



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 13, No. 2, 2022
Research Paper

An Intelligent Method for Fault Location in AC Cables Using Extreme Learning Machine

Mohammad Rezaee¹, Ali Akbar Abdoos^{2*}, Mehdi Farzinfar³

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

² Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

³ Department of Engineering, Damghan University, Semnan, Iran

Abstract:

In high voltage cables, due to the mutual induction between the core and the sheath as well as the high capacitance of the cable, the fault location in alternative current (AC) cable is more complicated than the head transmission line. By using distance protection scheme for AC transmission line, the seen impedance by the relay has a nonlinear behavior with respect to fault location. In this paper, with the help of extreme learning machine (ELM), the fault locating algorithm is implemented by using the measured values of voltage and current of core and sheath on both sides of the cable. The proposed algorithm can detect the non-linear and complicated relations between measured quantities and fault location. In the system under study, at first, the core to sheath faults are simulated in the PSCAD/EMTDC software considering different fault resistances and different fault distances. Then, in order to train the intelligent core of the proposed method, input vectors are extracted for different conditions and a desirable output is considered corresponding to the fault distance. Examination of the results obtained from the use of various intelligent tools shows the superiority of the ELM over the ANN and SVM in terms of accuracy of and learning speed.

Keywords: High Voltage AC Cable Protection, Fault Location, Extreme Learning Machine.



2252-083X/ © 2022 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/ISEE.2021.125855.1424>

ارائه یک روش هوشمند به منظور مکان‌یابی خطا در خطوط کابلی AC با استفاده از ماشین

یادگیری بی‌نهایت

محمد رضایی^۱، علی‌اکبر عبدوس^{۲*}، مهدی فرزینفر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل -

مازندران - ایران

mod.rezaee@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - مازندران - ایران

a.abdoos@nit.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه دامغان - سمنان - ایران

m.farzinfar@du.ac.ir

چکیده: در کابل‌های فشارقوی به دلیل القای متقابل بین هسته و غلاف و نیز خاصیت خازنی بالای کابل، مکان‌یابی خطا نسبت به خطوط هوایی پیچیده شده است. با به‌کارگیری حفاظت دیستانس به منظور حفاظت کابل‌های فشارقوی AC، امپدانس دیده‌شده نسبت به مکان خطا دارای رفتار غیرخطی خواهد بود. در این مقاله، مکان‌یابی خطا با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری‌شده ولتاژ و جریان هسته و غلاف در دو طرف کابل و به کمک ماشین یادگیری بی‌نهایت انجام می‌گیرد. الگوریتم پیشنهادی قادر به شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده بین کمیت‌های اندازه‌گیری‌شده و محل خطا است. در سیستم مطالعه‌شده ابتدا خطای هسته به غلاف در فواصل مختلف با در نظر گرفتن مقاومت‌های متعدد در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود. سپس به منظور آموزش هسته هوشمند الگوریتم پیشنهادی، بردارهای ورودی در شرایط مختلف، استخراج و برای هر کدام، یک خروجی مطلوب متناظر با محل خطا در نظر گرفته می‌شود. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از به‌کارگیری ابزارهای هوشمند مختلف، برتری ماشین یادگیری بی‌نهایت را نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان از جهت دقت نتایج و سرعت یادگیری نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: حفاظت کابل‌های فشارقوی AC، مکان‌یابی خطا، ماشین یادگیری بی‌نهایت

۱- مقدمه

فلزی‌اند. این غلاف فلزی برای محدود کردن میدان الکتریکی، حفاظت مکانیکی و شیمیایی کابل و جلوگیری از خطر شوک الکتریکی به کار برده می‌شود [۱]. شار پیوندی ناشی از عبور جریان روی هر کدام از هادی‌ها و غلاف‌ها ولتاژ القا می‌کند؛ بنابراین، به دلیل مسائل ایمنی، غلاف کابل باید دست‌کم در یک نقطه، زمین شده باشد. مهم‌ترین روش‌های زمین کردن غلاف کابل در شبکه‌های کابلی به صورت تک‌نقطه‌ای^۱، همگن^۲ و متقاطع^۳ است [۲،۳].

با توجه به اینکه کابل‌های فشارقوی مانند خطوط انتقال نقش مهمی در تأمین انرژی الکتریکی دارند، حفاظت آنها تأثیر بسزایی در پایداری و امنیت سیستم قدرت دارد. از بین

در سال‌های اخیر استفاده از کابل‌های قدرت با توجه به پیشرفت در تکنولوژی‌های مربوط به ساخت عایق، در حال افزایش است. کابل‌های فشار متوسط و فشارقوی علاوه بر هادی و لایه‌های عایق، دارای یک یا چند غلاف^۱ یا رویه

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۰۱

نام نویسنده مسئول: علی‌اکبر عبدوس

نشانی نویسنده مسئول: ایران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده برق و کامپیوتر

مرجع [۱۰] مکان‌یابی خطا در خط کابلی با استفاده از یک تکنیک بهینه‌سازی و به کمک دو مدل مداری در حین خطای اتصال کوتاه بین دو فاز و اتصال فاز به زمین انجام شده است. از معایب این روش، وابستگی خروجی به حدس اولیه است.

در مراجع [۱۱، ۱۲] نمونه‌ای از مکان‌یابی خطا به کمک امواج سیار ارائه شده است. در این مقالات از تبدیل گسسته موجک ولتاژ و جریان خطا به‌عنوان ورودی شناسایی‌کننده بخش معیوب استفاده می‌شود. سپس به کمک یک روش امیدانسی، موقعیت خطا تعیین می‌شود. عیب اصلی این طرح، وابستگی آن به نوع خطا است. مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار در مرجع [۱۳] برای سیستم‌های انتقال ترکیبی متشکل از خط هوایی و کابلی انجام شده است. در این پژوهش، یک الگوریتم شناسایی برای شناسایی قسمت معیوب و یک روش مکان‌یابی خطا با استفاده از اختلاف زمانی بین ورود امواج سیار به پایانه‌ها ارائه شده است؛ با این حال، در برخی موارد، بخش معیوب قابل شناسایی نیست و روش مکان‌یابی خطا ناموفق است. از مشکلات اصلی مکان‌یابی خطا به کمک امواج سیار، فرکانس نمونه‌برداری بالای آنها است.

دسته دوم از الگوریتم‌های حفاظت کابل، روش‌های هوشمند مبتنی بر تشخیص الگوی رفتاری کابل‌ها است. در مرجع [۱۴] مکان‌یابی خطا برای خطوط کابلی در سطح ولتاژ توزیع به کمک ماشین یادگیری بی‌نهایت^۷ انجام شده است. در این پژوهش، پس از آموزش هسته الگوریتم هوشمند، توانایی ماشین بردار بی‌نهایت^۸ در مکان‌یابی خطا بررسی شده که نتایج حاصل از آن دارای دقت خوبی است. در مرجع [۱۵] مکان‌یابی خطا برای یک خط ترکیبی با شبکه عصبی مصنوعی انجام شده است. در این روش، به کمک تبدیل موجک، ابتدا ویژگی‌های مورد نیاز، استخراج و سپس با آموزش شبکه عصبی مکان‌یابی خطا انجام می‌شود. در این پژوهش، تأثیر مقاومت خطا بر روش هوشمند بررسی نشده است. همچنین، تأثیرات غلاف روی مکان‌یابی خطا در کابل فشارقوی استفاده‌شده لحاظ نشده است. یک روش مکان‌یابی دیگر به کمک شبکه عصبی مصنوعی در مرجع [۱۶] بررسی شده است. در این روش، اندازه ولتاژ و

روش‌های حفاظتی، حفاظت دیفرانسیل به دلیل وابسته نبودن به پارامترهای کابل، امنیت^۹، حساسیت^۶، دقت و سادگی پیاده‌سازی، بهترین و پرکاربردترین روش حفاظتی برای خطوط کابلی است [۴]؛ بنابراین، مکان‌یابی خطا برای خطوط کابلی به همراه حفاظت دیفرانسیل ضروری به نظر می‌رسد.

به‌طور کلی، روش‌های مکان‌یابی خطا به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش‌های تحلیلی و هوشمند. در مرجع [۵] پس از تجزیه و تحلیل رابطه جریان غلاف کابل و جریان توالی صفر جاری‌شده در هسته کابل، مکان‌یابی خطا در کابل‌ها براساس ویژگی‌های استخراج‌شده انجام می‌گیرد. در الگوریتم ارائه‌شده در [۶] به منظور تعیین موقعیت مکان خطا در خط ترکیبی شامل خط هوایی و کابل زیرزمینی، به اندازه‌گیری اطلاعات فازوری پایانه ابتدایی خط هوایی و اندازه‌گیری هم‌زمان دورترین پایانه کابل قدرت نیاز است. ایده اصلی این روش، حل معادلات مدل خط با استفاده از شرایط مرزی پایانه دریافت و ارسال خط ترکیبی است. در روشی دیگر با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان حاصل از خطا در مدار معادل یک خط تک‌بخشی، فاصله خطا محاسبه می‌شود. این طرح با به‌کارگیری روش تکرار نیوتن رافسون برای تعیین موقعیت خطا در کابل‌های زیرزمینی چندتکه تعمیم داده شده است؛ اما احتمال همگرانبودن الگوریتم وجود دارد [۷].

در مرجع [۸]، در ابتدا با به‌کارگیری اطلاعات فازوری ابتدای خط هوایی و انتهای خط کابلی مکان‌یابی خطا برای یک خط تک‌فاز ترکیبی انجام شده و سپس برای خط سه‌فاز تعمیم یافته است. ایده اصلی این مقاله، استفاده از مدل گسترده خط و حل معادلات این مدل با استفاده از شرایط مرزی ابتدا و انتهای خط است. از مشکلات این طرح، پایین بودن دقت مکان‌یابی خطا در قسمت خط کابلی است. در مرجع [۹]، برای مکان‌یابی خطا از مدل فشرده کابل‌های فشارقوی استفاده شده که نسبت به مدل گسترده از دقت کمتری برخوردار است. در این روش، ابتدا با توجه به مدل فشرده روابط ولتاژ و جریان در محل خطا به دست می‌آید، سپس به کمک مقادیر جریان و ولتاژ یک سمت و روش‌های حل عددی محل خطا تخمین زده می‌شود. در

ماشین یادگیری بی‌نهایت، مکان خطا تخمین زده خواهد شد. ماشین یادگیری بی‌نهایت به شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده بین کمیت‌های اندازه‌گیری شده و محل خطا قادر است. ماشین یادگیری بی‌نهایت بر مبنای یک شبکه تک‌لایه پیشخور^{۱۲} بنا نهاده شده است [۲۱، ۲۲]. دو ابزار دیگر برای مقایسه با ماشین یادگیری بی‌نهایت به کار گرفته شده است. اولین ابزار، شبکه عصبی مصنوعی است که از چندین لایه مختلف تشکیل شده و هر لایه شامل چندین نرون است. تعداد لایه‌های پنهان و نرون‌ها را باید با سعی و خطا به دست آورد [۲۳]. ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان دومین ابزار استفاده شده در این پژوهش، یک نوع سیستم یادگیری نظارت شده است که هم برای طبقه‌بندی و هم برای تخمین و برآورد تابع برازش داده‌ها در مسائل رگرسیون به کار می‌رود. این روش از اصل کمینه‌سازی خطای ساختاری بهره می‌جوید و موجب یک جواب بهینه کلی می‌شود. هرچند روش‌های هوشمند زیادی به‌منظور مکان‌یابی خطا در کابل‌های فشارقوی ارائه شده‌اند، یک روش جامع که شرایط مختلف در آن لحاظ شده باشد و دارای دقت مطلوب باشد، لازم است. روش پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا در کابل‌های فشارقوی به دلایل زیر نسبت به برخی از روش‌های هوشمند ارائه شده، برتر است:

- الگوریتم ساده بدون وجود بار محاسباتی زیاد؛
- استفاده از ماشین یادگیری بی‌نهایت به‌عنوان یک ابزار رگرسیون کارا با سرعت یادگیری و قابلیت تعمیم‌پذیری بالا؛
- مدل‌سازی کامل و دقیق کابل با در نظر گرفتن اثرات غلاف کابل به هنگام خطا؛
- قابلیت تعمیم برای کابل‌های فشارقوی با انواع مختلف روش همبندی غلاف؛
- بی‌تأثیری مقاومت خطا روی دقت الگوریتم؛
- سرعت و دقت زیاد در تعیین محل خطا؛
- در نظر گرفتن خطاهای قوسدار.

