012.
- [3] J. J. Romero, "Blackouts illuminate India's power problems", IEEE spectrum, Vol. 49, No. 10, October 2012, pp. 11-12.
- [4] M. Eremia, M. Shahidehpour, Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control, 1th ed., John Wiley & Sons, NJ, USA, 2013.
- [۵] مهدی درفشیان مرام، نیما امجدی، "جلوگیری از رخداد ناپایداری گذرا و ولتاژ با استفاده از طرح اقدامات اصلاحی مبتنی بر قطع تولید و حذف بار"، دوره ۱۴، شماره ۴۷، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۱۳۷-۱۵۰.
- [۶] مسعود احمدی گرچی، نیما امجدی، "برنامه‌ریزی توسعه‌ی پویایی شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جدید دو سطحی"، دوره ۱۴، شماره ۴۴، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱۴۳-۱۵۷.
- [7] N. Amjady, A. Attarha, S. Dehghan, A. Conejo, "Adaptive robust expansion planning for a distribution network with DERs", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 2, March 2018, pp. 1698-1715.
- [8] A. Hajebrahimi, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, "Probabilistic multi-objective transmission expansion planning incorporating demand response resources and large-scale distant wind farms", IEEE Systems Journal, 2017 Jun, Vol. 11, No. 2, January 2017, pp. 1170-1181.
- [9] S. Abbasi, H. Abdi, "Robust Transmission Network Expansion Planning (IGDT, TOAT, Scenario Technique Criteria)", InRobust Optimal Planning and Operation of Electrical Energy Systems, February 2019, pp. 199-218.
- [۱۰] شهاب دهقان، نیما امجدی، "برنامه‌ریزی غیر قطعی توسعه‌ی چند ساله‌ی سیستم قدرت با در نظر گرفتن مزرعه‌های بادی به کمک ترکیب برنامه‌ریزی تصادفی و معیار حداقل-حداکثر پشیمانی" دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۴۱-۵۰.
- [11] A. Arabali, M. Ghofrani, M. Etezadi-Amoli, M. S. Fadali, M. Moeini-Aghtaie, "A multi-objective transmission expansion planning framework in deregulated power systems with wind generation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 6, November 2014, pp. 3003-3011.

- [12] I. D. Silva, M.J. Rider, R. Romero, A. V. Garcia, C. A. Murari, "Transmission network expansion planning with security constraints", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 6, November 2005, pp. 828-836.
- [13] A. Moreira, A. Street, JM. Arroyo, "An adjustable robust optimization approach for contingency-constrained transmission expansion planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 4, July 2015, pp. 2013-2022.
- [14] E. Mortaz, LF. Fuerte-Ledezma, G. Gutiérrez-Alcaraz, J. Valenzuela, "Transmission expansion planning using multivariate interpolation", Electric Power Systems Research, Vol. 1, No. 126, September 2015, pp. 87-99.
- [15] X. Zhang, K. Tomsovic, A. Dimitrovski, "Security constrained multi-stage transmission expansion planning considering a continuously variable series reactor", IEEE Transactions on Power Systems, November 2017, Vol. 32, No.6, pp.4442-4450.
- [16] M. Peker, AS. Kocaman, BY. Kara, "A two-stage stochastic programming approach for reliability constrained power system expansion planning", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 103, December 2018, pp. 458-69.
- [17] M. Carrión, JM. Arroyo, N. Alguacil, "Vulnerability-constrained transmission expansion planning: A stochastic programming approach", IEEE Transactions on Power Systems, November 2007, Vol. 22, No. 4, pp. 1436-1445.
- [18] A. Moreira, A. Street, JM. Arroyo, "An adjustable robust optimization approach for contingency-constrained transmission expansion planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 4, July 2015, pp. 2013-2022.
- [19] S. Hong, H. Cheng, P. Zeng, "N-K constrained composite generation and transmission expansion planning with interval load", IEEE Access. Vol. 5, February 2017, pp. 2779-2789.
- [20] Z. Wu, Y. Liu, W. Gu, Y. Wang, C. Chen, "Contingency-constrained robust transmission expansion planning under uncertainty", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 101, October 2018, pp.331-338.
- [21] J. Shortle, S. Rebennack, FW. Glover, "Transmission-capacity expansion for minimizing blackout probabilities", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, September 2014, pp.43-52.
