

## روشی نوین برای تشخیص خطوط بحرانی با پتانسیل ایجاد خروج‌های پی‌درپی در شبکه‌های قدرت

احسان علییان<sup>۱</sup>، محمدرضا آقامحمدی<sup>۲</sup>، محسن کیا<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشکده برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

ehsanaliyan@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m\_ghamhammadi@sbu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی برق، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mohsenkia@pardisiau.ac.ir

چکیده: خاموشی‌ها همواره از عوامل اصلی تهدید برای امنیت سیستم‌های قدرت هستند. خروج‌های پی‌درپی از اصلی‌ترین عوامل خاموشی‌ها شناخته می‌شوند. خطوط انتقال از مهم‌ترین تجهیزات شبکه قدرت هستند که خروج آن‌ها می‌تواند منجر به خروج‌های پی‌درپی بعدی شود. در این مقاله، با استفاده از درخت تصمیم‌گیری که از روش‌های هوش مصنوعی است، به شناسایی آنلاین خطوط بحرانی شبکه که منجر به ایجاد خروج‌های پی‌درپی می‌شوند، پرداخته می‌شود. درخت تصمیم آموزش‌دیده قادر است در هر نقطه کار، شکننده بودن یا نبودن شبکه را تخمین بزند و بهره‌بردار خواهد توانست بر طبق آن شرایط بهره‌برداری را تغییر دهد. بدین منظور در گام اول با معرفی شاخص‌های مناسب و بر اساس خاموشی‌های ایجادشده در تمامی آرایش‌های بار و تولید مختلف و همچنین آرایش‌های مختلف شبکه، ورودی‌ها و خروجی‌های لازم برای درخت تصمیم تولید می‌شوند. در گام بعد، از نتایج به‌دست‌آمده در گام اول با استفاده از آموزش درخت تصمیم‌گیری، الگوریتمی برای شناسایی آنلاین خطوط بحرانی و شکنندگی شبکه برای ایجاد خاموشی پیشنهاد می‌شود. روش پیشنهادی در شبکه استاندارد ۳۹ باس IEEE پیاده‌سازی و نتایج آن ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم قدرت، خاموشی سراسری، خروج‌های پی‌درپی، درخت تصمیم‌گیری، شکنندگی شبکه.

## ۱. مقدمه

از دیرباز مسئله امنیت و پایداری سیستم‌های قدرت به صورت مسئله‌ای جدی مورد توجه بوده است؛ زیرا هرچند طراحان سیستم قدرت با در نظر گرفتن فواصل اطمینانی مناسب برای ظرفیت تولید ژنراتورها، ظرفیت انتقال خطوط، ترانس‌ها، سعی در طراحی سیستمی با قابلیت اطمینان بالا داشته‌اند، حوادث پیش‌بینی نشده گاهی عملکرد سیستم را دچار اختلال کرده است.

مسئله خروج المان‌های سیستم قدرت (خروج با برنامه‌ریزی یا خروج اتفاقی) شرایط مختلفی را از نظر کاری برای سیستم ایجاد می‌کند. در صورتی که این خروج‌ها بدون برنامه‌ریزی و ناگهانی باشند، خروج یک المان ممکن است به دلیل عدم هماهنگی لازم در بین المان‌های شبکه (ژنراتورها، ترانس‌ها، خطوط و بارها و...) باعث خروج المان‌های دیگر گردد. این روند به گونه‌ای پیش خواهد رفت که بعد از خروج چند المان، در صورت عملکرد مناسب سیستم حفاظتی، بقیه شبکه پایدار خواهد ماند. در غیر این صورت سیستم دچار اختلالات بیشتری شده و ادامه این روند باعث ایجاد خاموشی ناحیه‌ای یا سراسری خواهد شد. به آسیب‌پذیری شبکه در برابر خروج یک تجهیز، میزان شکنندگی و به آسیب‌پذیری شبکه در برابر خروج آن، تجهیز گفته می‌شود. در هر شبکه که آسیب‌پذیری ناشی از خروج یک تجهیز کمتر باشد، آن شبکه پایدارتر است.

تحلیل داده‌های خاموشی سراسری نشان می‌دهد که هزینه و احتمال خاموشی سراسری بسیار بیشتر از حد تصور است [۱]. تقریباً علت تمامی خاموشی‌های سراسری خروج‌های پی‌درپی هستند. هر خروج باعث ضعیف‌تر شدن سیستم شده و احتمال خروج‌های بعدی را افزایش می‌دهد و در نهایت باعث خاموشی می‌شود. انواع مدل‌های خروج‌های پی‌درپی با جزئیات در مراجع [۲-۴] توصیف شده است. در این مدل‌ها، روش‌ها و مکانیزم‌های مختلفی به کار رفته است. در هیچ‌یک از این مدل‌ها شبکه به صورت دقیق مدل نشده است.

تحلیل پخش بار مستقیم<sup>۱</sup> روشی تقریبی برای تعیین بارهای استاتیک در شبکه قدرت است. در این روش از تلفات خطوط و اختلاف ولتاژ گره‌ها صرف‌نظر می‌شود. کاربردی بودن این روش بدان سبب است که می‌توان توسط آن بار تقریبی تجهیزات را بدون نیاز به روش‌های مبتنی بر تکرار محاسبه کرد. این روش در مقایسه با تحلیل پخش بار متناوب<sup>۲</sup> از قبیل روش‌های نیوتن-رافسون و گوس-سایدل، که روش‌هایی مبتنی بر تکرارند، از مزیت‌های خوبی برخوردار