۲- نیاز به یک الگوریتم جدید

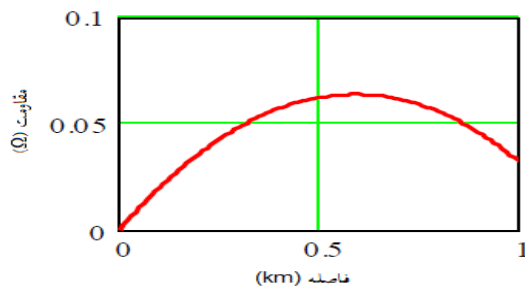
به کار گرفتن طرح‌های مبتنی بر محاسبه امیدانس به‌منظور حفاظت کابل‌های فشارقوی مستلزم شناخت کافی

جریان با کمک تبدیل فوریه گسسته، استخراج، سپس به کمک آموزش شبکه عصبی مکان‌یابی خطا انجام شده است. هسته هوشمند الگوریتم پیشنهادی در ابتدای خط دارای عملکرد نامناسب و خطای بسیار زیادی است. در مرجع [۱۷]، برای مکان‌یابی خطا در یک سیستم انتقال ترکیبی شامل کابل و خط هوایی، ابتدا ویژگی‌های اصلی سیگنال‌های سه‌فاز ولتاژ در یک طرف خط استخراج می‌شوند، سپس به‌منظور تشخیص خطا در خط کابلی یا هوایی، از ماشین بردار پشتیبان استفاده می‌شود. پس از آن، مکان دقیق خطا با نمودار شبکه بیولی (نردبانی)^۹ تعیین می‌شود. مرجع [۱۸] یک روش ترکیبی، بهینه و با دقت مناسب مبتنی بر تبدیل موجک و ماشین بردار پشتیبان به‌منظور مکان‌یابی خطا در یک خط ترکیبی ارائه می‌دهد. در این روش، از انرژی ضرایب موجک و جریان خط برای آموزش ماشین بردار پشتیبان استفاده می‌شود. در مرجع [۱۹] خط‌یابی در کابل انتقال شبکه به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۰} ارائه شده است. طرح پیشنهادی در این مقاله، از سیگنال‌های ولتاژ و جریان برای یادگیری الگوی رفتاری کابل‌ها استفاده می‌کند. در این طرح، مقدار مقاومت خطا بین ۰ تا ۱۰ اهم لحاظ شده است و برای مقاومت‌های بیش از ۱۰ اهم دارای دقت مطلوب نیست.

در روش ترکیبی ارائه شده در مرجع [۲۰] از تبدیل موجک گسسته^{۱۱} و ماشین بردار پشتیبان برای مکان‌یابی خطا در کابل‌های توزیع زیرزمینی استفاده شده است. حداکثر ضریب به‌دست‌آمده از جریان توالی مثبت تجزیه شده در سطوح مختلف به‌عنوان الگوی ورودی برای آموزش استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه برخلاف خطوط هوایی، رابطه بین امیدانس دیده شده در محل رله دیستانس و محل خطا غیرخطی است، الگوریتم‌های تحلیلی که برای مکان‌یابی خطا وابسته به پارامترهای کابل‌اند، به دلیل استفاده از الگوریتم‌های حل عددی دارای قابلیت اطمینان کمتری نسبت به الگوریتم‌های هوشمندند و تعیین مکان دقیق خطا با آنها بسیار دشوار و پیچیده است.

در این مقاله، با استفاده از جریان‌ها و ولتاژهای دو انتهای کابل، بردارهای آموزشی، ایجاد و سپس با استفاده از



شکل (۱): تغییرات مقاومت با موقعیت خطا [۲۴]

این امر نشان می‌دهد فاکتور جبران‌ساز در خطوط کابلی خود تابعی از محل خطاست و برای رله دیستانس نمی‌توان آن را به صورت یک تابع تعریف کرد یا برای آن دوگان در نظر گرفت. در واقع رله دیستانس فقط یک مقدار ثابت را به عنوان فاکتور جبران‌ساز می‌پذیرد که باعث ایجاد مشکلات زیادی در حفاظت خطوط کابلی می‌شود [۲۵-۲۶]؛ بنابراین، برای خطوط کابلی، تنها دانستن مقدار امپدانس کفایت نمی‌کند و تنها با داشتن منحنی تغییرات امپدانس دیده‌شده می‌توان رله دیستانس را به شکل صحیح تنظیم کرد؛ به همین علت، در انجام مطالعات مربوط به حفاظت، شبیه‌سازی دقیق کابل تحت حفاظت، اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد [۱].

روش‌های ارائه‌شده برای مکان‌یابی خطا در کابل‌ها به دو دسته وابسته به پارامترهای کابل و مستقل از پارامترهای کابل تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به ماهیت پیچیده‌تر خطوط کابلی نسبت به خطوط هوایی، اثر امپدانس و ادمیتانس‌های متقابل روی سایر فازها و غلاف آنها بیشتر است. برای مکان‌یابی صحیح خطوط کابلی فشارقوی که به پارامترهای کابل وابسته‌اند، باید در ابتدای امر مدل‌سازی دقیقی از رفتار کابل، قبل و حین خطا انجام شود تا نتایج ارائه‌شده به کاربردهای عملی نزدیک و پذیرفتنی باشند. اگر مدل کابل به صورت شکل (۲) در نظر گرفته شود، برای ولتاژ و جریان کابل داریم [۲۷]:

از پارامترهای الکتریکی کابل و اصول حفاظت دیستانس است. یکی از تفاوت‌های مهم، اختلاف زیاد بین پارامترهای الکتریکی کابل و خط هوایی است. در کابل‌ها به دلیل فاصله کم بین هادی‌ها، امپدانس‌های سری موجود، کوچک‌تر و خاصیت خازنی چندین برابر بزرگ‌تر از مقادیر مشابه در خطوط هوایی است. همچنین، زاویه امپدانس نیز در کابل نسبت به خط هوایی کمتر است. علاوه بر این، در برخی مواقع ممکن است امپدانس دیده‌شده در محل رله از حداقل مقدار تنظیم‌شده برای رله دیستانس، کمتر باشد [۱]. در رله دیستانس، امپدانس دیده‌شده با واحد اندازه‌گیری خطای فاز به زمین به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_c = \frac{u_a}{I_a + k_0 \times I_{res}} \quad (1)$$

که u_a و I_a ولتاژ و جریان فاز a و I_{res} جریان باقیمانده است که از جمع جریان‌های سه فاز در محل رله به دست می‌آید و مقدار آن سه برابر جریان توالی صفر (I_0) است. k_0 فاکتور جبران‌ساز زمین است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad (2)$$

در رابطه فوق، Z_0 و Z_1 به ترتیب امپدانس توالی صفر و مثبت‌اند. باید توجه داشت در خطوط هوایی، مقدار امپدانس توالی صفر و مثبت با فاصله از محل خطا نسبت مستقیم دارد؛ در حالی که در خطوط کابلی امپدانس توالی صفر تغییرات غیرخطی نسبت به فاصله از محل خطا دارد. k_0 برای کابل‌های زمین‌شده همگن و متقاطع ثابت نیست و به محل خطا بستگی دارد؛ برای نمونه، در همبندی غلاف به صورت همگن که غلاف در هر دو انتهای طول کابل زمین می‌شود، تغییرات مقاومت دیده‌شده با فاصله از محل خطا به طور غیرخطی تغییر می‌کند که در شکل (۱) نشان داده شده است [۲۴].

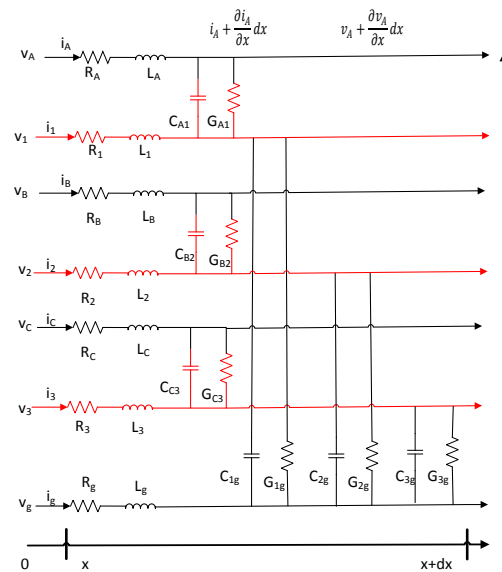
در این رابطه R_f مقاومت خطا، $i_{CR}(d)$ جریان وارد شده به غلاف از سمت راست و $i_{CE}(d)$ جریان وارد شده به غلاف از سمت چپ محل خطا هستند.

در صورتی که مدل سازی کابل هم به صورت دقیق انجام شده باشد، باز هم مکان یابی خطا نیاز به حل الگوریتم های ریاضیاتی دارد که وابسته به حدس اولیه اند و امکان ناهمگرایی برای این الگوریتم ها وجود خواهد داشت که باعث کاهش قابلیت اطمینان واحد مکان یاب در کنار حفاظت دیفرانسیل خواهد شد. با توجه موارد ذکر شده، بهترین روش برای مکان یابی خطا در خطوط کابلی استفاده از روش های مکان یابی مستقل از پارامترهای کابل است. از جمله این روش ها تبدیل موجک و امواج سیار و ابزارهای هوشمند است. تبدیل موجک، ابزاری بسیار قدرتمند در آنالیز سیگنال های حین خطا است که می توان به کمک آن با روش امواج سیار، مکان خطا را به خوبی تشخیص داد [۱۸]. از تبدیل موجک به همراه ابزار هوشمند نیز می توان استفاده کرد تا واحد مکان یابی خطا را قدرتمندتر کرد.

