

دسته‌بندی هوشمند انواع خطا در خطوط انتقال تک مداره مبتنی بر تحلیل فضای فاز و الگوریتم یادگیری رگرسیون لجستیک

داریوش فرهادی^۱، مصطفی سرلک^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول،

farhadi@jsu.ac.ir

^۲ استادیار، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول،

sarlak@jsu.ac.ir

چکیده

در این مقاله روشی برای دسته‌بندی خطاها در خطوط انتقال تک مداره ارائه شده است. در روش پیشنهادی، روند کار به این صورت است که با تشخیص لحظه وقوع خطا، ابتدا اطلاعات سیگنال‌های جریان و ولتاژ دریافتی پس از وقوع خطا و در هر سه فاز در ابتدای خط انتقال، در فضای فاز تحلیل و ویژگی‌هایی مبتنی بر مشخصات آماری خروجی تحلیل سیگنال‌های مذکور محاسبه و برای دسته‌بندی نوع خطا به مدل هوشمند طراحی شده مبتنی بر الگوریتم یادگیری رگرسیون لجستیک اعمال می‌شوند. الگوریتم مذکور بر روی شبکه نمونه‌ای که در شرایط مختلف وقوع خطا شامل مقادیر مختلف مقاومت خطا، لحظه وقوع خطا، میزان بار انتقالی بر روی خط انتقال و مکان وقوع خطا در نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شده است، بررسی و مورد آزمایش واقع شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مبین دقت تشخیص ۱۰۰ درصدی است. این میزان دقت فقط با در نظر گرفتن طول پنجره داده پس از وقوع خطا برابر با ۱/۸ میلی ثانیه حاصل شده است که نشانگر کمتر بودن میزان اطلاعات لازم نسبت به روش‌های دیگر است.

کلمات کلیدی

دسته‌بندی خطا، خطوط انتقال تک مداره، رگرسیون لجستیک، فضای فاز.

حفاظتی برخوردار است. به‌عنوان نمونه، دسته‌بندی نوع خطا برای الگوریتم-های مکان‌یابی خطا به‌عنوان پیش‌نیاز محسوب می‌شود و بدون اطلاع از نوع خطا، احتیاج به صرف زمان و انجام محاسبات بیشتری برای تعیین محل خطا است. همچنین با دانستن نوع خطا در رله‌های دیستانس می‌توان مشخصه برد ناحیه‌های امیدانسی را بهبود بخشید و کارکرد اشتباه رله‌های دیستانس را به‌خوبی کاهش و امنیت سیستم حفاظتی را افزایش داد [۱]. به‌علاوه، اکثر خطاهایی که در خطوط انتقال فشارقوی رخ می‌دهند از نوع خطاهای گذرا هستند. چنین خطاهایی می‌توانند از طریق بازبست خودکار تک‌فاز برطرف شوند که این امر موجب بهبود پایداری گذرا و افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌گردد. برای انجام این کار، ابتدا رله بازبست نیازمند تشخیص فاز خطا دار است که خروجی حل مسئله طبقه‌بندی خطا

۱- مقدمه

یکی از ارکان اساسی هر سیستم قدرت، خطوط انتقال آن است. وظیفه این خطوط، انتقال توان تولیدشده توسط واحدهای تولیدی به مراکز مصرف است. هرگونه اختلالی در انجام این وظیفه ضررهای قابل توجه‌ای به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به‌طور توأم وارد می‌آورد. از مهم‌ترین اختلالاتی که در سیستم‌های قدرت و بر روی خطوط انتقال به وجود می‌آید، اتصال کوتاه‌های مختلفی هستند که به دلایل متفاوتی به وجود می‌آیند. دسته‌بندی خطاها در خطوط انتقال از اهمیت خاصی برای سیستم‌های

مدل و در عین حال نیاز کمتر آن به حجم اطلاعات پس از وقوع خطا نسبت به سایر روش‌های ارائه شده تاکنون دارد. ساختار مقاله بدین صورت می‌باشد، در بخش دوم تئوری حل مسئله، در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی، در بخش چهارم شبیه‌سازی شبکه نمونه، در بخش پنجم و ششم به ترتیب بحث و نتیجه‌گیری شرح داده شده است.