است [۵-۶]. دقت پخش بار مستقیم نسبت به پخش بار متناوب به دلیل ساده‌سازی‌های انجام‌شده در آن کمتر است. با وجود این، این ساده‌سازی‌ها تقریب خوبی از توزیع توان در تجهیزات را می‌دهند و به دلیل کم شدن بار محاسبات، روشی مناسب برای مدل‌سازی خروج‌های پی‌درپی است. در تحلیل حالت پایای خروج‌های پی‌درپی، به دفعات از مدل پخش بار مستقیم که تقریبی از معادلات متناوب سیستم قدرت بوده، استفاده شده است. در مرجع [۷] یک بسته نرم‌افزاری با نام متکسک<sup>۳</sup> در نرم‌افزار متلب برای تحلیل خروج‌های پی‌درپی با کمک مدل پخش بار مستقیم برای اهداف آکادمیک ارائه شده است. در مرجع [۸] یک روش احتمالاتی برای پیش‌بینی خروج پی‌درپی در سیستم قدرت ارائه شده است که بر اساس حد قیود حرارتی خطوط و اولین حادثه، می‌تواند خروج خط انتقال بعدی را پیش‌بینی کند. اما مشکلات و خرابی‌های سیستم حفاظتی در نظر گرفته نشده است. در مقاله مرجع [۹] خاموشی با استفاده از پخش بار مستقیم مدل شده و خرابی‌های پنهان سیستم حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۱۰] درباره بازیابی، کاهش و پیش‌بینی خروج‌های پی‌درپی گزارشی ارائه شده است که در آن، مدل‌های مختلف شبیه‌سازی برای تحلیل خروج‌های پی‌درپی آمده است. تمامی این مدل‌ها روی مجموع معینی از فرضیات، برای دستیابی به تقریبی از سیستم قدرت واقعی تمرکز دارند. اما هنوز به دلیل پیچیدگی زیاد شبکه قدرت، مدل کاملی ارائه نشده است. با وجود مطالعات گوناگون درباره اعتبارسنجی، استفاده از نظریه گراف و شبکه پیچیده برای مدل‌سازی خروج‌های پی‌درپی، در خصوص مقایسه این روش‌ها کار زیادی انجام نشده است. دابسون و همکارانش [۱۱-۱۲] مدل احتمالاتی آپا<sup>۴</sup> را ارائه کردند. کارراس [۱۳-۱۴] درباره بحرانیت خودسازمان‌دهی شده در خروج‌های پی‌درپی بر پایه مدل منچستر [۱۵-۱۶] و مدل آبخاری [۱۷-۱۸] کار کرده است. بیشتر مدل‌های ارائه شده بر پایه پخش بار مستقیم هستند که همین امر مدل‌سازی خاموشی سراسری بر اساس پخش بار مستقیم را توجیه‌پذیر می‌سازد.

در مقاله مرجع [۱۹] مقایسه‌ای بین دو روش آنالیز پایداری گذرا<sup>۵</sup> و روشی بر پایه پخش بار مستقیم ارائه شده و نتایج آن روی شبکه ۳۹ باس تست شده است. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که این دو روش تا آبخارهای اولیه نتایج مشابهی دارند، اما با پیشرفت بیشتر خروج‌ها، نتایج از هم فاصله می‌گیرند.

3. Matcase

4. OPA

5. Transient Stability Analysis (TSA)

1. DC Load Flow

2. AC Load Flow

فلوی توان اکتیو<sup>۲</sup> خطوط به‌عنوان ورودی درخت تصمیم آموزش داده‌شده.

در ادامه، در بخش (۲) مدل‌سازی و الگوریتم پیشنهادی حوادث پی‌درپی بررسی شده است. شاخص پیشنهادی خاموشی در بخش (۳) پیشنهاد شده است. در بخش (۴) به شبیه‌سازی و مطالعه موردی پرداخته شده است. در نهایت در بخش (۵) نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲. مدل پیشنهادی حوادث پی‌درپی

در ادامه، ابتدا با معرفی شاخص‌های مناسب و بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته در تمامی حالات شبکه، ورودی‌های لازم برای آموزش درخت تصمیم تولید می‌شود؛ سپس از نتایج به‌دست‌آمده در گام اول، برای تهیه الگوریتمی برای شناسایی آنلاین خطوط بحرانی و شکنندگی شبکه بهره‌گرفته می‌شود. ساختار الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌سازی حوادث پی‌درپی در شکل (۱) نشان شده است. فرایند الگوریتم را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد.

### الف. آغاز خروج‌های پی‌درپی

چون هدف روش پیشنهادی شناسایی خطوط بحرانی شبکه با پتانسیل گسترش خروج‌های پی‌درپی و ایجاد خاموشی در شبکه است، در شرایط کاری مورد مطالعه، باید خط مورد نظر به‌عنوان حادثه آغازگر خارج شده و اثر آن روی رفتار سیستم بررسی شود. به همین دلیل در شرایط بارگذاری و آرایش مختلف شبکه، اولین اقدام برای شروع خروج‌های پی‌درپی، خارج کردن خط آغازگر است.

### ب. خروج خطوط دچار اضافه‌بار

خارج شدن خطوط پربار یکی از اصلی‌ترین علل خروج‌های پی‌درپی است [۲۲]. بنابراین از این به بعد، هر یک از این خروج‌ها یک حادثه خروج پی‌درپی نامیده می‌شود. مجموعه خروج‌های پی‌درپی که به‌دنبال حادثه آغازگر اولیه رخ می‌دهد و بخشی از شبکه را خاموش می‌کند، به‌عنوان یک مسیر خاموشی تعریف می‌شود. هنگامی که اولین حادثه اتفاق می‌افتد، توان برخی از خطوط ممکن است از حد توان حرارتی آن‌ها عبور کند. رله‌ها در برابر این اضافه‌بار واکنش نشان می‌دهند و پس از زمان معینی، خط را از مدار خارج می‌کنند.

در این مقاله، زمان عملکرد رله‌های حفاظتی، آبی در نظر گرفته شده است، به همین دلیل در هر لحظه برای تمامی خطوط، نسبت توان عبوری به حد توان حرارتی‌شان محاسبه شده و خط دارای بزرگ‌ترین نسبت خارج می‌شود.

با وجود اینکه مدل‌های مختلفی برای مدل‌سازی خاموشی‌های سراسری ارائه شده، مطالعات در زمینه پیش‌بینی خاموشی به‌ندرت انجام شده است؛ همین امر ضرورت انجام این پروژه را بیش از پیش آشکار می‌کند. اگر بتوان قبل از وقوع حادثه، تجهیزاتی را که خروج آن‌ها منجر به چنین حوادثی می‌شوند شناسایی کرد، می‌توان گام مؤثری در جلوگیری از به‌وجود آمدن چنین حوادثی برداشت.

با توجه به اینکه اندازه‌گیری و محاسبه شاخص‌هایی از قبیل میزان بار خاموش شده و تعداد جزایری که در اثر خروج خط بحرانی تشکیل می‌شوند فقط زمانی امکان‌پذیر است که شبکه این اتفاق را تجربه کرده باشد، یکی از روش‌های بسیار مناسب برای تشخیص احتمال خطر برای شبکه، آموزش شبکه هوشمند در حالت عدم اتصال به شبکه (آفلاین) و استفاده از آن در هنگام بهره‌برداری از شبکه است؛ زیرا داده‌های ورودی شبکه، همان اطلاعات بهره‌برداری در حالت کار عادی شبکه هستند، پس قبل از خروج خطوط بحرانی و حادث شدن خاموشی، می‌توان از بروز این حوادث جلوگیری کرد.