در کنار روش های مبتنی بر تبدیل موجک و امواج سیار می توان از روش های هوشمند همچون شبکه عصبی مصنوعی، ماشین یادگیری بی نهایت و ماشین بردار پشتیبان استفاده کرد که به فرکانس نمونه برداری بالا نیاز ندارند. با توجه به روابط ارائه شده و پیچیدگی فرآیند مکان یابی خطا در خطوط کابلی، استفاده از ابزار هوشمند برای تخمین مکان خطا توجیه پذیر و مناسب است؛ بدین منظور، از ماشین یادگیری بی نهایت به دلیل برتری های ذاتی آن استفاده می شود تا بدون پیچیدگی و در شرایط بهره برداری مختلف، مکان یابی خطا با دقت مناسبی انجام شود.

با توجه به وجود مشکلات مربوط به ناهمگرایی به جواب بهینه در روش های بهینه سازی مبتنی بر تکرار، برای مکان یابی خطا در خطوط کابلی فشارقوی به روشی ساده، با قابلیت اطمینان بالا و در عین حال، مستقل از پارامترهای کابل نیاز است.

تکنیک های هوش مصنوعی قابلیت بالایی در شناسایی الگوهای غیر خطی و استخراج روابط پیچیده بین ماتریس ورودی و خروجی را دارند؛ در حالی که یافتن آنها با الگوریتم های ریاضیاتی و دیگر تکنیک های کامپیوتری بسیار



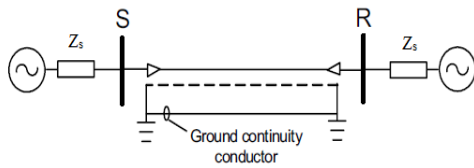
شکل (۲): مدل کابل فشارقوی

$$-\frac{\partial v_k}{\partial x} = R_k i_k + L_k \frac{\partial i_k}{\partial t} + \sum_{\substack{j=A, B, C \\ 1, 2, 3, g \\ j \neq k}} M_{kj} \frac{\partial i_j}{\partial t} - R_g i_g - L_g \frac{\partial i_g}{\partial t} - \sum_{\substack{j=A, B, C \\ 1, 2, 3}} M_{jg} \frac{\partial i_j}{\partial t} \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i_k}{\partial x} = \sum_{\substack{j=A, B, C \\ 1, 2, 3, g \\ j \neq k}} G_{kj} (v_k - v_j) + \sum_{\substack{j=A, B, C \\ 1, 2, 3, g \\ j \neq k}} C_{kj} \frac{\partial (v_k - v_j)}{\partial t} \quad (4)$$

در صورتی که خطایی بین هسته و غلاف یک فاز اتفاق افتد، برای مکان یابی خطا با توجه به روابط (۳) و (۴) می توان ولتاژ هسته $v_{CE}(d)$ و غلاف $v_{SE}(d)$ را در محل خطا بر حسب محل خطا به دست آورد و به کمک رابطه (۵) محل خطا را به کمک الگوریتم های ریاضیاتی تخمین زد.

$$v_{CE}(d) = R_f i_{CE}(d) - R_f i_{CR}(d) + v_{SE}(d) \quad (5)$$



شکل (۳): نمای کلی سیستم کابلی مطالعه‌شده [۱]

حال سیستم کابلی مدنظر با در نظر گرفتن روش زمین‌کردن همگن در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود. هدف از این شبیه‌سازی، استخراج اطلاعات مورد نیاز برای مکان‌یابی خطا در سیستم مدنظر است. همچنین، نیاز است یک فرکانس نمونه‌برداری مناسب برای انجام شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شود. هرچه فرکانس نمونه‌برداری بیشتر شود، می‌توان محتویات هارمونیک بالاتری را استخراج کرد؛ ولی حجم محاسبات افزایش می‌یابد، بدون اینکه دقت تخمین هارمونیک‌های موجود افزایش یابد. همچنین، کاهش فرکانس نمونه‌برداری حجم محاسبات را کاهش می‌دهد؛ اما فرکانس‌های بالا را نمی‌توان مشاهده کرد؛ بنابراین، باید فرکانس نمونه‌برداری به اندازه‌ای انتخاب شود تا بتوان با دقت خوبی محتویات فرکانسی را با استفاده از تبدیل فوریه استخراج کرد؛ بنابراین، با توجه به اینکه در سیگنال‌های جریان در حین خطا محتویات فرکانسی، بالاتر از هارمونیک پنجم ظاهر نمی‌شود، انتخاب فرکانس نمونه‌برداری ۲/۵ کیلو هرتز با دقت بالایی، محتویات فرکانسی را به دست می‌دهد. بدین ترتیب با توجه به تئوری نایکویست، محتویات هارمونیک تا فرکانس ۱۲۵۰ هرتز را می‌توان با دقت بالایی با تبدیل فوریه استخراج کرد.

جدول (۱): موقعیت مکانی کابل شبیه‌سازی‌شده برحسب متر

شماره کابل	مختصات افقی	مختصات عمودی
۱	۰	-۱/۳۴۶۲
۲	-۰/۰۵۳۸	-۱/۲۵۳
۳	۰/۰۵۳۸	-۱/۲۵۳

پیچیده و دشوار است. از میان روش‌های هوشمند، ماشین یادگیری بی‌نهایت، روشی جدید و سریع برای بهینه‌سازی شبکه عصبی تک‌لایه مخفی پیشخور است که به‌طور تصادفی وزن‌های ورودی را انتخاب و وزن‌های خروجی را به صورت تحلیلی تعیین می‌کند. از مزایای این روش نسبت به سایر تکنیک‌های متداول، نیاندداشتن به تنظیم لایه پنهان، فرایند یادگیری بسیار سریع‌تر با حداقل تعداد پارامترهای تنظیم‌شونده، سهولت استفاده و مناسب برای انواع توابع تحریک هستند. ماشین یادگیری بی‌نهایت از قابلیت درون‌یابی و قابلیت تقریب بسیار خوبی برخوردار است که آن را نسبت به سایر روش‌های یادگیری مرسوم برتر می‌کند. همچنین، می‌توان انواع مختلفی از توابع تحریک را در ماشین بردار بی‌نهایت به‌منظور بهبود فرایند یادگیری و تعمیم‌پذیری آن استفاده کرد [۲۲].

۳- سیستم کابلی مطالعه‌شده

به‌منظور ارزیابی روش ارائه‌شده برای مکان‌یابی خطا، قسمتی از سیستم قدرت شامل دو پست ۴۰۰ کیلوولت با امپدانس $Z_s = 0.23 + j4.71$ و یک خط انتقال کابلی سه‌فاز بین آنها در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور کنترل برای شارش توان به‌منظور شبیه‌سازی شرایط مختلف بارگذاری می‌توان زوایای منابع را نسبت به هم تغییر داد. در ابتدا فرض می‌شود پست شماره یک، منبع تغذیه و پست شماره دو، بار در نظر گرفته می‌شود و سپس در یک بخش جداگانه اثر تغییر شارش توان بررسی می‌شود. سیستم کابلی به‌صورت سه کابل تک‌فاز و تک‌هسته ۲۳۰ کیلوولت است. مشخصات کابل نیز در جدول (۱) آمده است [۲۴]. شکل (۳) نمای کلی سیستم مطالعه‌شده در این مقاله را نشان می‌دهد. آرایش سه کابل تک‌هسته از نوع مثلثی به‌هم‌چسبیده و نوع زمین کردن غلاف کابل‌ها به‌صورت همگن است. موقعیت مکانی هر فاز مطابق جدول (۱) است. مرکز کابل، مرجع مختصات افقی و زمین، مرجع مختصات عمودی در نظر گرفته شده است. مشخصات مربوط به پارامترهای کابل نیز در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): پارامترهای کابل در سیستم مطالعه شده

نوع کابل	XLPE تک هسته
ولتاژ فاز	۲۳۰ kV
سطح مقطع	۱۲۰۰ mm ²
شعاع هادی	۰/۰۲۱۵ m
شعاع عایق	۰/۰۴۵۲ m
شعاع غلاف	۰/۰۴۹۸ m
شعاع PVC	۰/۰۵۳۸ m
مقاومت هسته مسی	$1/72 \times 10^{-8} \Omega.m$
مقاومت غلاف	$2/14 \times 10^{-8} \Omega.m$
نفوذپذیری نسبی هسته	۱
نفوذپذیری نسبی غلاف	۱
ضریب دی الکتریک عایق	۲/۵
ضریب دی الکتریک PVC	۸
مقاومت ویژه زمین	۱۰۰ $\Omega.m$

می‌شود. برای آموزش ماشین‌های یادگیری، مطابق با شکل (۴) یک ماتریس با بردارهایی شامل ۱۲ ویژگی استخراج شده ایجاد می‌شود. ویژگی‌های استخراج شده شامل دامنه و فاز ولتاژ و جریان هسته در دو طرف کابل به همراه دامنه و فاز جریان غلاف است که در دو انتهای کابل اندازه‌گیری شده است. با توجه به شکل (۴)، هر ستون این ماتریس نشان‌دهنده بردار استخراج شده برای یک محل خطا (L) و یک مقاومت خطای (R) مشخص است. ماتریس خروجی نیز در شکل (۵) نشان داده شده که دارای یک سطر است و درایه‌های آن نشان‌دهنده محل خطا است.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد مکان‌یابی خطا به کمک اطلاعات یک پایانه خط انتقال باعث ایجاد تأثیرپذیری الگوریتم‌ها از مقاومت خطا و کاهش قابلیت اطمینان آنها می‌شود. در این مقاله، سعی شده است با به‌کارگیری اطلاعات دو طرف خط، این نقاط ضعف تا حدودی پوشش داده شوند و قابلیت اطمینان الگوریتم مکان‌یابی خطا افزایش یابد. با توجه به اینکه از داده‌های دامنه و فاز سیگنال‌های ولتاژ و جریان در دو طرف خط انتقال استفاده می‌شود، به داده‌های سنکرون نیاز است. ذخیره‌سازی داده‌های سنکرون با استفاده از یک برچسب زمانی به نمونه‌های ذخیره‌شده از طریق ابزارهای مختلفی همچون واحد اندازه‌گیری فازور^{۱۳} امکان‌پذیر است.

خطای متداول در خطوط کابلی فشارقوی و فشار متوسط که دارای غلاف فلزی‌اند، خطای اتصال هسته به غلاف است. در مواردی این خطا می‌تواند به همراه قوس باشد. با توجه به اینکه در خطای قوس دار مقدار مقاومت خطا وابسته به مقادیر ولتاژ و جریان در محل خطا و برحسب زمان متغیر است، شبیه‌سازی و مدل‌سازی آن در یک بخش جداگانه بررسی شده است. به‌منظور شبیه‌سازی خطا در فاز a، به کمک یک بریکر در لحظه ۰/۱ ثانیه هسته کابل از طریق یک مقاومت (مقاومت خطا) به غلاف متصل می‌شود.