۲- تئوری حل مسئله

در این مقاله، ابتدا از روش تحلیل فضای فاز برای استخراج ویژگی استفاده شده است. سپس، مبتنی بر این ویژگی‌ها مدلی هوشمند با استفاده از الگوریتم یادگیری رگرسیون لجستیک برای دسته‌بندی انواع خطا در یک خط تک مداره طراحی شده است.

۲-۱- فضای فاز

در ریاضیات و فیزیک، یک سیستم دینامیکی معمولاً توسط فضای فاز (حالت) تعریف می‌شود و هر مختصات متعامد، متناسب با آن، بیانگر یکی از متغیرهای موردنیاز برای تعیین حالت لحظه‌ای سیستم است [۲۰]. برای سیستمی حقیقی، برای تعیین فضای فاز سیستم، بایستی همه متغیرهای فاز (حالت) آن اندازه‌گیری شوند. لیکن، به دلیل آن که اندازه‌گیری همه این متغیرهای به صورت عملی در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نمی‌باشد، به دست آوردن فضای فاز سیستم مذکور به صورت مستقیم می‌تواند قابل حصول نباشد. برای رفع این مساله، تئوری جاسازی مطرح شده است [۲۰] که با پشتوانه آن می‌توان با کمک اندازه‌گیری‌های قابل دسترس از سیستم، شکل فضای فاز سیستم را تخمین زد. یکی از مرسوم‌ترین روش‌های تخمین فضای فاز سیستم، روش تاخیری می‌باشد. در این روش، در صورت دسترسی به سری زمانی اندازه‌گیری‌ها از یک سیستم، با استفاده از رابطه (۱)، می‌توان فضای فاز را تخمین زد [۲۱]:

$$x_i \rightarrow y_i = [x_{i+(m-1)\tau}, x_{i+(m-2)\tau}, \dots, x_i] \quad (1)$$

که در آن m و τ به ترتیب عبارتند از تعداد بعد (تعداد متغیرهای فاز) سیستم و تأخیر زمانی در فضای فاز. همچنین بردار y_i متناظر با x_i در فضای فاز است. طبق مرجع [۲۱]، در صورتی که m و τ به درستی انتخاب شوند، فضای فاز دارای مشخصات مشابه با فضای فاز (فضای حالت) حقیقی سیستم مورد نظر خواهد بود. در این مقاله، بعد فضا و زمان تأخیر به ترتیب ۳ و ۵ میلی ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، شکل فضای فاز سیستم با در نظر گرفتن ابعاد سه گانه سیستم x ، y و z برای فضای ۳ بعدی با زمان تأخیر ۵ میلی ثانیه توصیف شده است. به عنوان نمونه، در شکل (۱)، فضای فاز استخراج شده مبتنی بر سری زمانی نمونه‌های جریان در شرایط وقوع خطای تک‌فاز نشان داده شده است.

است. از این رو، حل مسئله طبقه‌بندی خطاها در خطوط انتقال از اهمیت بالایی برخوردار است و توجه محققین زیادی را به خود جلب نموده است. بطور کلی مساله دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال را می‌توان نوعی مساله شناسایی الگو در نظر گرفت که در آن هدف تعیین نوع خطا بر اساس اطلاعات جریان و ولتاژ دریافتی در محل رله می‌باشد. بنابراین و با توجه به این دیدگاه، دو قدم اساسی برای حل مساله دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال وجود دارد: (۱) تعیین نوع ویژگی‌های انتخابی و (۲) تعیین نوع روش طراحی مدل هوشمند برای تعیین نوع خطا بر اساس مقادیر ویژگی‌های انتخابی. روش‌های مختلف با توجه به قدم‌های ۱ و ۲ فوق‌الذکر ارائه شده‌اند. از منظر نوع ویژگی انتخابی در طرح‌های دسته‌بندی نوع خطا در خطوط تک‌مداره، روش‌های مختلف را می‌توان به سه دسته روش‌های حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس تقسیم نمود. از جمله روش‌های ارائه شده در این حوزه‌ها می‌توان به طرح‌های پیشنهاد شده در مقالات [۱]، [۳]، [۶]، [۱۲] و [۱۴] اشاره نمود.