در این مقاله، میزان توانمندی درخت تصمیم‌گیری در دستیابی به هدف مورد نظر بررسی شده است. برای اینکه شبکه آموزش‌دیده به‌خوبی عمل کند، باید نمونه‌ها به‌قدری باشند که تمامی شرایط احتمالی بهره‌برداری را پوشش دهند. هدف از این مقاله، شناسایی آنلاین خطوطی است که در وضعیت بحرانی قرار دارند و خروجشان می‌تواند منجر به وقوع حوادث پی‌درپی و در نهایت ایجاد خاموشی در شبکه گردد. از آنجا که اغلب خروج پی‌درپی خطوط پربار عامل اصلی خاموشی‌ها شناخته می‌شود، تمرکز اصلی این مقاله روی این موضوع است. برای مثال، خطوط پربار در ایالت اوهایو<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۳، به‌صورت پی‌درپی خارج شدند و خاموشی بزرگی را در آمریکای شمالی رقم زدند [۲۰]، همچنین خروج پی‌درپی خطوط از آلمان تا اروپای شرقی در سال ۲۰۰۶ خاموشی اروپا را به وجود آورد [۲۱].

جنبه‌های نوآوری این مقاله شامل گزینه‌های زیر است:

- ارائه یک مدل کارآمد و کاربردی برای مدل‌سازی حوادث پی‌درپی.
- ارائه روشی برای پیش‌بینی شکنندگی شبکه در برابر خروج یک خط.
- آموزش درخت تصمیم به‌صورت آفلاین و به‌کارگیری آن به‌صورت آنلاین و بررسی پتانسیل شبکه برای ایجاد خاموشی سراسری در هر لحظه.
- استفاده از داده‌های واحد اندازه‌گیری فازور (PMU<sup>۲</sup>) برای تهیه

1. Ohio US State

2. Phasor Measurement Unit

- مقدار تمامی ولتاژها برابر یک است.
  - اختلاف زاویه فاز ولتاژها بسیار کم است.
- با در نظر گرفتن این فرضیه‌ها توان عبوری از خطی که گره  $i$  را به گره  $j$  متصل می‌کند، از تابع زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$f_{ij} = B_{ij} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

که  $B_{ij}$  سوسپتانس خط متصل‌کننده گره  $i$  ام شبکه به گره  $j$  ام شبکه است.

می‌توان معادله (۱) را برحسب توان‌های تزریقی و مشخصات توپولوژیکی سیستم به صورت ماتریسی زیر نوشت:

$$f = Y \times A \times \bar{\theta} \quad (2)$$

که  $Y$  ماتریس قطری سوسپتانس خطوط است. ماتریس  $A$  ماتریس تلاقی است که سطرهای آن نماینده خطوط و ستون‌های آن نماینده گره‌های شبکه هستند.

$$A_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{if the line } k \text{ leaves node } i \\ -1 & \text{if the line } k \text{ enters node } i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

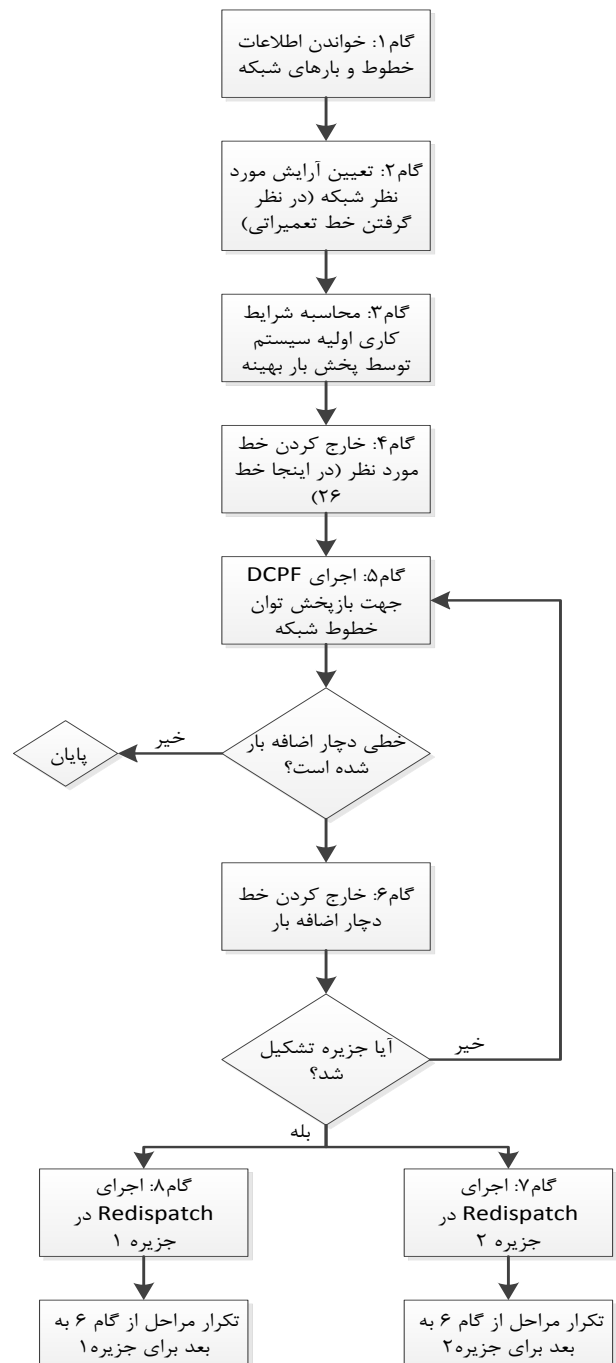
#### د. تشکیل جزایر به واسطه خروج‌های پی‌درپی

در طول فرایند حوادث پی‌درپی، یک شبکه به هم پیوسته ممکن است به جزایری تبدیل شود که هریک می‌تواند به صورت مستقل به کار خود ادامه دهد. هر جزیره توپولوژی<sup>۱</sup> و نقطه کار مخصوص به خود دارد و اینکه در هر جزیره خروج‌ها ادامه پیدا کند، امکان دارد.

برای ساده‌تر شدن فرایند شبیه‌سازی، هنگامی که جزیره تشکیل می‌شود، با آن جزیره همانند شبکه مستقل به هم پیوسته رفتار می‌شود. اما نکته قابل توجه اینجاست هنگامی که جزیره تشکیل می‌شود، ممکن است تعادل بار و تولید بر هم بخورد. به همین دلیل اگر در جزیره‌ای تولید از بار بیشتر شود، از کوچک‌ترین ژنراتور شروع به قطع بار می‌کنند و در صورت بیشتر بودن بار شبکه از میزان تولید، بارزدایی انجام می‌شود تا تعادل بار و تولید برقرار شود.