۴- روش پیشنهادی

با توجه به بخش ۲، الگوریتم‌های متداول در حفاظت دیستانس نمی‌تواند به‌طور مؤثری در مکان‌یابی خطاها در کابل‌های فشارقوی به کار گرفته شوند؛ بنابراین، به یک الگوریتم جدید تعیین مکان دقیق خطا در کابل‌های فشارقوی نیاز است. در [۲۴] نشان داده شده است بین امیدانس دیده‌شده در محل رله دیستانس و محل خطا یک رابطه غیرخطی وجود دارد؛ به‌طوری‌که به تعیین مقدار دقیق پارامترهای کابل نیاز است.

بنابراین، در روش پیشنهادی از روش‌های رگرسیون هوشمند به‌منظور شناسایی این رابطه غیرخطی استفاده

$P_{train} =$

	R1, L1	R2, L2	Rn, Ln
اندازه ولتاژ هسته در ابتدای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
اندازه ولتاژ هسته در انتهای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
اندازه جریان هسته در ابتدای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
اندازه جریان هسته در انتهای خط	<input type="checkbox"/>	•••	<input type="checkbox"/>
اندازه جریان غلاف در ابتدای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
اندازه جریان غلاف در انتهای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
فاز ولتاژ هسته در ابتدای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
فاز ولتاژ هسته در انتهای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
فاز جریان هسته در ابتدای خط	<input type="checkbox"/>	•••	<input type="checkbox"/>
فاز جریان هسته در انتهای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
فاز جریان غلاف در ابتدای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
فاز جریان غلاف در انتهای خط	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

شکل (۴): ماتریس ورودی

$T_{train} =$

	R1, L1	R2, L2	Rn, Ln
محل خطا	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	•••

شکل (۵): ماتریس خروجی

۵- نتایج مکان‌یابی خطا

به کمک نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سیستم تست و با به‌کارگیری ابزارهای رگرسیون هوشمند، مکان‌یابی خطا در سیستم کابلی ذکر شده انجام می‌گیرد. در این تحقیق، مکان‌یابی خطا به کمک ماشین یادگیری بی‌نهایت انجام شده و با دو روش دیگر شامل شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان مقایسه می‌شود. برای آموزش و یادگیری ابزارهای رگرسیون، یک ماتریس ورودی برای پنج مقاومت خطای مختلف ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ اهم از ابتدا تا انتهای کابل با پله‌های یک کیلومتری همانند ماتریس نشان داده شده در شکل (۴) تشکیل داده می‌شود.

مقادیر ولتاژها و جریان‌ها قبل از به‌کارگیری در فرآیند آموزش، بین ۱- و ۱ نرمالیزه می‌شوند. همچنین، برای ماتریس خروجی نیز مقادیر مربوط به محل خطا به صورت نرمالیزه شده بین ۰ و ۱ در نظر گرفته می‌شوند.

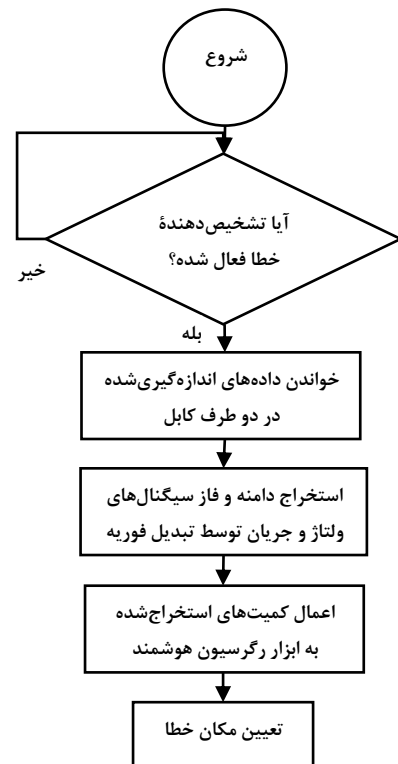
برای بررسی صحت عملکرد ابزار رگرسیون به کار گرفته شده، خطاهایی در فواصل ۳/۵، ۶/۳ و ۹/۵ کیلومتر با مقاومت خطای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ اهم اعمال شده و ولتاژ و جریان‌ها در دو طرف کابل اندازه‌گیری شده‌اند. علاوه بر این، برای سه مقاومت خطای متفاوت با مقادیر ۱۵، ۲۵ و ۳۵ اهم نیز در فواصل ۳، ۶ و ۹ کیلومتر، محل خطا تخمین زده می‌شود. در جدول (۳)، نتایج حاصل از مکان‌یابی خطا مشاهده می‌شوند. برای آنالیز نتایج حاصل از به‌کارگیری ابزارهای رگرسیون، سه شاخص مختلف شامل مقدار خطا، درصد خطا و درصد میانگین مطلق خطا^۴ طبق روابط (۶)، (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند.

$$(۶) \quad | \text{محل خطا} - \text{خروجی} | = \text{خطای تعیین مکان خطا}$$

$$(۷) \quad \text{درصد خطا} = \frac{\text{خطای تعیین مکان خطا}}{\text{طول خطا}} \times 100$$

$$(۸) \quad MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|l_i - p_i|}{l} \times 100$$

در رابطه (۸) l طول کابل، l_i محل واقعی خطای i ام، p_i محل خطای تخمین زده شده و n تعداد نقاط در نظر گرفته شده‌اند. برای بررسی عملکرد ماشین‌های یادگیری به کار گرفته شده، نتایج به دست آمده در دو دسته مجزا ارزیابی می‌شوند. در دسته اول، مقاومت خطاها همان مقادیری را



شکل (۶): الگوریتم پیشنهادی

اندازه‌گیری اطلاعات از دو انتهای خط نسبت به اندازه‌گیری‌های تک‌پایانه‌ای به دلیل نیاز به داشتن کانال مخابراتی هزینه بیشتری را در بر دارد؛ اما برای افزایش قابلیت اطمینان الگوریتم‌های به کار گرفته شده و کاهش تأثیرناپذیری نتایج از مقاومت خطا، این افزایش هزینه قابل چشم‌پوشی است؛ هرچند با توجه به اینکه متداول‌ترین سیستم حفاظتی خطوط کابلی، حفاظت دیفرانسیل است و این نوع حفاظت به‌خودی‌خود دارای کانال مخابراتی است. مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است. برای پیاده‌سازی روش فوق فرض‌های زیر مدنظر قرار می‌گیرند:

- مکان‌یاب خطا بعد از تشخیص خطا فعال می‌شود.
- حداقل یک سیکل بعد از رخداد خطا باید در دسترس باشد.

داده‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در دو طرف کابل به صورت سنکرون در دسترس‌اند.

(۷) شاخص درصد میانگین مطلق خطا بر حسب فاصله محل خطا ترسیم شده است. مشاهده می‌شود تمامی ابزارهای به کار گرفته شده دارای دقت زیادتری برای خطاهای انتهایی کابل‌اند. همچنین، نتایج ارائه شده در شکل (۷) نشان‌دهنده عملکرد بهتر ماشین یادگیری بی‌نهایت و شبکه عصبی مصنوعی نسبت به ماشین بردار پشتیبان در تخمین خطای مکان‌هایی است که در فرآیند آموزش شرکت نداشته‌اند. در شکل (۸) نیز شاخص درصد میانگین مطلق خطا بر حسب مقاومت خطا ترسیم شده است. مقادیر شاخص درصد میانگین مطلق خطا برای شبکه عصبی و ماشین یادگیری بی‌نهایت در تمامی مقاومت خطاهای استفاده شده در آموزش تقریباً کمتر از یک درصدند که در مقایسه با ماشین بردار پشتیبان دارای دقت بیشتری‌اند.

دارند که در فرآیند آموزش استفاده شده‌اند؛ ولی مکان خطا متفاوت با مقادیر اعمال شده در فرآیند آموزش است. در دسته دوم، محل خطا از بین مکان‌هایی انتخاب شده که در فرآیند آموزش استفاده شده است؛ ولی مقاومت‌های خطا متفاوت با مقادیر استفاده شده در فرآیند آموزش‌اند. تحلیل نتایج به دست آمده برای دسته اول نشان می‌دهد ماشین بردار پشتیبان در تخمین محل خطا در فاصله ۳۵۰۰ متر نسبت به دو ابزار دیگر دارای دقت کمتری است؛ به گونه‌ای که دارای بیشترین درصد خطا با مقدار ۳/۸۴ در کل مجموعه نتایج است. برای دو فاصله ۶۵۰۰ و ۹۵۰۰ متر، نتایج تخمین زده شده توسط ماشین بردار پشتیبان دارای درصد خطایی بین ۰/۱۰ و ۳/۶۸ است. نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای نتایج دسته اول، مطلوب به نظر می‌رسد. با به کارگیری این ابزار مقدار درصد خطا در تمام نقاط کمتر از ۱ است. در شکل