- [22] E. Karimi, A. Ebrahimi, "Inclusion of blackouts risk in probabilistic transmission expansion planning by a multi-objective framework", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 5, September 2015, pp. 2810-2817.
- [23] C. Luo, J. Yang, Y. Sun, J. Yan, H. He, "Identify critical branches with cascading failure chain statistics and hypertext-induced topic search algorithm", InPower & Energy Society General Meeting, 2017 IEEE, Chicago, July 2017, pp. 1-5.
- [24] PD. Hines, I. Dobson, P. Rezaei, "Cascading power outages propagate locally in an influence graph that is not the actual grid topology", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, No. 2, March 2017, pp. 958-967.
- [25] H. Bai, S. Miao, "Hybrid flow betweenness approach for identification of vulnerable line in power system" IET Generation, Transmission & Distribution. Vol. 9, No.12, September 2015, pp.1324-1331.
- [26] F. Wenli, L. Zhigang, H. Ping, M. Shengwei, "Cascading failure model in power grids using the complex network theory", IET Generation, Transmission & Distribution. Nonmember 2016, Vol. 10, No. 15, pp.3940-3949.
- [27] S. Poudel, Z. Ni, W. Sun, "Electrical distance approach for searching vulnerable branches during contingencies", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No.4, July 2018, pp.3373-3382.
- [28] K. Lai, Y. Wang, D. Shi, MS. Illindala, X. Zhang, Z. Wang, "A Resilient Power System Operation Strategy Considering Transmission Line Attacks", IEEE Access, Vol. 6, October 2018, pp.70633-70643.
- [29] A. Wang, Y. Luo, G. Tu, P. Liu, "Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory", IEEE Transactions on power systems, February 2011; Vol. 26, No.1, pp.442-450.
- [30] J. Yan, Y. Tang, H. He, Y. Sun, "Cascading failure analysis with DC power flow model and transient stability analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.30, No.1, January 2015, pp.285-297.

- [31] J. Qi, K. Sun, S. Mei, "An interaction model for simulation and mitigation of cascading failures," IEEE Transactions on Power Systems, March 2015, Vol. 30, No.2, pp.804-819.
- [32] W. Ju, K. Sun, J. Qi, "Multi-layer interaction graph for analysis and mitigation of cascading outages", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, June 2017, Vol. 7, No.2, pp.239-249.
- [33] X. Wei, S. Gao, T. Huang, E. Bompard, R. Pi, T. Wang, "Complex Network Based Cascading Faults Graph for the Analysis of Transmission Network Vulnerability", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Early Access, May 2018.
- [34] Song, E. Cotilla-Sanchez, G. Ghanavati, PD. Hines, "Dynamic modeling of cascading failure in power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, NO. 3, May 2016, pp. 2085-2095.
- [35] W. Ju, K. Sun, R. Yao, "Simulation of cascading outages using a power-flow model considering frequency", IEEE Access, Vol. 6, June 2018, pp. 37784-37795.
- [36] R. Yao, S. Huang, K. Sun, F. Liu, X. Zhang, S. Mei, "A multi-timescale quasi-dynamic model for simulation of cascading outages", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 4, July 2016, pp.3189-3201.
- [37] M. He, J. Zhang, V. Vittal, "Robust online dynamic security assessment using adaptive ensemble decision-tree learning", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 28, No. 4, November 2013, pp. 4089-4098.
- [38] A. Moeini, I. Kamwa, M. de Montigny, L. Lenoir. "Application of Battery Energy Storage for network vulnerability mitigation", in Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016 IEEE/PES May 2016.
- [39] S. Mei, Y. Ni, G. Wang, S. Wu, "A study of self-organized criticality of power system under cascading failures based on AC-OPF with voltage stability margin", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, NO. 4, November 2008, pp. 1719-1726.
- [40] Matpower Home Page, Online: "www.Pserc.cornell.edu/matpower."
- [41] S. Cole, R. Belmans, "Matdyn, a new Matlab-based toolbox for power system dynamic simulation", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 26, NO. 3, August 2011, pp. 1129-1136.
- [42] A. Pai, Energy function analysis for power system stability, Springer Science & Business Media; 1th ed., Germany, 2012.