#### ۳. شاخص خاموشی

به منظور ارزیابی درجه و شدت آسیب‌رسانی مرتبط با خروج یک خط و به عبارتی میزان شکنندگی و آسیب‌پذیری شبکه در برابر خروج هر خط، باید شاخصی تعریف شود. بر اساس این شاخص می‌توان پتانسیل خروج خطوط برای ایجاد حوادث پی‌درپی منجر به خاموشی را ارزیابی کرد. همچنین می‌توان بحرانی بودن خطوط مختلف را به طور مقایسه‌ای برای رتبه‌بندی تعیین کرد.



شکل (۱): فرایند ارزیابی خاموشی ناشی از خروج‌های پی‌درپی به دنبال حادثه خروج یک خط مشخص

#### ج. محاسبات پخش بار مستقیم

هنگام وقوع حادثه جدید، یک پخش بار مستقیم اجرا می‌شود تا با همان شرایط تولید و مصرف قبل، میزان توان عبوری خطوط محاسبه شود. در مسئله پخش بار مستقیم، هدف، محاسبه توان خطوط با داشتن توان‌های تزریقی به سیستم است. فرضیات پخش بار مستقیم بدین شرح است:

- سیستم بدون تلفات بوده و رسانایی هر خط صفر است.

درخت تصمیم<sup>۱</sup> پیشگوی آسیب‌رسانی به کار می‌رود؛ درحالی‌که کل بار خاموش‌شده مربوط به حادثه اولیه خط ۲۶، داده‌های خروجی درخت تصمیم را می‌سازند.

جدول (۱) خلاصه‌ای از آمار خاموشی‌ها و تعداد جزایر تشکیل‌شده را به‌ازای خروج خط ۲۶ به‌عنوان حادثه آغازگر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، برای مثال بار کل ۳۰۰ سناریوی بهره‌برداری در محدوده ۶۰۰۰-۶۵۰۰ MW است که از بین آن‌ها ۱۵۹ سناریو در برابر خروج خط ۲۶ به‌عنوان خط آسیب‌رسان بحرانی هستند. کل بار ازدست‌رفته در تمامی این ۱۵۹ سناریو، ۴۲۴۳۱۸ MW است. همان‌طور که در ردیف انتهایی جدول مشخص است، خاموشی کل مربوط به این سناریو ۴۲۴۳۱۸ MW است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش سطح بار سیستم، تمامی شاخص‌های خاموشی که آسیب‌رسانی خط ۲۶ را نشان می‌دهند، افزایش می‌یابند.

جدول (۱): آمار کلی از شبیه‌سازی حوادث پی‌درپی با خروج خط ۲۶ به‌عنوان حادثه آغازگر اولیه

سطح بار	سطح بار	سطح بار	سطح بار	سطح بار	سطح بار	سطح بار
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
بالای ۷۰۰۰	-۷۰۰۰	-۶۵۰۰	-۶۰۰۰	-۵۵۰۰	زیر ۵۰۰۰	بار کل (مگاوات)
۸۷	۲۰۵	۳۰۰	۳۷۴	۱۹۷	۱۳۴	تعداد سناریوها
۶۸	۱۴۰	۱۵۹	۱۱۶	۴۷	۲۵	سناریوهای بحرانی
۷۸/۲	۶۸/۳	۵۳	۳۱	۲۳/۸	۱۸/۶	درصد سناریوهای بحرانی
۱۸۴۹۰۵	۴۲۰۴۸۶	۴۲۴۳۱۸	۲۷۰۲۴۷	۹۲۴۰۴	۲۲۷۴۵	خاموشی کل (مگاوات)

جدول (۲) توالی حوادث پی‌درپی را که بعد از خروج اولیه خط شماره ۲۶ در سناریوی نمونه با بار کل ۶۱۶۰ MW به وجود آمده‌اند، نشان می‌دهد. در این سناریو، خطوط شماره ۹ و ۲۸ برای تعمیرات از مدار خارج بوده‌اند، شبکه به چهار جزیره تجزیه شده و در مجموع با متحمل شدن میزان ۲۹۹۰ MW خاموشی، در نقطه ماندگار جدید مستقر شده است.

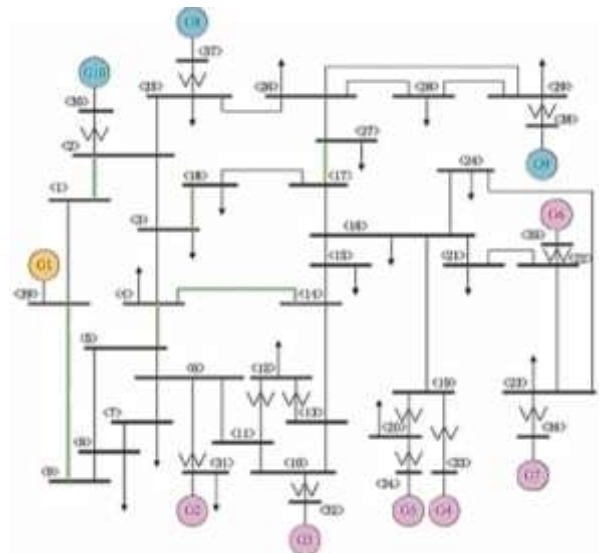
در این مقاله، میزان توان ازدست‌رفته به‌واسطه حوادث پی‌درپی به‌دنبال خروج یک خط، به‌عنوان شاخص آسیب‌رسانی خط استفاده شده است که از این پس شاخص خاموشی خط نامیده می‌شود. باید یادآور شد که شاخص خاموشی مربوط به هر پیشامد خروج خط، به‌شدت به شرایط بهره‌برداری سیستم و ساختار شبکه وابسته است. در (۴) مقدار شاخص خاموشی به‌صورت درصد بار خاموش‌شده کل در پایان فرایند خروج‌های پی‌درپی تعریف شده است:

$$\Delta P = \frac{\sum_{d \in D_0} P_{D_0} - \sum_{i \in I} \sum_{d \in D_i} P_{D_i}}{\sum_{d \in D_0} P_{D_0}} \quad (4)$$

به‌طوری‌که  $P_{D_0}$  و  $P_{D_i}$  به‌ترتیب توان بار را در شین‌های شبکه در شرایط اولیه قبل از خروج و در جزایر تشکیل‌شده بعد از سلسله حوادث پی‌درپی نشان می‌دهد.  $I$  تعداد جزایر تشکیل‌شده است.