همچنین، از منظر نوع الگوریتم در نظر گرفته شده برای طراحی مدل هوشمند، روش‌های مختلف دسته‌بندی انواع خطا در خطوط انتقال تک‌مداره، می‌توان به سه دسته روش‌های مبتنی بر انواع شبکه عصبی، منطق فازی، انواع درخت تصمیم تقسیم‌بندی نمود. از جمله روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی می‌توان به طرح‌های پیشنهادی در مقالات [۲]، [۴،۵]، [۷]، [۱۱]، [۱۳]، [۱۵]، [۱۸] اشاره نمود که به عنوان نمونه، در [۲]، از روش شبکه عصبی پیشخور، در [۵]، از روش شبکه عصبی خودسازمانده، در [۱۱]، از روش شبکه عصبی پیش پردازنده، در [۱۳]، از روش شبکه عصبی چیبیشف، استفاده شده است. همچنین، در مقالات [۸،۹]، از منطق فازی برای طراحی مدل هوشمند دسته‌بندی نوع خطا استفاده شده است. طراحی مدل هوشمند دسته‌بندی نوع خطا در مقالات [۱۰]، [۱۵]، [۱۸]، مبتنی بر الگوریتم درخت تصمیم انجام پذیرفته است.

باتوجه به روش‌های پیشنهادی مورد اشاره در پاراگراف بالا، این نکته مشهود است که علی‌رغم ارائه ویژگی‌های مختلف در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس، به تعیین ارائه ویژگی در حوزه فضای فاز پرداخته نشده است. در واقع، با انتقال سیگنال‌های ولتاژ و جریان به این حوزه، اطلاعات شکل سیگنال‌های مذکور بصورت واضح‌تری نمایان می‌شوند. در این پژوهش سعی شده است ابتدا، با استفاده از تحلیل اطلاعات پس از وقوع خطای سیگنال‌های ولتاژ و جریان در حوزه فاز، ویژگی‌های با قابلیت تمایز مابین انواع مختلف خطا استخراج گردد. سپس، مبتنی بر الگوریتم یادگیری رگرسیون لجستیک، طرحی هوشمند آماده شود. نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر شبکه نمونه، حاکی از سرعت و دقت مناسب

آن کلاس در نظر گرفته خواهد شد. و با توجه به رابطه‌های زیر دسته‌بندی صورت می‌گیرد:

$$p = p_r(y_i = 1|x) = \frac{e^{\alpha + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_m x_{n,i}}}{1 + e^{\alpha + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_m x_{n,i}}} \quad (۳)$$

که در آن x_i متغیری است که وقوع یا عدم وقوع در i -امین اتفاق و p_i احتمال وقوع را نشان می‌دهد. β_0 ضریب ثابت، β ضرایب متغیرها، ϵ مقدار خطا، y_i برچسب کلاس می‌باشند.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^m \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \dots & x_3^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_3 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_m x_i^m + \epsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (۵)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{If } y_i = j \\ 0 & \text{If } y_i \neq j \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, j-1 \quad (۶)$$

که در آن متغیر j برچسب کلاس، و متغیر y_{ij} احتمال عضویت در کلاس مشاهده‌شده را در نمونه x_i نشان می‌دهد [۲۳].