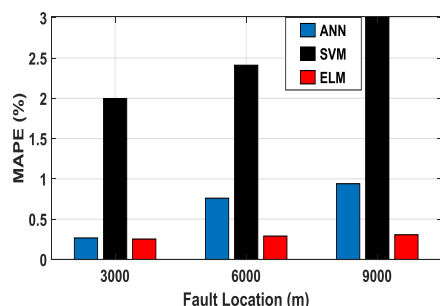
جدول (۳): نتایج حاصل از تخمین مکان خطا

درصد خطا			خروجی (m)			محل خطا	مقاومت خطا
ELM	SVM	ANN	ELM	SVM	ANN	(m)	(Ω)
۱/۶۳	۲/۶۵	۰/۲۹	۳۶۶۳	۳۷۶۵	۳۴۷۱	۳۵۰۰	۰
۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۵۹	۶۴۴۷	۶۵۲۴	۶۵۵۹	۶۵۰۰	
۱/۱۶	۰/۶۰	۰/۹۹	۹۳۸۴	۹۵۶۰	۹۵۹۹	۹۵۰۰	
۰/۶۱	۲/۶۱	۰/۹۲	۳۴۳۹	۳۷۶۱	۳۴۰۸	۳۵۰۰	۱۰
۰/۴۴	۰/۱۷	۰/۱۱	۶۴۵۶	۶۴۸۳	۶۵۱۱	۶۵۰۰	
۰/۳۰	۳/۰۷	۰/۲۵	۹۵۳۰	۹۸۰۷	۹۵۲۵	۹۵۰۰	
۰/۹۱	۰/۲۶	۰/۳۴	۳۴۰۹	۳۴۷۴	۳۴۶۶	۳۵۰۰	۲۰
۰/۱۹	۳/۶۸	۰/۳۶	۶۵۱۹	۶۱۳۲	۶۵۳۶	۶۵۰۰	
۰/۲۴	۱/۲۲	۰/۲۴	۹۵۲۴	۹۳۷۸	۹۵۲۴	۹۵۰۰	
۰/۸۱	۱/۱۲	۰/۲۹	۳۴۱۹	۳۶۱۲	۳۴۷۱	۳۵۰۰	۳۰
۰/۱۲	۲/۴۶	۰/۲۹	۶۴۸۸	۶۲۵۴	۶۵۲۹	۶۵۰۰	
۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۱۸	۹۴۹۷	۹۴۹۰	۹۵۱۸	۹۵۰۰	
۰/۲۸	۳/۸۴	۰/۲۷	۳۵۲۸	۳۸۸۴	۳۴۷۳	۳۵۰۰	۴۰
۰/۳۷	۰/۵۶	۰/۲۵	۶۵۳۷	۶۵۵۶	۶۵۲۵	۶۵۰۰	
۰/۱۱	۲/۸۳	۰/۲۹	۹۵۱۱	۹۷۸۳	۹۵۲۹	۹۵۰۰	
۰/۳۴	۱/۲۷	۰/۴۷	۳۰۳۴	۳۱۲۷	۲۹۵۳	۳۰۰۰	۱۵
۰/۰۲	۳/۰۸	۱/۶۶	۵۹۹۸	۵۶۹۲	۵۸۳۴	۶۰۰۰	
۰/۵۱	۳/۳۹	۲/۰۷	۹۰۵۱	۸۶۶۱	۸۷۹۳	۹۰۰۰	
۰/۳۹	۱/۲۷	۰/۲۲	۲۹۶۱	۳۱۲۷	۳۰۲۲	۳۰۰۰	۲۵
۰/۴۵	۳/۲۲	۰/۳۸	۵۹۵۵	۵۶۷۸	۶۰۳۸	۶۰۰۰	
۰/۱۵	۳/۹۴	۰/۳۷	۹۰۱۵	۸۶۰۶	۹۰۳۷	۹۰۰۰	
۰/۰۳	۳/۴۵	۰/۱۱	۳۰۰۳	۳۳۴۵	۲۹۸۹	۳۰۰۰	۳۵
۰/۴۰	۰/۹۳	۰/۲۴	۵۹۶۰	۵۹۰۷	۵۹۷۶	۶۰۰۰	
۰/۲۶	۱/۷۰	۰/۳۸	۸۹۷۴	۸۸۳۰	۸۹۶۲	۹۰۰۰	

بردار پشتیبان در بیشتر فواصل و مقاومت‌های خطا بیش از ۱ درصد بوده و بیشترین مقدار آن نیز ۳/۹۴ درصد است. درصد خطای شبکه عصبی مصنوعی در تمامی فواصل برای مقاومت ۱۵ اهم بیش از سایر مقاومت‌ها بوده و بیشترین مقدار آن نیز ۲/۰۷ درصد است. برای مقاومت‌های ۲۵ و ۳۵ اهم شاخص درصد خطا به کمتر از ۰/۳۸ درصد می‌رسد. ماشین یادگیری بی‌نهایت نسبت به دو روش دیگر برای مقاومت‌های خطایی که در آموزش آن استفاده نشده‌اند، دارای نتایج بهتری است؛ به گونه‌ای که بیشترین مقدار درصد خطای آن ۰/۵۱ است.

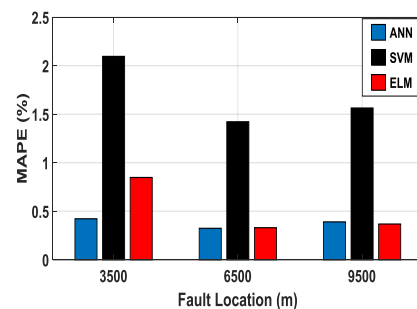
در نمودارهای شکل (۹) و (۱۰) نیز به‌وضوح مشاهده می‌شود ماشین بردار پشتیبان در مقابل دو ابزار دیگر برای مقاومت‌های خطای مذکور نتایج ضعیف‌تری را به دست می‌دهد. شکل (۹) نشان می‌دهد شاخص درصد میانگین خطا در تمامی فواصل برای ماشین یادگیری بی‌نهایت بهتر از شبکه عصبی مصنوعی است.

در شکل (۱۰)، نمودار درصد میانگین خطا بر حسب مقاومت‌های خطایی نشان داده شده است که در فرآیند آموزش شرکت نداشته‌اند. نتایج نشان می‌دهند ماشین بردار پشتیبان دارای بدترین دقت تخمین است. در مقاومت‌های خطای ۱۵ و ۳۵ اهم، میانگین درصد خطا برای ماشین یادگیری بی‌نهایت بهتر از شبکه عصبی است؛ در حالی که در مقاومت ۲۵ اهم شاخص فوق برای شبکه عصبی، کمتر از ماشین یادگیری بی‌نهایت است. نتایج نشان می‌دهند برای تمامی مقاومت‌های دیده‌نشده، شاخص درصد میانگین خطا برای ماشین یادگیری بی‌نهایت، کمتر از ۲ درصد است.

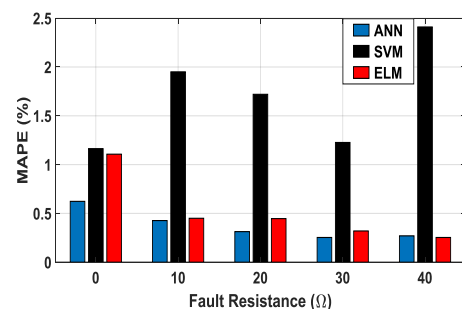


شکل (۹): نمودار درصد میانگین خطا بر حسب محل خطا برای مقاومت‌هایی که در فرآیند آموزش استفاده نشده‌اند

مکان خطا با شبکه عصبی مصنوعی و ماشین یادگیری بی‌نهایت بسیار بهتر از ماشین بردار پشتیبان بوده است و روش‌های قابل اعتمادتری برای مکان‌یابی خطا هستند. ماشین یادگیری بی‌نهایت در فاصله ۳۵۰۰ متر، نتایج ضعیف‌تری نسبت به شبکه‌های عصبی دارند؛ اما در دو فاصله ۶۵۰۰ و ۹۵۰۰ متر، نتایج دو روش نزدیک به هم‌اند. در مکان‌یابی خطا با ماشین یادگیری بی‌نهایت، درصد خطای محاسبه‌شده برای فاصله ۳۵۰۰ متر با مقاومت خطای صفر اهم، ۱/۶۳ است که این مقدار باعث افزایش مقدار شاخص درصد میانگین خطا در مقاومت صفر اهم در نمودار شکل (۸) شده است. در سایر مقاومت‌ها نتایج این دو روش بسیار نزدیک‌اند.



شکل (۷): نمودار درصد میانگین خطا بر حسب محل خطا برای مقاومت‌هایی که در فرآیند آموزش استفاده شده‌اند



شکل (۸): نمودار درصد میانگین خطا بر حسب مقاومت خطا برای مقاومت‌هایی که در فرآیند آموزش استفاده شده‌اند

در دسته دوم، برای ارزیابی روش‌های هوشمند، نتایج برای مقاومت‌های خطایی بررسی می‌شوند که در فرآیند آموزش استفاده نشده‌اند؛ بنابراین، نتایج مکان‌یابی خطا برای سه مقاومت خطای ۱۵، ۲۵ و ۳۵ اهم در فواصل ۳، ۶ و ۹ کیلومتر ارائه می‌شوند. مقدار درصد خطا برای ماشین

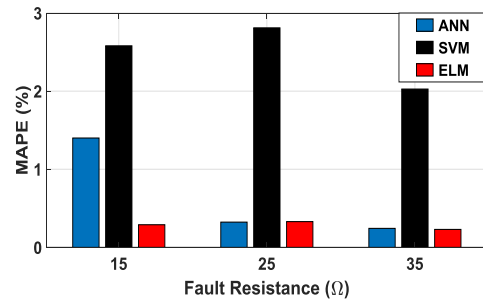
زمان لازم برای آموزش شبکه عصبی با ساختار ذکرشده حدود ۴۹ ثانیه است که نسبت به دو ابزار دیگر کمترین فرآیند آموزش را دارد. در صورتی که تعداد نرون‌های لایه پنهان بیشتر شود، زمان آموزش شبکه عصبی افزایش می‌یابد و ممکن است به چندین دقیقه نیز برسد. در ماشین بردار پشتیبان از تابع کرنل خطی استفاده شده است. فرآیند آموزش آن ۴۷/۵ ثانیه است که به مراتب کم‌تر از ماشین یادگیری بی‌نهایت است.

مدت زمان تخمین مکان خطا از زمان اعمال داده‌های ورودی تا تعیین محل خطا با ابزارهای هوشمند محاسبه می‌شود. این زمان برای شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و ماشین یادگیری بی‌نهایت به ترتیب برابر با ۸۰، ۳۵ و ۱۱ میلی‌ثانیه است؛ بنابراین، ماشین یادگیری بی‌نهایت دارای سریع‌ترین زمان اجرا است. با توجه به اینکه یک سیکل از سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده برای استخراج بردار ویژگی به کار گرفته می‌شود و ۵ میلی‌ثانیه برای آنالیز تبدیل فوریه نیاز است؛ بنابراین، زمان لازم برای تشخیص مکان خطا با به‌کارگیری ماشین یادگیری بی‌نهایت حداکثر ۳۶ میلی‌ثانیه از لحظه رخداد خطا خواهد بود.

جدول (۴): مقایسه عملکرد ابزارهای رگرسیون به کار گرفته

شده از نظر پارامترهای تنظیم‌شونده

نوع ابزار رگرسیون	ANN	SVM	ELM
تعداد لایه‌ها: ۳ تعداد نرون‌های لایه‌های پنهان: ۱۰-۱۵-۳۰ تابع تحریک: سیگموئید - لگاریتمی	تعداد لایه‌ها: ۳ تعداد نرون‌های لایه‌های پنهان: ۱۰-۱۵-۳۰ تابع تحریک: سیگموئید - لگاریتمی	تابع کرنل: خطی $\sigma=0.3718$ Bias=0.052	تعداد نرون‌های لایه پنهان: ۲۷ تابع محرک: سیگموئید
زمان آموزش (ثانیه)	۴۹	۴۷/۵	۰/۰۳۱
زمان تخمین (میلی‌ثانیه)	۸۰	۳۵	۱۱



شکل (۱۰): نمودار درصد میانگین خطا بر حسب مقاومت برای مقاومت‌هایی که در فرآیند آموزش استفاده نشده‌اند

در دسته اول، نتایج مکان‌یابی خطا برای ماشین یادگیری بی‌نهایت و شبکه‌های عصبی مصنوعی تقریباً یکسان بوده و در دسته دوم که مرتبط با مقاومت خطاهایی است و در فرآیند آموزش شرکت نداشته‌اند، ماشین یادگیری بی‌نهایت نتایج بهتری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی ارائه داده است. درحقیقت با توجه به اینکه مقدار مقاومت خطا نامشخص است، استفاده از ماشین یادگیری بی‌نهایت برای مکان‌یابی خطا دارای قابلیت اطمینان و دقت بالاتری خواهد بود. به عبارت دیگر، نتایج به‌دست‌آمده اثبات می‌کنند قدرت تعمیم‌پذیری ماشین یادگیری بی‌نهایت نسبت به دو روش دیگر بهتر است. علاوه بر این، ابزارهای هوشمند به کار گرفته شده را می‌توان از نظر پارامترهای تنظیم‌شونده، زمان لازم برای آموزش و زمان تخمین با یکدیگر مقایسه کرد. نتایج این مقایسه در جدول (۴) برای هر یک از ابزارهای هوشمند به کار گرفته شده، ارائه شده‌اند. زمان لازم برای آموزش ماشین یادگیری بی‌نهایت با وجود ۲۷ نرون در لایه پنهان به همراه تابع محرک از نوع سیگموئید حدود ۰/۰۳۱ ثانیه است که از دو روش دیگر بسیار کمتر است. با توجه به اینکه آموزش ماشین یادگیری بی‌نهایت طی یک مرحله صورت می‌گیرد، این زمان حتی با افزایش تعداد نرون‌های لایه پنهان تغییر زیادی نمی‌کند و همچنان فرآیند آموزش، بسیار سریع انجام می‌شود. پارامترهای تنظیم‌شونده شبکه عصبی به کار گرفته شده به منظور افزایش میزان دقت و کارایی آن با روش سعی و خطا بهینه شده‌اند. این شبکه بهینه دارای سه لایه با تعداد نرون‌های ۱۰، ۱۵ و ۳۰ است. همچنین، تابع محرک در هر سه لایه از نوع سیگموئید لگاریتمی است.