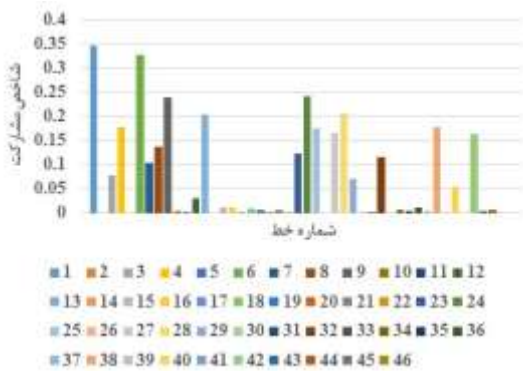
### ۱.۳. محاسبه شاخص خاموشی

برای تست و پیاده‌سازی روش ارائه‌شده، از شبکه ۳۹ باس نشان‌داده‌شده در شکل (۲) استفاده شده است. این سیستم ۴۶ خط، ۱۰ واحد نیروگاهی و ۱۹ شین بار دارد. مدل‌سازی خروج‌ها و ساخت سناریوها در نرم‌افزار متلب انجام شده است. شبیه‌سازی خروج‌های پی‌درپی نشان‌داده‌شده در شکل (۱) برای تمامی سناریوهای بهره‌برداری و خروج خط ۲۶ به‌عنوان حادثه اولیه و خطی که ارزیابی آسیب‌رسانی آن مدنظر است، انجام شده است.



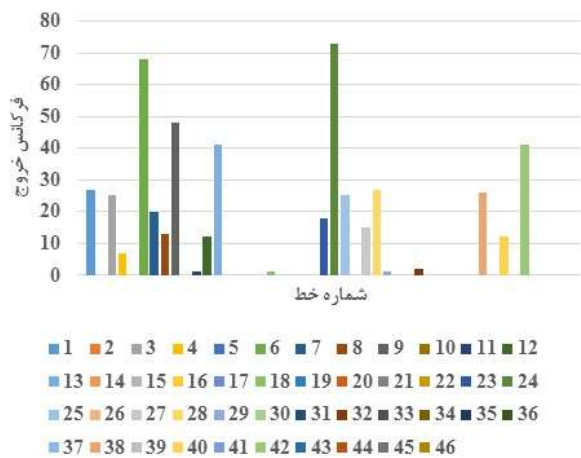
شکل (۲): شبکه ۳۹ باس مورد استفاده

بنابراین مطابق با هر سناریوی بهره‌برداری، آسیب‌رسانی خط ارزیابی شده است. توان اکتیو تمامی خطوط در شرایط پایایی قبل از پیشامد اولیه، برای آماده‌سازی داده‌های ورودی جهت آموزش



شکل (۴): شاخص مشارکت خطوط برای شرکت در حوادث پی‌درپی مربوط به ۵۸۹ مسیر خاموشی در پی خروج اولیه خط ۲۶

شکل (۵) تعداد دفعاتی را که هر خط در زنجیره خروج‌های پی‌درپی تمامی مسیرهای خاموشی به‌عنوان اولین خروج مشارکت کرده است، نشان می‌دهد. برای مثال، خط ۲۴ تعداد ۷۲ مرتبه از بین ۵۸۹ مسیر خاموشی در اولین خروج بعد از خروج خط ۲۶ خارج شده است. ملاحظه می‌شود که خط ۲۴ به دلیل موقعیتش نسبت به خط ۲۶ دارای بیشترین آمار در خروج پی در پی اولی است. عموماً با جدا شدن این خط یک جزیره مستقل تشکیل می‌شود. بنابراین می‌توان خط ۲۴ را به‌عنوان خطی بحرانی برای انتشار خاموشی در شبکه منظور کرد.



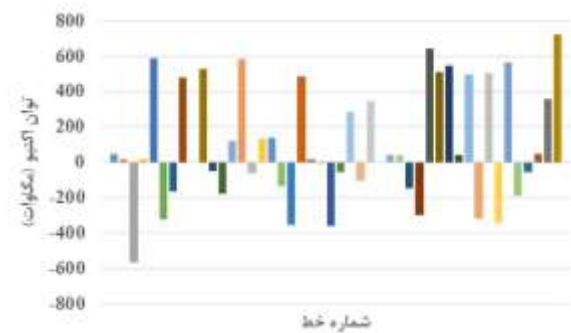
شکل (۵): فرکانس مشارکت خطوط در اولین حادثه پی‌درپی

شکل (۶) آمار مشارکت در آبخارهای دوم، سوم و چهارم را نشان می‌دهد. برای نمونه، خط ۱ تعداد ۷۸ مرتبه در آبخار دوم، ۴۴ مرتبه در آبخار سوم و ۳۴ مرتبه در آبخار چهارم، و در مجموع ۱۵۶ مرتبه در آبخارهای دوم، سوم و چهارم مشارکت کرده است؛ همین امر میزان اهمیت این خط در گسترش و انتشار خاموشی را نشان می‌دهد.

جدول (۲): توالی حوادث پی‌درپی ایجادشده در پی خروج اولیه خط شماره ۲۶ در سناریوی نمونه

ردیف	نوع خروج	شماره خط خارج شده	باس ابتدا	باس انتها	توان عبوری قبل از خروج (مگاوات)
۱	حادثه آغازگر اولیه	۲۶	۱۶	۱۷	۱۹/۴۹
۲	حادثه پی‌درپی اول	۳۸	۲۳	۲۴	-۹۰۷/۵
۳	حادثه پی‌درپی دوم	۲۴	۱۴	۱۵	-۱۰۹۴
۴	حادثه پی‌درپی سوم	۲۷	۱۶	۱۹	۱۱۵۸

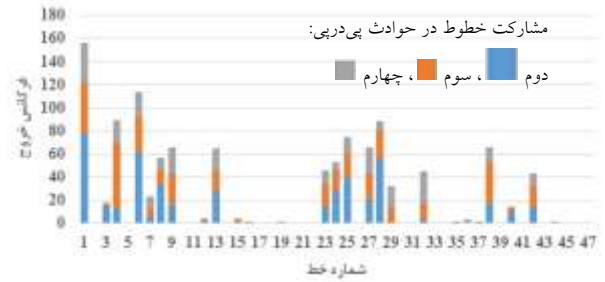
الگوی توان اکتیو خطوط در شرایط قبل از وقوع حادثه آغازگر اولیه که به‌عنوان ورودی درخت تصمیم به کار می‌رود، در شکل (۳) نمایش داده شده است. مشارکت خطوط مختلف شبکه در حوادث پی‌درپی برای ایجاد زنجیره حوادث و مسیر خاموشی متفاوت است. برخی خطوط پتانسیل بیشتری برای مشارکت در آبخار اول را داشته و برخی پتانسیل مشارکت در آبخارهای دوم، سوم و چهارم را دارند.



