

دسته بندی خطاهای بین - مداری در خطوط انتقال دومداره توسط الگوریتم درخت تصمیم

آرش جامه بزرگ
ajamebozorg@ee.iust.ac.ir
سید محمد شهرتاش
Shahrtash@iust.ac.ir
قطب علمی اتوماسیون و بهره برداری سیستمهای قدرت
دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده - در این مقاله روش جدیدی (DTBFC) برای دسته بندی خطاهای بین - مداری در خطوط انتقال دومداره، بر اساس الگوریتم درخت تصمیم ارایه شده است که پس از تعیین زمان دقیق وقوع خطا با استفاده از تئوری امواج گذرا، از مقادیر فازورهای جریانهای یک سمت خط به عنوان ویژگی های ورودی استفاده نموده و عمل دسته بندی خطا را انجام می دهد. جهت بررسی صحت روش پیشنهادی، شبیه سازی های مختلفی بر روی یک خط انتقال ۴۰۰ کیلو ولت انجام شده و نشان داده می شود که دقت این روش ۱۰۰ درصد می باشد، در حالی که زمان مورد نیاز برای دسته بندی خطا کمتر از یک چهارم سیکل پس از وقوع خطا است.

کلید واژه - درخت تصمیم، دسته بندی خطای بین - مداری، خط انتقال دومداره.

۱- مقدمه

مداری^۱ گفته می شود. در این حالت در صورتی که فازهای درگیر در خطا به درستی شناسایی نگردند، هر دو مدار بی برق می شود که مشکلات پایداری جدی ای را به دنبال خواهد داشت.

با وجود اهمیت بسزای این مساله، تا کنون هیچ گونه روشی در مقالات معتبر برای حل این معضل معرفی نشده و تنها یک حق انحصاری رایگان^۲ در [۱] ثبت شده است.

از سوی دیگر، با معرفی روش های تشخیص الگو و الگوریتم های محاسبات نرم، قابلیت این روش ها در حل مسایل غیر خطی و با عدم قطعیت بالا آشکار گردید. استفاده از این روش ها در دسته بندی خطاهای درون - مداری زمان های دسته بندی کوچک و دقت های نسبتا مطلوبی را در مقایسه با روش های سنتی نتیجه داده است [۲] - [۸].

مسئله مهم در روش های دسته بندی خطا، مصالحه بین مدت زمان لازم برای دسته بندی و دقت روش می باشد. به طور کلی، هر چه زمان دسته بندی کاهش یابد، تغییرات ایجاد شده در شکل موج های ولتاژ و جریان کمتر بوده و

استفاده از خطوط انتقال برق دومداره با توجه به افزایش نیاز به این انرژی، نیاز به قابلیت اطمینان بالاتر و نیز محدودیت فضا، در کنار مقرون به صرفه تر بودن آن روز به روز در حال افزایش است. اما یکی از مسایلی که در مورد بهره برداری این خطوط باید مورد توجه قرار گیرد، نیاز به حفاظت خاص این خطوط است. به دلیل مجاورت دو خط انتقال در کنار یکدیگر، این دو خط القائات متقابلی بر هم ایجاد نمایند. این القائات شامل امپدانس های القایی مثبت، منفی و صفر می باشد. به طور کلی امپدانس های القایی مثبت و منفی به دلیل تاثیر ناچیز آنها قابل صرف نظر می باشند، اما امپدانس صفر تاثیر قابل ملاحظه ای بر خط مجاور ایجاد می کند، به طوری که چشم پوشی از آن منبع تولید خطای بزرگی جهت حفاظت خط دومداره خواهد بود. به عنوان مثال، خطا در فاز a مدار اول، جریان القایی بزرگی در فاز a مدار دوم ایجاد می کند که تشخیص خط خطادار واقعی، و همچنین تعیین ناحیه واقعی خطا را دشوار می کند. اما حالت بدتر هنگامی رخ می دهد که خطایی بین یک فاز از یک مدار و فاز دیگر از مدار دوم ایجاد گردد. به این نوع خطاها، خطاهای بین -

¹ Cross-Over Faults

² Free Patent

سیستم (و یا ترکیبی خطی از آنها) نامزدهای اول جهت ویژگی‌های ورودی هستند. به همین دلیل، مراحل اول و دوم از درجه اهمیت کمتری نسبت به مرحله دسته‌بندی برخوردارند.