۶- بررسی تأثیر زمان وقوع خطا بر دقت

الگوریتم‌های هوشمند

با توجه به اینکه لحظه وقوع خطا می‌تواند روی دامنه جریان خطا و دقت الگوریتم‌های هوشمند تأثیرگذار باشد، در این بخش با توجه به جدول (۵)، عملکرد الگوریتم‌ها برای زمان‌های متفاوت وقوع خطا که یک سیکل را به‌طور کامل شامل می‌شوند، بررسی شده است.

با توجه به جدول (۵)، زمانی که خطا به همراه مقاومت خطا باشد، زمان وقوع خطا بر دقت الگوریتم‌ها تأثیر ناچیزی دارد؛ به‌طوری‌که برای مقاومت ۱۰ اهم

بیشترین مقدار درصد خطا در زمان وقوع ۰/۱۱۵ ثانیه، ۲/۷ است که مقدار این درصد خطا در زمان وقوع خطای ۰/۱ ثانیه ۲/۶۱ بوده است. برای مقاومت خطای صفر اهم مقدار DC جریان خطا تأثیری بیشتری را بر دقت الگوریتم گذاشته است؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار درصد خطا در زمان وقوع خطای ۰/۱۱۵ ثانیه، ۳/۲ است که این مقدار درصد خطا در ۰/۱ ثانیه ۲/۶۵ بوده است. درنهایت، با توجه به جدول (۵)، زمان وقوع خطا بر دقت الگوریتم‌های هوشمند تأثیرگذار بوده است؛ در عین حال همچنان الگوریتم‌ها نتایج پذیرفتنی را ارائه می‌دهند.

جدول (۵) نتایج حاصل از تخمین مکان‌یابی خطا به کمک الگوریتم‌های هوشمند در زمان‌های متفاوت وقوع خطا

زمان وقوع خطا (S)			زمان وقوع خطا (S)			زمان وقوع خطا (S)			زمان وقوع خطا (S)			محل خطا (m)	مقاومت خطا (Ω)
۰/۱۲			۰/۱۱۵			۰/۱۱			۰/۱۰۵				
ELM	SVM	ANN	ELM	SVM	ANN	ELM	SVM	ANN	ELM	SVM	ANN		
۳۶۶۳	۳۸۰۰	۳۴۷۱	۳۸۲۰	۳۷۲۸	۳۴۲۷	۳۶۹۷	۳۷۸۳	۳۴۳۵	۳۷۲۵	۳۷۹۸	۳۴۲۳	۳۵۰۰	۰
۶۴۴۷	۶۵۲۴	۶۵۵۹	۶۵۹۰	۶۵۹۸	۶۶۱۱	۶۴۸۳	۶۵۸۰	۶۵۸۴	۶۵۹۸	۶۶۱۰	۶۶۰۱	۶۵۰۰	
۹۳۸۴	۹۵۶۰	۹۵۹۹	۹۲۸۹	۹۴۲۵	۹۶۸۳	۹۳۰۱	۹۴۲۸	۹۷۰۱	۹۳۰۱	۹۴۲۸	۹۷۰۱	۹۵۰۰	
۳۴۴۵	۳۷۶۱	۳۴۱۲	۳۴۳۶	۳۷۷۰	۳۳۹۰	۳۴۳۹	۳۷۶۱	۳۴۰۸	۳۴۳۹	۳۷۶۹	۳۴۱۶	۳۵۰۰	۱۰
۶۴۵۶	۶۴۸۳	۶۵۱۱	۶۴۵۸	۶۴۸۹	۶۵۳۱	۶۴۵۶	۶۴۸۳	۶۵۱۱	۶۴۵۶	۶۴۸۳	۶۵۳۱	۶۵۰۰	
۹۵۳۱	۹۸۱۰	۹۵۲۵	۹۵۳۹	۹۵۳۵	۹۵۷۰	۹۵۳۰	۹۸۰۷	۹۵۲۵	۹۵۳۰	۹۵۳۵	۹۵۷۰	۹۵۰۰	

آمده است. با توجه به نتایج حاصله که نشان‌دهنده برتری دسته اول نسبت به دسته دوم است، می‌توان به تأثیر سیگنال‌های ولتاژ بر دقت الگوریتم‌های هوشمند پی برد. مقدار خطا برای حالتی که نمونه‌برداری از ولتاژ و جریان‌های ابتدا و انتهای خط انجام شده، برای شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و ماشین یادگیری بی‌نهایت به ترتیب برابر با ۰/۶۹، ۱/۹۱ و ۰/۳۵ است. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود استفاده از سیگنال‌های ولتاژ و جریان هسته و غلاف از دو طرف خط، دقت بالاتری نسبت به حالات دیگر نمونه‌برداری و عملکرد بهتری برای حفاظت خطوط کابلی دارد.

۷- تأثیر سیگنال‌های نمونه‌برداری شده بر

دقت الگوریتم‌های هوشمند

دقت ابزارهای هوشمند وابسته به بردارهای آموزشی در نظر گرفته شده برای آنها است. در این بخش، مکان‌یابی خطا با دو دسته بردار آموزشی برای ابزارهای هوشمند انجام شده است. در دسته اول، فقط از سیگنال‌های ولتاژ و جریان ابتدای خط نمونه‌برداری شده و در دسته دوم، فقط از سیگنال‌های جریان هسته و غلاف ابتدا و انتهای خط استفاده شده است. نتایج حاصل از مکان‌یابی خطا در این دو دسته و برای مقاومت خطاهای ۱۰، ۱۵ و ۳۰ اهم در جدول (۶) ارائه شده‌اند. در دسته اول، میانگین درصد خطا برای شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و ماشین یادگیری بی‌نهایت به ترتیب ۱/۰۳، ۳/۷۹ و ۱/۰۲ است. برای دسته دوم نیز به ترتیب ۱/۹۰، ۳/۸۹ و ۱/۲۱ به دست

مقاومت خط‌های ۱۰، ۱۵ و ۳۰ اهم برای فواصل مختلف در جدول (۷) ارائه شده‌اند.

اگر پست شماره یک به‌عنوان بار و جهت شارش جریان از سمت پست دو به یک باشد، باید پست شماره دو برای الگوریتم پیشنهادی، مرجع در نظر گرفته شود و نتایج خروجی آن از کل طول خط کم شوند تا نتایج به‌دست‌آمده برای آن در هر دو حالت شارش توان صحیح باشند. با توجه به در اختیار بودن ولتاژهای دو طرف، یافتن مرجع مناسب بسیار ساده است. با توجه به جدول (۷)، نتایج حاصل بیان‌کننده دقت زیاد ماشین یادگیری بی‌نهایت در مکان‌یابی خط در این سناریو است؛ به‌طوری‌که میانگین درصد خطای به‌دست‌آمده کمتر از ۰/۳۱ درصد است

۸- بررسی تأثیر دو سو تغذیه‌بودن سیستم بر

الگوریتم مکان‌یابی خطای ارائه‌شده

با توجه به اینکه در خطوط ولتاژ بالا امکان شارش توان در هر دو جهت وجود دارد، الگوریتم‌های ارائه‌شده برای مکان‌یابی خطا باید توانایی عملکرد در هر دو حالت عبور توان را داشته باشند. در مطالعات انجام‌شده در بخش‌های پیشین به‌منظور جلوگیری از بزرگ‌شدن ابعاد ماتریس آموزشی و بهبود قابلیت تعمیم‌پذیری ماشین‌های یادگیری و کاهش زمان آموزش به‌طور ضمنی فرض شده که باس یک به‌عنوان منبع و باس دو به‌عنوان بار است. در این بخش، عملکرد ماشین یادگیری بی‌نهایت در حالت پست شماره یک به‌عنوان بار و پست شماره دو به‌عنوان منبع تغذیه بررسی شده است. نتایج مکان‌یابی خطا برای

جدول (۶) نتایج حاصل از تخمین مکان‌یابی خطا به کمک الگوریتم‌های هوشمند در دسته‌های متفاوت آموزشی

درصد خطا دسته دوم			خروجی دسته دوم (m)			درصد خطا دسته اول			خروجی دسته اول (m)			محل خطا (m)	مقاومت خطا (Ω)
ELM	SVM	ANN	ELM	SVM	ANN	ELM	SVM	ANN	ELM	SVM	ANN		
۱/۰۲	۳/۲۲	۲/۲۴	۳۶۰۲	۳۱۷۸	۳۷۲۴	۲/۰۲	۵/۴۱	۱/۷۶	۳۲۹۸	۲۹۵۹	۳۶۷۶	۳۵۰۰	۱۰
۰/۷۶	۲/۰۳	۰/۸۳	۶۵۷۶	۶۲۹۷	۶۵۸۳	۱/۰۱	۱/۵۴	۰/۴۵	۶۶۰۱	۶۶۵۴	۶۵۴۵	۶۵۰۰	
۱/۴۳	۳/۱۸	۱/۳۸	۹۶۴۳	۹۱۸۲	۹۶۳۸	۰/۹۳	۴/۳۴	۰/۹۸	۹۵۹۳	۹۰۶۶	۹۵۹۸	۹۵۰۰	
۱/۶۸	۲/۳۲	۱/۸۷	۲۸۳۲	۳۲۳۲	۳۱۸۷	۰/۸۳	۱/۵۵	۰/۶۴	۳۰۸۳	۳۱۵۵	۳۰۶۴	۳۰۰۰	۱۵
۱/۸۸	۵/۲۳	۳/۰۲	۶۱۸۸	۶۵۲۳	۶۳۰۲	۱/۱۶	۴/۲۳	۲/۰۲	۵۸۸۴	۶۴۲۳	۵۷۹۸	۶۰۰۰	
۲/۳۳	۶/۰۳	۴/۰۳	۹۲۳۳	۸۳۹۷	۹۴۰۳	۰/۹۱	۶/۶۵	۳/۳۴	۹۰۹۱	۹۶۶۵	۹۳۳۴	۹۰۰۰	
۰/۷۸	۴/۳۳	۱/۸۵	۳۴۲۲	۳۰۶۷	۳۶۸۵	۰/۹۸	۳/۱۲	۲/۰۲	۳۵۹۸	۳۸۱۲	۳۷۰۲	۳۵۰۰	۳۰
۰/۵۶	۵/۲۳	۱/۰۵	۶۵۵۶	۵۹۷۷	۶۳۹۵	۰/۸۵	۴/۸۶	۱/۸۱	۶۴۱۵	۶۰۱۴	۶۳۱۹	۶۵۰۰	
۰/۴۸	۳/۴۴	۰/۸۸	۹۵۴۸	۹۸۴۴	۹۵۸۸	۰/۵۶	۲/۴۵	۱/۶۵	۹۵۵۶	۹۷۴۵	۹۶۶۵	۹۵۰۰	