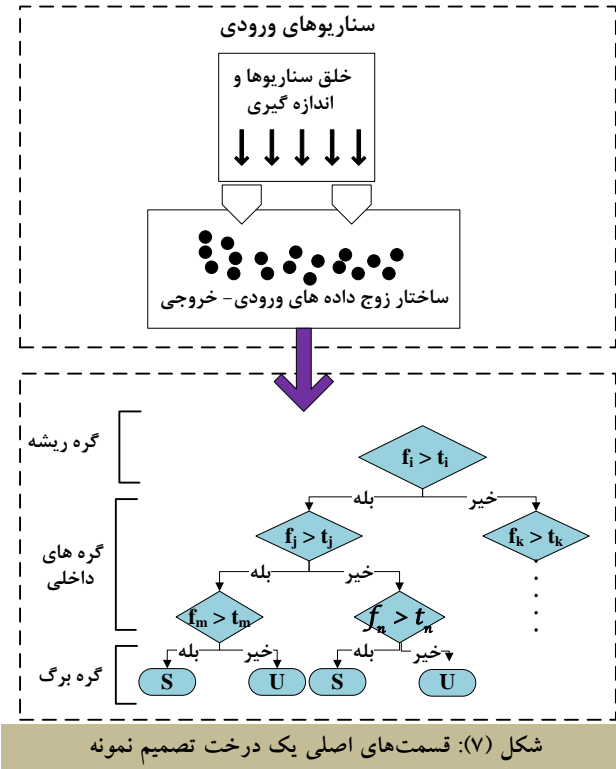
شکل (۳): الگوی توان اکتیو خطوط برای سناریوی نمونه

با توجه به اینکه ۵۸۹ سناریو از کل ۱۳۰۰ سناریو منجر به خروج‌های پی‌درپی پس از خروج اولیه خط ۲۶ شده، می‌توان گفت که در مجموع، ۵۸۹ مسیر خاموشی ایجاد شده است. برای هر خطی که در این مسیرهای خاموشی مشارکت کرده، می‌توان یک شاخص مشارکت تعریف کرد. شاخص مشارکت هر خط در واقع نماینده تعداد دفعاتی است که آن خط در تمامی این ۵۸۹ سناریو تکرار شده است. این تکرار می‌تواند در هر سناریو در آبخار اول، دوم و... باشد. به عبارت دیگر، شاخص مشارکت هر خط از تقسیم تعداد مشارکت‌های هر خط در تمامی مسیرهای خاموشی بر کل مسیرهای خاموشی به دست می‌آید. برای مثال، شاخص مشارکت خط اول ۰/۳۵ است که نشان می‌دهد خط اول در ۳۵ درصد خاموشی‌ها حضور داشته است. هرچه قدر شاخص مشارکت یک خط بزرگ‌تر باشد، میزان بحرانی بودن آن خط در انتشار خروج‌های پی‌درپی بعد از خروج اولیه خط ۲۶ بیشتر است (شکل ۴).

ایجاد شده است. برای هر سطح بار، حول بار و تولید پایه متناظر با آن سطح، بار و تولید تمامی باس‌ها به صورت تصادفی به اندازه ۱۵٪ تغییر داده شده و بدین ترتیب برای هر سطح بار حدود ۳۰۰ الگوی بار-تولید ایجاد گردیده است.



شکل (۶): فرکانس مشارکت خطوط در حوادث پی‌درپی دوم (آبی)، سوم (نارنجی) و چهارم (خاکستری)



شکل (۷): قسمت‌های اصلی یک درخت تصمیم نمونه

به منظور لحاظ کردن تأثیر ساختار شبکه در ارزیابی شدت آسیب‌پذیری یک نقطه کار سیستم یا درجه آسیب‌رسانی خروج خطوط در سیستم، علاوه بر ساختار پایه شبکه، ساختارهایی که در آن‌ها یک یا دو خط شبکه به منظور تعمیرات یا شرایط اضطراری خارج شده باشند، نیز در فرایند ارزیابی حوادث پی‌درپی در نظر گرفته شده است. در واقع با این کار، الگوریتم پیشنهادی در برابر تغییر توپولوژی ناشی از تعمیرات خطوط نیز پاسخ‌گو خواهد بود. برای هر سطح بار و آرایش خاص از شبکه با تغییرات تصادفی بار شین‌ها حالات مختلف بهره‌برداری به‌گونه‌ای ایجاد شده‌اند که درجه آسیب‌پذیری شبکه در برابر خروج خط مورد مطالعه در یک طیف نسبتاً وسیعی از حالت امنیت کامل بدون خاموشی تا امنیت بسیار ضعیف با بیشترین تعداد جزایر و میزان خاموشی قرار داشته باشد. شایان ذکر است که برای تحلیل میزان آسیب‌رسانی هر خط، باید یک درخت جداگانه آموزش داده شود و برای هر آموزش داده‌های مناسب تهیه گردد.

#### ۴. آموزش درخت تصمیم

درخت تصمیم یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه استنتاج‌های قیاسی یا پیش‌بینی است. درخت تصمیم به‌طور موفقیت‌آمیزی در کاربردهای گوناگون به کار رفته است. برای تشکیل درخت تصمیم، تکنیک‌های مختلفی از قبیل درخت تصمیم قیاسی<sup>۱</sup>، کارت<sup>۲</sup> و C4.5 معرفی شده است [۲۴]. روش C4.5 در حضور داده‌های دارای نویز مقاوم است. درخت تصمیم با استفاده از مجموعه‌ای از نمونه‌های آموزشی ساخته می‌شود و برای دسته‌بندی مجموعه‌ای از نمونه‌های نامعلوم که نمونه‌های تست نامیده می‌شوند، به کار می‌رود. این درخت برای دسته‌بندی داده‌ها از روش جست‌وجوی بالا به پایین استفاده می‌کند. درخت از گره ریشه شروع می‌شود و نمونه‌ها با طرح مجموعه‌ای از پرسش‌ها درباره ویژگی‌های مرتبط با داده دسته‌بندی می‌شوند. یک گره بر اساس پاسخ‌های ممکن برای سؤال، به دو زیربخش تقسیم می‌شود. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، درخت تصمیم با یک سؤال در ریشه شروع می‌شود. برای پاسخ به هر سؤال، از مجموعه‌ای معیارهای آماری مخصوص دسته‌بندی داده بهره می‌برد.