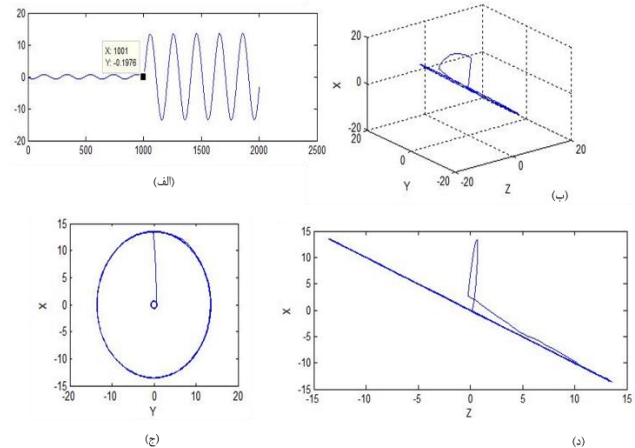
۳- الگوریتم پیشنهادی

در شکل (۲)، الگوریتم پیشنهادی برای دسته‌بندی انواع خطا آورده شده است. در ابتدا، داده‌های جریان و ولتاژ از ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ دریافت شده و تحلیل داده‌ها در فضای فاز صورت می‌گیرد. سپس، ویژگی‌ها، مبتنی بر رابطه (۴) و با توجه به هر فاز محاسبه می‌شوند. در صورتی که خطا تشخیص داده نشد الگوریتم به گرفتن داده از ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ ادامه می‌دهد. اما در صورت تشخیص خطا، الگوریتم برای تعیین نوع خطا به کمک مدل هوشمند که مبتنی بر الگوریتم رگرسیون لجستیک است، به مرحله بعد می‌رود و نوع خطا را دسته‌بندی می‌کند. شایان ذکر است که در این الگوریتم برای تشخیص خطا می‌توان از روش پیشنهادی در مقاله [۱۰] که مبتنی بر امواج سیار است، استفاده نمود.

۴- شبیه‌سازی

۴-۱- شبکه قدرت

دیاگرام تک خطی سیستم نمونه در نظر گرفته شده در این پژوهش، در شکل (۳) نشان داده شده است [۱۹]. سیستم مذکور، خطی دو مداره با سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت و طول ۲۰۰ کیلومتر است که مابین شین ۱ و ۲



شکل (۱) الف) سری زمانی نمونه‌های جریان، ب) فضای فاز بازسازی شده، ج) تصویر فضای فاز بر روی صفحه X-Y و د) تصویر فضای فاز بر روی صفحه X-Z

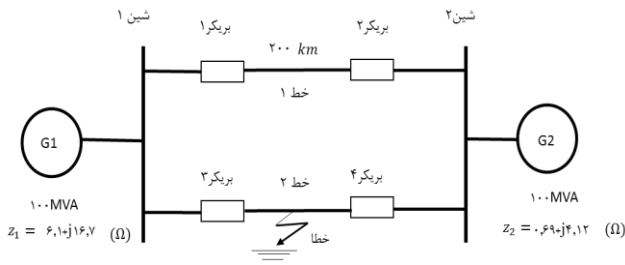
در این مقاله، برای استخراج ویژگی‌ها، ابتدا تصویر فضای فاز سیستم بر روی صفحه X-Z به دست آمده، سپس رابطه زیر محاسبه شده است:

$$f(x, z) = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (۲)$$

در انتها و مبتنی بر مقادیر (۱) انحراف معیار، (۲) ماکزیمم، (۳) مینیمم و (۴) میانه، برای خروجی‌های رابطه (۲)، ویژگی‌ها محاسبه شده‌اند. شایان ذکر است که در خصوص ترجیح صفحه X-Z بر X-Y، در زیربخش ۵-۲ بحث شده است.

۲-۲- الگوریتم رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک، که به نام رگرسیون اسمی نیز نامیده می‌شود، یکی از تکنیک‌های کاربردی برای تحلیل داده‌های طبقه‌بندی شده است. به عنوان نمونه، اگر نتیجه آزمایشی به صورت خطا یا عدم خطا تعریف شود، در این حالت، متغیر پاسخ دیگر پیوسته نبوده بلکه به صورت باینری خواهد بود. این روش مشابه رگرسیون خطی است، اما به جای یک متغیر هدف عددی، یک متغیر کیفی (مانند متغیر اسمی) را می‌پذیرد. این روش می‌تواند هم با مدل‌های دو جمله‌ای (برای هدف‌هایی که دارای دو دسته جدا از هم باشند) و هم با مدل‌های چند جمله‌ای (برای هدف‌هایی که دارای بیش از دو دسته باشند) کار کند. رگرسیون لجستیک با ساختن یک مجموعه از معادله‌ها کار می‌کند که مقادیر متغیر ورودی را به احتمالات مربوط به هر یک از دسته‌های ممکن برای آن متغیر (فیلد خروجی) مرتبط می‌سازد. هنگامی که مدل ایجاد شد، می‌توان آن را برای تخمین زدن احتمالات برای داده‌های جدید به کار برد. برای هر کلاس، یک احتمال عضویت برای هر یک از دسته‌های ممکن خروجی محاسبه می‌شود. آن دسته هدف که دارای بیشترین میزان احتمال باشد، به عنوان مقدار پیش‌بینی شده خروجی برای