جدول (۷) نتایج حاصل از تخمین مکان‌یابی خطا با در نظر گرفتن پست شماره یک به‌عنوان بار

درصد خطا	خروجی الگوریتم (m)	محل خطا (m)	مقاومت خطا (Ω)
۰/۵۲	۳۴۴۸	۳۵۰۰	۱۰
۰/۴۸	۶۵۴۸	۶۵۰۰	
۰/۴۳	۹۵۴۳	۹۵۰۰	
۰/۲۸	۳۰۲۸	۳۰۰۰	۱۵
۰/۱۳	۶۰۱۳	۶۰۰۰	
۰/۴۳	۸۹۵۷	۹۰۰۰	
۰/۰۹	۳۰۰۹	۳۰۰۰	۳۵
۰/۲۹	۵۹۷۱	۶۰۰۰	
۰/۱۲	۹۰۱۲	۹۰۰۰	

$$l = 350 \text{ cm} \quad \tau = 1 \text{ ms}$$

حال با اندازه‌گیری جریان قوس و بلوک‌های منطقی شبیه‌ساز PSCAD/EMTDC در شکل (۱۱)، مقاومت خطای وابسته به زمان به دست می‌آید و به کمک یک مقاومت متغیر در سیستم شبیه‌سازی شده مدل می‌شود. برای مکان‌یابی خطای قوسدار، ابتدا فرایند آموزش ماشین یادگیری بی‌نهایت با استخراج بردارهای مشخص شده در شکل (۴) برای فواصل ۲، ۴، ۶ و ۸ کیلومتری، تکمیل تر می‌شود، سپس برای بررسی عملکرد صحیح الگوریتم هوشمند، مکان خطای قوسدار برای فواصل ۱، ۳، ۶ و ۹ کیلومتری از ابتدای خط تعیین می‌شود. نتایج حاصل در جدول (۸) ارائه شده‌اند. بیشترین درصد خطا ۱/۷۲ است که در یک کیلومتری از ابتدای خط اتفاق افتاده است. دقت مکان‌یابی خطای قوسدار نسبت به خطای هسته به غلاف بیشتر بوده است؛ ولی همچنان نتایج پذیرفتنی‌اند.

جدول (۸) نتایج حاصل از تخمین مکان خطای قوسدار

درصد خطا	محل خط (m)	خروجی الگوریتم (m)
۱/۷۲	۱۰۰۰	۱۱۷۲
۱/۳۸	۳۰۰۰	۳۱۳۸
۰/۸۹	۶۰۰۰	۶۰۸۹
۱/۱۷	۹۰۰۰	۹۱۱۷

۹- بررسی عملکرد ماشین یادگیری

بی‌نهایت در خطای قوسدار

بسیاری از خطاهای رخ داده در سیستم قدرت همراه با قوس‌های الکتریکی است. در خطای قوسدار مقدار مقاومت خطا به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. برای بررسی رفتار دینامیکی مقاومت خطای متغیر با زمان به هنگام خطای قوسدار از مدل دینامیکی زیر استفاده می‌شود [۱۸]:

$$R_{arc} = \frac{1}{g} \quad (9)$$

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} (G - g) \quad (10)$$

$$G = \frac{|i_{arc}|}{V_{st}} \quad (11)$$

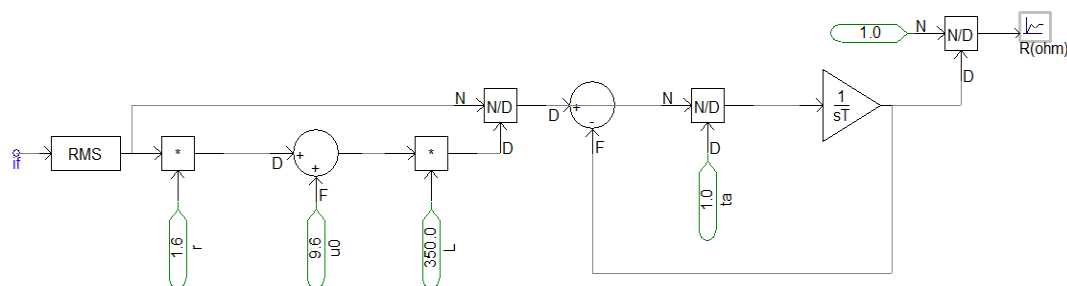
R_{arc} مقدار مقاومت خطای متغیر با زمان، g هدایت الکتریکی متغیر با زمان، i_{arc} جریان قوس، G هدایت قوس ایستا، V_{st} ولتاژ قوس ایستا و τ ثابت زمانی قوس هستند. ولتاژ قوس ایستا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_{st} = (u_0 + r \cdot |i_{arc}|)l \quad (12)$$

که در این رابطه u_0 ولتاژ ثابت در طول قوس، r مؤلفه مقاومت در طول قوس و l طول قوس هستند که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [۱۸]:

$$u_0 = 9/6 \text{ V/cm}$$

$$r = 1/6 \text{ m}\Omega / \text{cm}$$



شکل (۱۱): بلوک دیاگرام‌های مدل‌سازی شده در PSCAD/EMTDC برای محاسبه مقاومت خطای قوسدار

کابل‌های فشارقوی و فشارمتوسط، مقایسه‌ای بین نتایج گزارش شده در مقالات در جدول (۹) ارائه شده است. در این بخش، برخی از پژوهش‌های انجام شده از نظر نوع ابزار

۱۰- مقایسه نتایج

به منظور نشان دادن برتری روش پیشنهادی نسبت به برخی از روش‌های ارائه شده در زمینه مکان‌یابی خطا در

با مختل مواجه شود که این امر باعث کاهش قابلیت اطمینان این روش‌ها می‌شود [۹،۱۰]. مکان‌یابی خطا به کمک امواج سیار با صرف‌نظر کردن از فرکانس نمونه‌برداری بالایی که نیاز دارند، برای خطوط کابلی با غلاف همبندی شده به صورت همگن مناسب است؛ اما این روش‌ها برای همبندی متقاطع، دارای پیچیدگی و مواجه با چالش‌هایی در عملکرد خود خواهند شد [۱۳].

به کار گرفته شده، بیشترین درصد خطای گزارش شده، اطلاعات مورد نیاز برای مکان‌یابی، ساختار کابل و در نهایت مشکلات مربوط به پیاده‌سازی الگوریتم‌های ارائه شده بررسی شده‌اند.

روش‌های تحلیلی در مکان‌یابی خطا به دلیل وابستگی به پارامترهای کابل، شامل معادلات غیرخطی اند که برای حل به الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر تکرار نیاز دارند که ممکن است دچار ناهمگرایی شوند و فرآیند مکان‌یابی

جدول (۹) مقایسه نتایج بین مراجع مختلف

مرجع	نوع ابزار	بیشترین درصد خطا (%)	اطلاعات مورد نیاز	ساختار کابل	مشکلات
[۹]	تحلیلی	۸	یک سمت خط	ساختار کابل به صورت دقیق با لحاظ کردن غلاف و مدل فشرده خط در نظر گرفته شده است	۱- مشکل ناهمگرایی الگوریتم ریاضیاتی ۲- درصد خطای بسیار زیاد در خطاهای نزدیک به پایانه‌ها
[۱۰]	تحلیلی	۲/۶۲	دو سمت خط	ساختار کابل به صورت فشرده در نظر گرفته شده و خطای فاز به زمین مطالعه شده است	۱- نیاز به تجهیزات و خط کمکی ۲- وابستگی جواب به حدس اولیه
[۱۳]	امواج سیار	۸/۱۷۵	دو سمت خط	ساختار کابل به صورت فشرده در نظر گرفته شده و خطای فاز به زمین مطالعه شده است	۱- فرکانس نمونه‌برداری بالا ۲- نیاز به کانال مخابراتی ۳- تأثیر غلاف در ساختار کابل لحاظ نشده است
[۱۴]	ELM	۰/۳	یک سمت خط	کابل مطالعه شده برای سیستم توزیع و به صورت فشرده در نظر گرفته شده است	تأثیر غلاف در ساختار کابل لحاظ نشده است
[۱۵]	ANN	۱/۲۱	یک سمت خط	ساختار کابل به صورت فشرده در نظر گرفته شده و خطای فاز به زمین مطالعه شده است	نتایج فقط برای مقاومت خطای ۲ اهم بررسی شده‌اند و تأثیر مقاومت خطا بر الگوریتم در نظر گرفته نشده است
[۱۶]	ANN	۶۲	یک سمت خط	ساختار کابل به صورت فشرده در نظر گرفته شده و خطای فاز به زمین مطالعه شده است	دارای خطای بسیار زیاد در ابتدای خط
[۱۷]	SVM-TT	۱/۴۸	یک سمت خط	ساختار کابل به صورت فشرده در نظر گرفته شده و خطای فاز به زمین مطالعه شده است	۱- در برخی موارد، بخش معیوب قابل شناسایی نیست و روش مکان‌یابی خطا ناموفق است ۲- تأثیر غلاف در ساختار کابل لحاظ نشده است
[۱۸]	SVM-Wavelet	۲/۹۵	یک سمت خط	ساختار کابل به صورت فشرده در نظر گرفته شده و خطای فاز به زمین مطالعه شده است	فرکانس نمونه‌برداری بالا
[۱۹]	ANN	۰/۰۵	یک سمت خط	غلاف در ساختار کابل در نظر گرفته شده و تأثیر آن لحاظ شده است	۱- حساسیت بالا به مقاومت خطاهای بیش از ۱۰ اهم ۲- بررسی نشدن خطای اتصال هسته به غلاف
الگوریتم پیشنهادی	ELM	۱/۶۳	دو سمت خط	ساختار کابل به صورت دقیق در نظر گرفته شده است	نیاز به کانال مخابراتی