#### ۱.۴. ایجاد نمونه‌های آموزشی درخت تصمیم

برای تهیه نمونه‌های آموزشی باید طیف وسیعی از شرایط کاری سیستم اعم از سطح بار، آرایش بار و تولید در روی شین‌های بار و نیروگاهی ایجاد شوند؛ به‌گونه‌ای که این نمونه‌ها دربردارنده درجات مختلف از آسیب‌پذیری و در نتیجه میزان خاموشی شبکه باشند. به عبارتی دیگر، نمونه‌ها باید دربردارنده حالت‌های ایمن و شرایط بسیار بحرانی شبکه از لحاظ پتانسیل جزیره‌ای شدن و خاموشی بار شبکه باشند. بار پایه شبکه برابر ۶۲۵۴ MW در نظر گرفته شده است. بر اساس این بار ۵ سطح بارگذاری مختلف در محدوده ۰/۸ تا ۱/۲۰ برابر بار پایه

1. Inductive Decision Tree ID3  
2. Cart

## ۲.۴. نتایج آموزش درخت تصمیم

در این مقاله، برای تشکیل درخت از تکنیک C4.5 و نرم‌افزار کلمنتین<sup>۱</sup> استفاده شده است. ورودی‌های درخت تصمیم را شرایط بهره‌برداری سیستم در وضعیت ماندگار قبل از اختلال اولیه تشکیل می‌دهد. از بین همه متغیرهای بهره‌برداری، فلوی اکتیو خطوط دارای بیشترین تأثیر بر اضافه‌بار سایر خطوط است. لذا در این مقاله، فلوی توان اکتیو خطوط در شرایط ماندگار قبل از اختلال آغازگر به‌عنوان ورودی‌های درخت تصمیم انتخاب شده‌اند. چون لازم است تمامی توان‌های اکتیو خطوط در بازه‌های زمانی کوتاه و همزمان در دسترس باشند، درخت آموزش داده‌شده در هر لحظه از زمان، از داده‌های واحد اندازه‌گیری فازور برای پیش‌بینی شکننده بودن شبکه استفاده می‌کند. بدیهی است که بین شرایط ماندگار قبل از اختلال که توسط فلوی توان اکتیو خطوط نمایش داده می‌شود و درجه آسیب‌پذیری شبکه، ارتباط مستقیم و تنگاتنگی وجود دارد. با توجه به پیچیدگی این رابطه، از درخت تصمیم برای یادگیری آن استفاده شده است. مجموعه بردارهای فلوی اکتیو خطوط مربوط به سناریوهای مختلف، ماتریس ورودی‌های آموزش درخت را تشکیل می‌دهند. بنابراین برای شبکه ۳۹ باس، تعداد ستون‌های ماتریس ورودی برابر ۴۶ و تعداد سطرهای آن معادل تعداد نمونه‌های آموزشی یعنی ۷۸۹ نمونه است. جدول (۳) عملکرد مربوط به آموزش و تست درخت تصمیم پیشگوی آسیب‌رسانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، آموزش و تست با کمترین خطای ممکن انجام شده است.

جدول (۳): آمار عملکرد آموزش و تست درخت تصمیم

ریسک خاموشی	آموزش		تست	
	تعداد سناریوهای آموزشی	یادگیری غلط	تعداد سناریوهای تست	تخمین غلط
آسیب‌رسان	۳۵۵	۰	۲۳۴	۰
ایمن	۴۳۴	۰	۲۷۷	۰

همان‌طور که در جدول (۳) دیده می‌شود، از بین ۷۸۹ سناریوی استفاده‌شده در آموزش، ۳۵۵ سناریو خاموشی را تجربه کرده و تمامی آن‌ها به‌خوبی دسته‌بندی شده‌اند. همچنین از بین ۵۱۱ سناریویی که برای تست درخت تصمیم آموزش داده‌شده به کار رفته، ۲۳۴ سناریو خاموشی را تجربه کرده و ۲۷۷ سناریو ایمن بوده است. ملاحظه می‌شود که سناریوهای تست به‌خوبی توسط درخت تصمیم آموزش داده‌شده پیش‌بینی شده‌اند. مهم‌ترین نکته حائز اهمیت درباره نتایج به‌دست آمده

(جدول ۳) از روش ارائه‌شده، امکان پیش‌بینی خاموشی شبکه با دقت کامل است. به عبارت دیگر در هر شرایط کاری شبکه، این امکان فراهم شده است که بتوان آسیب‌پذیری شبکه در برابر خروج هر خط را پیش‌بینی کرد و در صورت نیاز و قبل از وقوع حادثه آغازگر، عملیات اصلاحی را انجام داد. با توجه به اینکه روند ساخت داده‌های آموزشی و داده‌های استفاده‌شده در تست متفاوت‌اند، می‌توان اطمینان داشت که روش ارائه‌شده در تمامی تغییرات قابل پیش‌بینی شبکه، کارایی لازم را خواهد داشت.

## ۵. نتیجه‌گیری

وقوع خاموشی‌ها از بدترین اتفاقات ممکن در شبکه محسوب می‌شوند. به دلیل طبیعت ذاتی پیچیده شبکه و دینامیکی بودن آن، پیش‌بینی چنین پدیده‌ای مشکل است. در این مقاله، بر روی پیش‌بینی شکنندگی شبکه در برابر خروج یک خط تمرکز شده است. مدل‌سازی خروج‌های پی‌درپی با استفاده از پخش بار مستقیم انجام گرفته و نتایج روش پیشنهادی روی شبکه ۳۹ باس صحت‌سنجی شده است. دقت پخش بار مستقیم نسبت به پخش بار متناوب، به دلیل ساده‌سازی‌های انجام‌شده در آن کمتر است. با وجود این، این ساده‌سازی‌ها تقریب خوبی از توزیع توان در تجهیزات را می‌دهند و به دلیل کم شدن بار محاسبات قابلیت بررسی خروج‌های آبشاری بیشتری را داده و روش مناسبی برای مدل‌سازی خروج‌های پی‌درپی است. برای پیش‌بینی، درخت تصمیم که یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه استنتاج‌های قیاسی یا پیش‌بینی می‌باشد، آموزش داده شده است. توان عبوری از خطوط به‌عنوان ورودی درخت و میزان خاموشی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. از کل تعداد سناریوها ۶۰ درصد برای آموزش و ۴۰ درصد برای تست استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که تغییر الگوی بار و تولید با ثابت بودن میزان مصرف، می‌تواند شکننده بودن یک خط را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین نشان داده شده است که برخی از خطوط که در آبشارهای اول خارج می‌شوند، می‌تواند تا چه اندازه تأثیرگذار باشد؛ به‌گونه‌ای که با اصلاح این خطوط می‌توان تا حد زیادی خاموشی‌ها را کاهش داد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند به‌طور مؤثر در پیش‌بینی میزان شکنندگی شبکه و پتانسیل آن در ایجاد خاموشی، مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله از درخت تصمیم به‌عنوان یکی از روش‌های هوش مصنوعی استفاده شده است. دلیل استفاده از درخت تصمیم، گسسته بودن خروجی‌های مورد نیاز (آسیب‌رسان یا ایمن) و کارایی بالای درخت تصمیم در این‌گونه مسائل است. در کارهای آتی، کارآمدی این روش نسبت به روش‌های