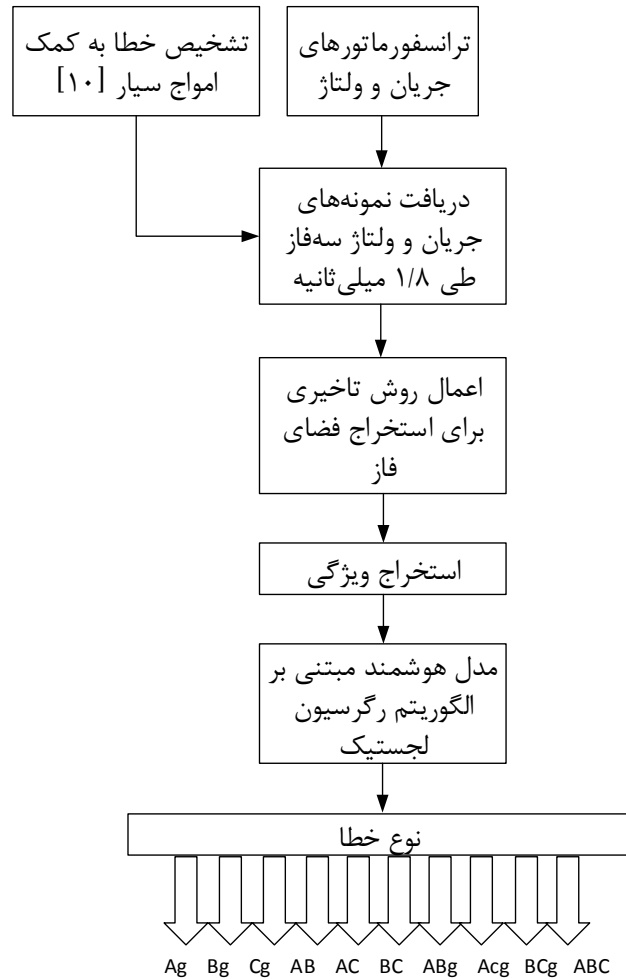
شکل (۳) سیستم قدرت شبیه‌سازی شده

۴-۲- تولید داده

برای تولید داده از سیستم مورد نظر، طبق جدول (۲) سه مقاومت خطا، چهار زاویه انتقال توان، پنج زمان وقوع خطا، ده مکان وقوع خطا، و ده نوع خطا مورد بررسی قرار گرفته است. و در هر مرحله یک مقاومت خطا، یک زاویه انتقال توان، یک مکان وقوع خطا و یک زمان وقوع خطا با ده نوع خطا در نظر گرفته شده است که با ضرب تعداد مقادیر در جدول (۲)، ۶۰۰۰ سناریو تولید و با شبیه‌سازی شبکه با توجه به هر سناریو، داده‌های ولتاژ و جریان در هر سه فاز و در محل رله (مدار شکن ۳ در شکل (۳)) ذخیره گردید. پس از ذخیره داده‌های ولتاژ و جریان، ویژگی‌های مورد نظر در این پژوهش بر مبنای تحلیل حوزه فضای فاز سیگنال‌های ولتاژ و جریان و با در نظر گرفتن پنجره داده با طول ۱۸ نمونه و پس از وقوع خطا، محاسبه شدند. طول پنجره داده با در نظر گرفتن فرکانس نمونه‌برداری در این پژوهش برابر با ۱۰ کیلوهرتز، معادل با ۱/۸ میلی‌ثانیه است. ویژگی‌های مدنظر این مقاله عبارتند از (۱) انحراف معیار، (۲) ماکزیمم، (۳) مینیمم و (۴) میانه، برای خروجی‌های رابطه (۴) و برای هر دو سیگنال جریان و ولتاژ در هر سه فاز. بنابراین تعداد ویژگی‌های محاسبه شده عبارتند از ۲۴ ویژگی. بر این اساس و با احتساب برچسب کلاس نوع خطا، ماتریس داده تشکیل شده، دارای ابعادی برابر ۲۵*۶۰۰۰ است.