یکی از رویکردهای تشخیص الگو، الگوریتم درخت تصمیم می‌باشد. این رویکرد، همانند شبکه عصبی، دارای دو مرحله است: آموزش و تست. در مرحله آموزش، پس از مدل‌سازی دقیق سیستم، با دانستن خروجی مورد نظر، شبیه‌سازی‌هایی روی سیستم انجام شده و مقادیر ویژگی‌های مورد نظر با استفاده از مدل، به دست می‌آید و همراه با خروجی به الگوریتم تشکیل درخت تصمیم داده می‌شود. شمایی از یک درخت تصمیم در شکل ۱ نشان داده شده است. گره‌های داخلی (به شکل بیضی) نشان دهنده ویژگی‌های ورودی، و هر یک از شاخه‌ها نمایانگر نتیجه تست هر یک از این ویژگی‌ها می‌باشد. گره‌های انتهایی (به شکل مستطیل) نیز کلاس‌های خروجی را نشان می‌دهند. سپس، برای بالا بردن سرعت درخت و کاهش حجم آن، فرآیندی در جهت معکوس (از برگ‌های انتهایی به برگ اولیه) ویژگی‌هایی که تاثیری در تعیین نوع خروجی ندارند را حذف می‌کند. به این مرحله، هرس^۵ گفته می‌شود. در مرحله بعد، جهت تست درخت به دست آمده، شبیه‌سازی‌های جداگانه‌ای به درخت اعمال می‌شود و پاسخ آن با پاسخ مورد نظر مقایسه می‌گردد.

بر اساس معیار تقسیم‌بندی در درخت، الگوریتم‌های گوناگونی برای ساخت درخت تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به ID3، C4.5، LMT و Random Forest اشاره کرد. نکته‌ای که باید بدان توجه شود این است که انتخاب بهترین الگوریتم به طور کلی ممکن نمی‌باشد و بستگی به مسئله مورد نظر دارد.

تصمیم‌گیری نوع خطا بر این اساس دشوارتر خواهد بود و در نتیجه دقت دسته‌بندی خطا کاهش می‌یابد.

در این مقاله روشی بر اساس الگوریتم درخت تصمیم^۱ (DTBFC) برای دسته‌بندی خطاهای بین-مداری در خطوط انتقال دومداره مورد استفاده قرار گرفته است. ابتدا با استفاده از تئوری امواج گذرا، زمان دقیق رخداد خطا مشخص شده و سپس با استفاده از تبدیل فوریه نیم سیکل، فازورهای هارمونیک‌های فرد جریان‌ها تا فرکانس نوزدهم با استفاده از شکل موج آنها در پنجره اطلاعاتی متشکل از ۷ ms پیش از وقوع خطا تا ۳ ms پس از آن محاسبه شده و درخت عمل دسته‌بندی را انجام داده و نوع خطا را مشخص می‌سازد. شبیه‌سازی‌هایی شامل حالت‌های بدون خطا و دارای خطا در شرایط مختلف و محل‌های وقوع خطای مختلف با استفاده از نرم‌افزار EMTDC/PSCAD [۹] برای نشان دادن دقت روش پیشنهادی انجام گرفته است که نتایج آن در این مقاله آورده شده است.

۲- درخت تصمیم

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلف تشخیص الگو به صورت گسترده‌ای جهت حل مسایل گوناگون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به دلیل خاصیت غیرخطی مسایل جدید، افزایش بعد داده‌های ورودی و عدم قطعیت در این داده‌ها، روش‌های سنتی دیگر جوابگوی حل این مسایل در زمان‌های کوتاه و با دقت بالا نیستند. در عوض روش‌های تشخیص الگو، به ویژه رویکردهای محاسبات نرم قدرت، سرعت و دقت بالایی را از خود نشان داده‌اند.