روش‌های هوش مصنوعی بررسی خواهد شد؛ زیرا در صورت پیوسته بودن خروجی‌ها، درخت تصمیم کارایی نخواهد داشت.

دیگر هوش مصنوعی، از قبیل شبکه عصبی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. همچنین امکان پیش‌بینی میزان خاموشی با کمک دیگر

## مراجع

- [1] Dobson, I., Carreras, B. A., Newman, D. E., "A Loading Dependent Model of Probabilistic Cascading Failure", Probability in the Engineering and Informational Sciences, Vol. 19, No. 1, pp. 15-32, 2005.
- [2] Liao, H., Apt, J., Talukdar, S., "Phase Transitions in the Probability of Cascading Failures", Electricity Transmission in Deregulated Markets, conference at Carnegie Mellon University, Pittsburgh PA USA Dec. 2004.
- [3] Baldick, R., Chowdhury, B., Dobson, I., Dong, Z., Gou, B., Hawkins, D., Huang, H., Joung, M., Kirschen, D., et al. "Initial Review of Methods for Cascading Failure Analysis in Electric Power Transmission Systems IEEE PES CAMS Task Force on Understanding, Prediction, Mitigation and Restoration of Cascading Failures", IEEE Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-8, 2008.
- [4] Xue Yusheng, Xie Yunyun, Wen Fushuan, et al. "A Review on Cascading Failures in Power Systems", Automation of Electric Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 29-40, 2013.
- [5] Vaiman, M., Bell, K., Chen, Y., Chowdhury, B., Dobson, I., Hines, P., Papic, M., Miller, S., Zhang, P., "Risk Assessment of Cascading Outages: Methodologies and Challenges", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 2, pp. 631-641, May 2012.
- [6] Stott, B., Jardim, J., Alsac, O., "DC Power Flow Revisited", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 3, pp. 1290-1300, Aug. 2009.
- [7] Yakup, K., Verma, T., Araujo, N. A. M., Warnier, M., "Matcasc: A Tool to Analyse Cascading Line Outages in Power Grids", IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES), pp. 143-148, Nov. 2013.
- [8] Dagur, D., Parimi, M., Wagh, S. R., "Prediction of Cascade Failure Using Probabilistic Approach with AC Load Flow", IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), pp. 542-547, May 2014.
- [9] Chen, J., Thorp, J. S., "A Reliability study of Transmission System protection via a Hidden Failure DC Load Flow Model", Fifth International Conference on Power System Management and Control, pp. 384-389, April 2002.
- [10] Diao, R., Vittal, V., Sun, K., Kolluri, S., Mandal, S., Galvan, F., "Decision Tree Assisted Controlled Islanding for Preventing Cascading Events", IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition ( PSCE '09), pp. 1-8, March 2009.
- [11] Ren, H., Dobson, I., Carreras, B. A., "Long-term Effect of the n-1 Criterion on Cascading Line Outages in an Evolving Power Transmission Grid", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1217-1225, July 2008.
- [12] Dobson, I., Carreras, B., Lynch, V. E., Newman, D. E., "An Initial Model of Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts", International Conference on System Sciences, Proceedings of the 34th Annual Hawaii, pp. 710-718, 2001.
- [13] Carreras, B. A., Newman, D. E., Dobson, I., Poole, A., "Evidence for Self-Organized criticality in a Time Series of Electric Power System Blackouts", IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol. 51, No. 9, pp. 1733-1740, Sep. 2004.
- [14] Dobson, I., Carreras, B. A., Lynch, V. E., Newman, D. E., "Complex Systems Analysis of Series of Blackouts: Cascading Failure, Critical Points, and Self-Organization", Bulk Power System Dynamics and Control-VI, Cortina d'Ampezzo, Italy, August, 2004,
- [15] Rios, M., Kirschen, D., Jayaweera, D., Nedic, D., Allan, R., "Value of Security: Modeling Time-Dependent Phenomena and Weather Conditions", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 543-548, Aug. 2002.
- [16] Kirschen, D., Jayaweera, D., Nedic, D., Allan, R., "A Probabilistic Indicator of System Stress", IEEE Transactions on Power Systems., Vol. 19, No. 3, pp. 1650-1657, Aug. 2004.
- [17] Mei, S., He, F., Zhang, X., Wu, S., Wang, G., "An Improved OPA Model and Blackout Risk Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 814-823, May 2009.
- [18] Dobson, I., Carreras, B., Newman, D., "A Probabilistic Loading-Dependent Model of Cascading Failure and possible implications for Blackouts", International Conference on System Sciences, Proceedings of the 36th Annual Hawaii, pp. 15-32, 2003.
- [19] Yan, J., Yufei, T., He, H., Sun, Y., "Cascading Failure Analysis with DC Power Flow Model and Transient Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 1, pp. 285-297, 2015.
- [20] Final Report, "14th Blackout in the United States and Canada", United States Department of Energy and National Resources Canada, U.S.-Canada Power System Outage Task Force, 2004.
- [21] Final Report, "System Disturbance", Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE), 2006. [Online]. Available: <http://www.ucte.org>
- [22] Sanghavi, M., Tadepalli, S., Boyle, T. J., Downey, M., Nakayama, M. K., "Efficient Algorithms for Analyzing Cascading Failures in a Markovian Dependability Model", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 66, No. 2, pp. 258-280, 2017.
- [23] Grainger, J.J., Stevenson, W.D. and Stevenson, W.D.,

"Power System Analysis". McGraw-Hill, 1994.

Transactions on Power Systems, Vol 28, No. 3, pp. 3028-3037, 2013.

[24] Amraee, T., and Ranjbar, S., "Transient Instability Prediction Using Decision Tree Technique", IEEE