جدول (۱) پارامترهای سیستم برای مجموعه آموزش

پارامترها	مقادیر
مقاومت خطا (اهم)	۰/۰۱، ۰/۲۵، ۰/۵۰
زاویه انتقال توان (درجه)	-۱۰، -۲۰، ۰، ۲۰، ۱۰
زمان وقوع خطا (ثانیه)	۰/۲، ۰/۲۰۴، ۰/۲۰۸، ۰/۲۱۲، ۰/۲۱۶
مکان وقوع خطا	٪۰، ٪۱۰، ٪۲۰، ٪۳۰، ٪۴۰، ٪۵۰، ٪۶۰، ٪۷۰، ٪۸۰، ٪۹۰
نوع خطا	Ag, Bg, Cg, AB, AC, BC, ABg, ACg, BCg, ABC



شکل (۲) الگوریتم پیشنهادی

واقع شده است. برای مدل سازی خطوط شبکه نمونه در نرم افزار PSCAD، طول هر خط انتقال ۲۲/۲۲ کیلومتر انتخاب شده است. هادی خط انتقال ماریگولد ۱۱۱۳ و مقاومت dc، ۰/۰۹۲۲۲ اهم بر مایل در دمای ۵۰ درجه است. هادی‌ها نیز دارای مقاومت ویژه زمین ۵۰ اهم بر متر هستند. همچنین، امپدانس توالی مثبت و امپدانس توالی منفی خط انتقال به ترتیب $0.112 + j0.188 (\Omega/Km)$ و $1/297 + j0.309 (\Omega/Km)$ می‌باشند. شایان ذکر است که در این مقاله و برای بررسی توانایی الگوریتم پیشنهادی در تشخیص نوع خطا در خطوط تک‌مداره، فقط خط انتقال مابین مدار شکن‌های ۳ و ۴ (خط انتقال پایینی در شکل (۳)) در نظر گرفته شده است.

۵-۳- مقایسه با روش‌های موجود

در جدول (۵) دقت و سرعت روش‌های دسته‌بندی ارائه شده و با روش‌هایی که منتشر شده‌اند و بر روی خطوط با طول ۲۰۰ کیلومتر و کمتر تست شده‌اند، به طور خلاصه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از منظر توجه توأمان به سرعت الگوریتم و داده‌های مورد نیاز در بعد از زمان وقوع خطا، روش پیشنهادی از همه روش‌ها بهتر است.

جدول (۴) دقت و سرعت روش‌های دسته‌بندی

روش	طول خط شبیه سازی شده (km)	داده‌های لازم پس از خطا (ms)	دقت
[۱]	۱۰۰	۵	۱۰۰٪
[۳]	۸۰	۵	ذکر نشده
[۵]	۱۶۰	۷-۱۶	۱۰۰٪
[۸]	۱۸۸	۱۰	۱۰۰٪
[۱۰]	۱۰۰-۳۰۰	۲-۳/۵	۱۰۰٪
[۱۱]	۲۰۰	۲۰	۹۵٪
[۱۲]	۲۰۰	یک چهارم سیکل	ذکر نشده
[۱۴]	۹۰	۵	ذکر نشده
روش پیشنهادی	۲۰۰	۱/۸	۱۰۰٪

۶- نتیجه

در این مقاله، از روشی بر پایه فضای فاز برای استخراج ویژگی‌ها استفاده شده است. با استفاده از این ویژگی‌ها و مدل هوشمند مبتنی بر الگوریتم رگرسیون لجستیک دسته‌بندی خطاها بر روی خط تک‌مدار و طول پنجره داده پس از وقوع خطای ۱/۸ میلی‌ثانیه‌ای، دقت ۱۰۰ درصد حاصل شد که نسبت به روش‌های موجود، به داده پس از خطای کمتری نیاز دارد. همچنین، پیاده‌سازی الگوریتم دسته‌بندی بر روی شبکه نمونه و با استفاده از نرم‌افزارهای PSCAD، MATLAB و WEKA، در شرایط مختلف مقادیر مقاومت خطا، زاویه انتقال توان و مکان وقوع خطا نشان از دقت کامل الگوریتم پیشنهادی داشته است.