رفع خطا خواهد شد. در این مقاله، به کمک ماشین یادگیری بی‌نهایت و با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان‌ها در ابتدا و انتهای خط، مکان‌یابی خطا انجام شده است. همچنین، برای انجام مطالعات مکان‌یابی خطا، ساختار کابل به‌طور دقیق، مدل و متداول‌ترین نوع خطا در آن بررسی شده است. در الگوریتم ارائه‌شده با توجه به اینکه سیستم حفاظتی متداول خطوط کابلی، حفاظت دیفرانسیل است، از کانال مخابراتی برای استخراج اطلاعات هر دو پایانه خط استفاده شده است تا دقت و قابلیت اطمینان الگوریتم مکان‌یابی برای شرایط مختلف افزایش داده شود.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد ماشین یادگیری بی‌نهایت دارای عملکرد بهتری از نظر دقت و سرعت تشخیص در تعیین مکان خطا است. ماشین یادگیری بی‌نهایت دارای پارامترهای کمتر و سرعت یادگیری بیشتری نسبت به شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان است. دقت تخمین مکان خطا برای دو روش شبکه عصبی مصنوعی و ماشین یادگیری بی‌نهایت با در نظر گرفتن مقاومت خطاهای استفاده‌شده در آموزش شبکه عصبی، مشابه و نتایج ماشین بردار پشتیبان همراه با دقت کمتری نسبت به دو روش فوق است. برای مقاومت خطاهای به کار گرفته نشده در آموزش ابزارهای هوشمند، روش مبتنی بر ماشین یادگیری بی‌نهایت، نتایج بهتری را نسبت به دو روش دیگر ارائه داده و دارای حساسیت کمتری به مقاومت است و می‌توان از آن به‌طور مؤثری در مکان‌یابی خطاهای کابل‌های فشارقوی استفاده کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی

بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/390066/99

بسیار سپاسگزاری می‌کنند.

مراجع

- [1] D. A. Tziouvaras, "Protection of High-Voltage AC Cables", IEEE conference, 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, USA, June 2006.
- [2] N. Egthardarpour, M. Tavakoli, F. Faramarzi, Potimal selection of cable arrangement and sheath bonding to reduce losses and increase cable life,

با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، به نظر می‌رسد یکی از بهترین روش‌های مکان‌یابی خطا، استفاده از الگوریتم‌های هوشمندی است که مستقل از پارامترهای کابل بوده‌اند و قابلیت اجرا برای شرایط مختلف و انواع همبندی غلاف کابل را دارند. معیار بیشترین درصد خطا به‌تنهایی نمی‌تواند برتری یک روش را نشان دهد. مرجع [۱۹] بیشترین درصد خطا را ۰/۰۵ گزارش کرده است؛ درحالی‌که این پژوهش مقاومت خطاهای بیش از ۱۰ اهم را که تأثیر بسزایی در درصد خطا دارد، بررسی نکرده است.

با توجه به اینکه کابل‌های فشارقوی و فشار متوسط در ساختار خود علاوه‌بر هسته دارای غلاف نیز هستند، در فرآیند مکان‌یابی خطا باید تأثیر غلاف لحاظ شود. با توجه به جدول (۹)، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در سطح ولتاژ فشارقوی و فشار متوسط، از غلاف و آثار آن صرف‌نظر کرده و فقط مراجع [۹، ۱۹] مدل کابل را به‌صورت دقیق در نظر گرفته‌اند. مرجع [۱۴] نیز مکان‌یابی خطا را برای سیستم کابلی شبکه توزیع که دارای ساختاری متفاوت است، به کمک ماشین بردار بی‌نهایت انجام داده و نتایج پذیرفتنی ارائه کرده است.

در این پژوهش، مدل دقیق و اثرات غلاف آن در آموزش ماشین یادگیری بی‌نهایت در نظر گرفته شده است تا مدل‌سازی و مکان‌یابی خطا در خطوط کابلی جنبه عملی‌تری داشته باشد. الگوریتم پیشنهادی در کنار حفاظت دیفرانسیل با اندازه‌گیری اطلاعات دو سمت خط به کار برده می‌شود. در واقع با در نظر گرفتن اطلاعات دو سمت خط سعی شده است نقاط ضعف سایر مراجع پوشش داده شود و قابلیت اطمینان الگوریتم افزایش پیدا کند تا در شرایط مختلف، عملکرد صحیحی داشته باشد.

۱۱- نتیجه‌گیری

تعمیرات کابل‌های فشارقوی در سیستم‌های قدرت، دارای روندی طولانی و پرهزینه است. هزینه نصب خطوط کابلی حدود ۱۰ تا ۱۵ برابر و مدت زمان خط‌یابی و رفع آن حدود ۳ تا ۵ برابر خط هوایی است. مکان‌یابی صحیح باعث افزایش قابلیت اطمینان شبکه و سرعت‌بخشیدن به فرآیند

- Cable", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol.19, No.5, August 2018.
- [16] H. Khorashadi-Zadeh, M. R. Aghaebrahimi, "A Novel Approach to Fault Classification and Fault Location for Medium Voltage Cables Based on Artificial Neural Network", *International Journal of Computational Intelligence*, Vol.2, No.1, pp. 90-93, January 2006.
- [17] O. A. Gashteroodkhani, M. Majidi, M. Etezadi-Amoli, A. F. Nematollahi, B. Vahidi, "A Hybrid SVM-TT Transform-based Method for Fault Location in Hybrid Transmission Lines with Underground Cables", *Electric Power System Research*, Vol.170, pp.205-214, May 2019.
- [18] H. Livani, C. Y. Evrenosoglu "A Machine Learning and Wavelet-Based Fault Location Method for Hybrid Transmission Lines", *IEEE Trans Smartgrid*, Vol.5, No.1, January 2014.
- [19] H.zadeh-khorashadi, s. naveh-Hosseini, "An Accurate Fault Locator for Cable Transmission Using ANN", *Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No.04CH37521)*, Dubrovnik Croatia, November 2004.
- [20] C. Apisit, C. Pothisarn, A. Ngaopitakkul, "An Application of Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Fault Locations in Underground Cable", *Third International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications*, Taiwan October 2012.
- [21] F. Babaei-Roudi, A.A. Abdoo, "Detection of internal fault from external fault and inrush current in power transformers based on combination of VMD and ELM", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 65-78, 2018.
- [22] G. B. Huang, Q. Y. Zhu, C. K. Siew, "Extreme Learning Machine: Theory and Applications", *Neurocomputing*, Vol.70, No.1-3, pp.489-501, 2006.
- [23] A. A. Awelewa, P. O. Mbamaluikem, I. A. Samuel, "Artificial Neural Networks for Intelligent Fault Location on the 33-Kv Nigeria Transmission Line", *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, Vol.54, No.3, pp. 147-155, December 2017.
- [24] "Short Circuit Protection of Circuits with Mixed Conductor Technologies in Transmission Networks", *CIGRE Publications*, Pages 38-185, 2013.
- [25] J. G. Hubertus, I. Voloh, B. Kasztenny, "Applying Distance Protection to Cable Circuits", *57th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2004.
- [26] Z. Xu and T. S. Sidhu, "Power Cable Protection in Transmission Systems", *University of Western Ontario*, 2008.
- [27] T. Aloui, F. B. Amar, H. H. Abdallah, "Modeling and simulation of a HV shielded underground three-phase cable in both normal and default states: Application to the 150 kV connection between Taparoura, Sidimansour and Tyna substations in Sfax-Tunisia", *Electric Power System Research*, Vol.141, pp.91-99, December 2016.
- 23rd International Power System Conference, Thran, Iran, 15 Aug. 2008.
- [3] X. H. Wang, Y. H. Song, C. K. Jung, J. B. Lee, "Tackling Sheath Problems: Latest Research Development in Solving Operational Sheath Problems in Underground Power Transmission Cables", *Electric power system research*, Vol.77, No.10, pp.1449-1457, August 2007.
- [4] "L90 Line Differential Relay UR Series Instruction Manual," GE Multilin Company, Section 8.1.18, 2006.
- [5] F. Guo, G. Zhu, X. Dong, "A Method of 20 kV Cable Line Fault Location Based on Sheath Grounding Current", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, USA*, December 2015
- [6] C. W. Liu, T. C. Lin, C. S. Yu, J. Z. Yang, "Fault Location Technique for Two-terminal Multi-Section Compound Transmission Lines Using Synchronized Phasor Measurements", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.3, No.1, pp.113-121, March 2012.
- [7] X. Yang, M. S. Choi, S. J. Lee, C. W. Ten, S. I. Lim, "Fault Location for Underground Power Cable Using Distributed Parameter Approach", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.23, No.4, pp.1809-1816, November 2008.
- [8] E. S. T. Eldin, M. A. Aziz, D. K. Ibrahim, M. Gilany, "Fault Location Scheme for Combined Overhead Line with Underground Power Cable", *Electric Power Systems Research*, Vol. 76, No.11, pp.928-935, July 2006.
- [9] Z. Xu, T. S. Sidhu, "Fault Location Method Based on Single-End Measurements for Underground Cables", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.26, No.4, pp.2845-2854, October 2011.
- [10] A. Nag, A. Yadav, A. Y. Abdelaziz, M. Pazoki, "Fault Location in Underground Cable System Using Optimization Technique", *First International Conference on Power, Control and Computing Technologies*, India, January 2020.
- [11] M. Gilany, D. K. Ibrahim, E. S. T. Eldin, "Traveling-Wave-Based Fault-Location Scheme for Multiend-aged Underground Cable System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.22, No.1, pp.82-89, January 2007.
- [12] C. K. Jung, K. H. Kim, J. B. Lee, B. Klöckl, "Wavelet and Neurofuzzy Based Fault Location for Combined Transmission Systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.29, No.6, pp.445-454, July 2007.
- [13] R. J. Hamidi, H. Livani, "Traveling-Wave-Based Fault-Location Algorithm for Hybrid Multiterminal Circuits", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.32, No.1, pp.135-144, February 2017.
- [14] P. Ray, D. Mishra, "Application of Extreme Learning Machine for Underground Cable Fault Location", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol.25, pp.3227-3247, December 2015.
- [15] P. Ray, S. R. Arya, D. P. Mishra, "Intelligence Scheme for Fault Location in a Combined Overhead Transmission Line & Underground

-
- ¹ Sheath
 - ² Single-point
 - ³ Solid bonded
 - ⁴ Cross bonded
 - ⁵ Security
 - ⁶ Sensitivity
 - ⁷ Extreme Learning Machine (ELM)
 - ⁸ Support Vector Machine (SVM)
 - ⁹ Bewley's lattice diagram
 - ¹⁰ Artificial Neural Network (ANN)
 - ¹¹ Discrete Wavelet Transform (DWT)
 - ¹² Single Layer Feed-forward Network (SLFN)
 - ¹³ Phasor Measurement Unit (PMU)
 - ¹⁴ Mean Absolute Percentage Error (MAPE)