شایان ذکر است که علی‌رغم مزیت‌ها، از آنجا که روش پیشنهادی بر مبنای تعیین دقیق زمان وقوع خطا استوار است. احتمال همراه با اشتباه بودن خروجی‌های آن در پی تعیین غیر دقیق زمان مذکور وجود داشته باشد.

۴-۳- طراحی مدل هوشمند

برای طراحی مدل هوشمند، پس از استخراج ویژگی‌ها مطابق زیربخش قبلی (۴-۲) و تولید داده‌ها، ۶۴٪ داده‌ها به عنوان آموزش و برای تشکیل طبقه‌بندی کننده مبتنی بر الگوریتم رگرسیون لجستیک در نظر گرفته شد. بنابراین با احتساب تعداد داده آموزش، مابقی ۳۴٪ داده‌های به عنوان تست به مدل هوشمند تزریق شد. هم‌چنین دقت بر روی ۱۵۹۸ داده تست به ۱۰۰٪ رسیده است. شایان ذکر است که در این پژوهش، طراحی مدل هوشمند فوق‌الذکر در نرم‌افزار WEKA انجام پذیرفته است [۲۴].

۵- بحث

۵-۱- تأثیر طول پنجره داده

به منظور بررسی میزان تأثیر طول پنجره داده پس از وقوع خطا بر دقت الگوریتم پیشنهادی برای دسته‌بندی نوع خطا در خطوط تک‌مداره، علاوه بر پنجره داده ۱۸ نمونه‌ای، دو پنجره داده ۱۰ و ۱۵ نمونه‌ای آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش طول پنجره داده، دقت الگوریتم از ۹۹/۴۳ درصد به ۱۰۰ درصد رسیده است.

جدول (۲) داده‌های پس از خطا در خط ۲۰۰ کیلومتر

داده‌های پس از خطا	دقت
۱۰	۹۹/۴۳٪
۱۵	۹۹/۶۹٪
۱۸	۱۰۰٪

۵-۲- تأثیر نوع ویژگی

با توجه به جدول (۴)، ویژگی‌ها در دو صفحه $X - Y$ و $X - Z$ در فضای فاز تحلیل شده است. نتایج حاکی بر این است که تحلیل ویژگی‌ها در صفحه $X - Z$ دقت مناسب‌تری نسبت به صفحه $X - Y$ در فضای فاز نشان می‌دهد.

جدول (۳) دقت و سرعت آموزش در روش‌های دسته‌بندی

نوع ویژگی	طول پنجره داده پس از وقوع خطا	دقت (%)
ویژگی‌های مستخرج از صفحه $X - Y$ در فضای فاز	۱۰	۸۴
	۱۵	۸۹/۷
	۲۰	۹۹/۲
ویژگی‌های مستخرج از صفحه $X - Z$ در فضای فاز	۱۰	۹۹/۴۳
	۱۵	۹۹/۶۹
	۱۸	۱۰۰

مراجع

- Computational Intelligence." *IEEE Transactions Power Delivery*, 28.1 (2013): 1402-1413.
- [13] Vyas, B. Y., Das, B., Maheshwari, R. P. "Improved Fault Classification in Series Compensated Transmission Line: Comparative Evaluation of Chebyshev Neural Network Training Algorithms." *IEEE Transactions on Neural Network and Learning and Systems*, 8.6 (2014): 1-12.
- [14] Guillen, D., Arrieta paternina, M.R., Zamora, A., Ramirez, J.M., Idarraga, G. "Detection and classification of faults in transmission lines using the maximum wavelet singular value and Euclidean norm." *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9.15 (2014): 2294-2302.
- [15] Gao, F., Thorp, J.S., Gao, S., Anamitra Pal & Katelynn Vance A., Chengdu, PR China Bradley PR. "A Voltage Phasor Based Fault-classification Method for Phasor Measurement Unit Only State Estimator Output." *Electric Power Components and Systems*, 43.1 (2015): 4202-4209.
- [16] Jena, M.K., Samantaray, S. "Intelligent relaying scheme for seriescompensated double circuit lines using phase angle of differential impedance." *Int. J. Elect. Power Energy Syst.* 70 (2015): 17-26.
- [17] Jena, M. K., Samantaray, S. R. "Data-mining-based intelligent differential relaying for transmission lines including UPFC and wind farms." *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, 27. (2016): 8-17.
- [18] Taheri, M. M., Seyedi, H., Mohammadi, B. "DT-based relaying scheme for fault classification in transmission lines using MODP." *IET Gener Transm. Distrib.*, 11.11 (2017): 2796-2804.
- [19] Nayak., P.K., Pradhan, A.K., Bajpai, P. "A Fault Detection Technique for the Series-Compensated Line During Power Swing." *IEEE Trans. on Power Delivery*, 28.2 (2013): 714-722.
- [20] Baker, G.L., Golub, J.P. "Chaotic dynamics: an introduction" Cambridge University Press, 1990.
- [21] Space, T.Y., Ji, Q.H., Wu L., Jiang, W.H., Tang. "Disturbance detection, location and classification in phase." *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5.2 (2011): 257 - 265.
- [22] Samantaray, S. R. "Phase-Space-Based Fault Detection in Distance Relaying." *IEEE Transactions on power Delivery*, 26.1 (2011): 33-41.
- [23] Firnkranz, J., "Logistic Model Trees", *Conference Machine Learning*, 59 (2005): 164-168.
- [24] [Online]. Available: <http://www.cs. Waikato.ac.nz/ml/weka/>
- [1] Air Jiang, Joe, Chan S., Chen, Wen Liu, chih. "A new protection scheme for fault detection direction discrimination, classification, and location in transmission lines." *IEEE Transactions Power Delivery*, 18.1 (2003): 34-42.
- [2] Dalstein, Thomas, Kulicke, Bernd "Neural network approach to fault classification for high speed protective relaying." *IEEE Transactions Power Delivery*, 10.2 (1995): 1002-1011.
- [3] W. M., Lin, C. D., Yang., J. H., Lin, and M. T., Tsay. "A fault classification method by RBF neural network with OLS learning procedure." *IEEE Transactions Power Delivery*, 16. 4 (2001): 473-477.
- [4] Oleskovicz, M., Coury, D. W., Aggarwal, R. K. "A complete scheme for fault detection, classification and location in transmission lines using neural networks.", in Proc. 7th Int. Conf. Developments in Power System Protection, 9.12 (2001): 335-338.
- [5] Chowdhury, Badrul H., Wang, Kunyu. "Fault classification using kohonen feature mapping." in Proc. Int. Conf. Intelligent Systems Applications to Power Systems, 28.2 (1996): 194-198.
- [6] Das, D., Singh, N. K., Sinha, A. K. "A comparison of fourier transform and wavelet transform methods for detection and classification of faults on transmission lines." *presented at the IEEE Power India Conf. India*, (2006).
- [7] Silva, K. M., Souza, B.A., Brito, N. S. D. "Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN." *IEEE Transactions Power Delivery*, 21.4 (2006): 2058-2063.
- [8] Wang, Huisheng, Keerthipala, W. W. L. "Fuzzy-neuro approach to fault classification for transmission line protection," *IEEE Transactions Power Delivery*, 13.4 (1998): 1093-1104.
- [9] Das, Biswarup, Reddy, J. V. "Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection." *IEEE Transactions Power Delivery*, 20.2 (2005): 609-616.
- [10] Jamehbozorg, Arash, Shahrtash, S. M. "A decision-tree-based method for fault classification in single-circuit transmission lines." *IEEE Transactions Power Delivery*, 25.4 (2010): 2190-2196.
- [11] Patel, M. "Fault Detection and Classification on a Transmission Line using Wavelet MultiResolution Analysis and Neural Network.", *International Journal of Computer Applications*, 47.22 (2012): 27-33.
- [12] Souza Gomes, A. de, Costa, M. A, Akar de Faria, T.G, Caminhas, W. M. "Detection and Classification of Faults in Power Transmission Lines Using Functional Analysis and

^ Logistic Regression