تشخیص الگو دارای سه مرحله است: استخراج ویژگی^۳، انتخاب ویژگی^۴ و دسته‌بندی [۱۰]. در اغلب مسایل سیستم‌های قدرت، مقادیر ولتاژها و جریان‌های سه فاز

¹ Decision Tree

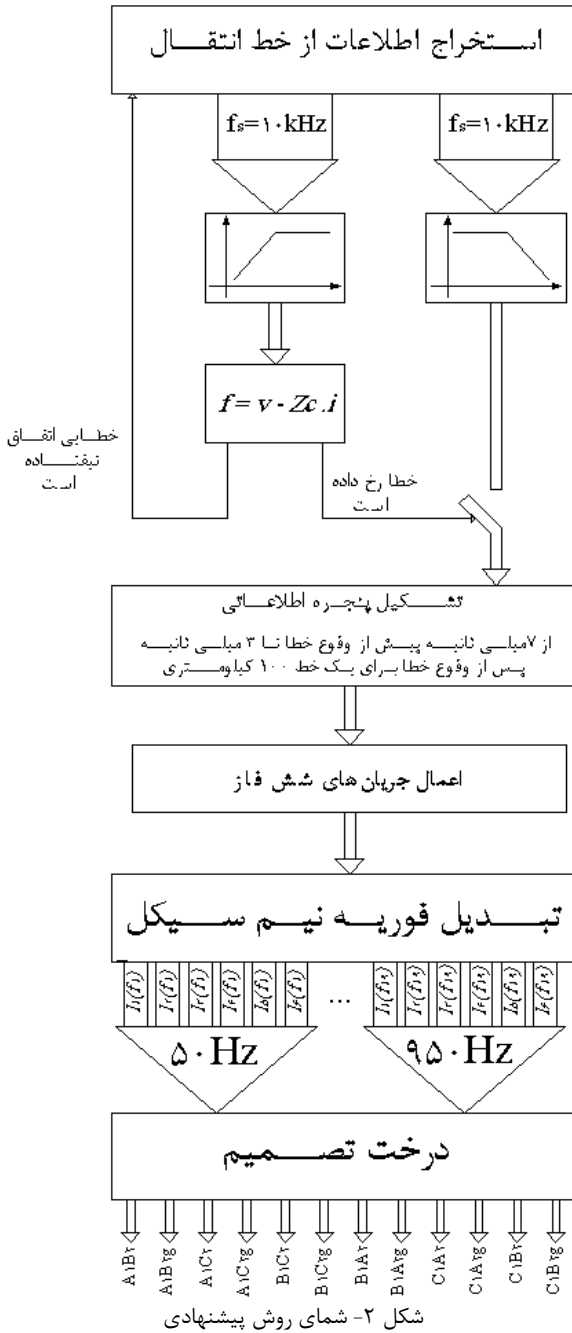
² Decision Tree Based Fault Classifier

³ Feature Extraction

⁴ Feature Selection

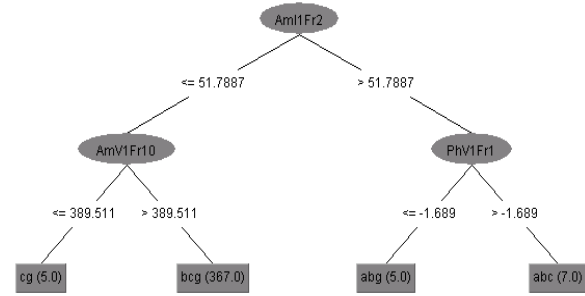
⁵ Pruning

به دلیل رسیدن موج خطا به رله در ابتدای خط، مقدار آن حداقل در یکی از فازها بسیار بزرگ خواهد بود.



شکل ۲- شمای روش پیشنهادی

با دانستن زمان دقیق خطا، پس از سپری شدن ۳ ms از وقوع آن، یک پنجره اطلاعاتی شامل مقادیر لحظه‌ای نمونه‌برداری شده از ۷ ms پیش از زمان خطا تا ۳ ms پس از وقوع آن (نیم سیکل شامل ۱۰۰ نمونه در فرکانس



شکل ۱- شمایی از یک درخت تصمیم

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در این مقاله جهت دسته‌بندی خطاهای بین-مداری در خطوط انتقال دومی‌مداره، مقادیر نمونه‌برداری شده از شش جریان ورودی در یک سمت خط با فرکانس ۱۰ kHz را به عنوان ورودی‌های درخت تصمیم استفاده می‌کند. برای اینکه این فازورها به مقدار قابل توجهی نسبت به مقدار قبل از خطا برسند، نیاز به گذشت زمانی بیش از ۳ ms می‌باشد. (این زمان پس از چندین مرحله آزمایش و خطا به دست آمده است). بنابراین باید زمان دقیق خطا مشخص گردد، تا بر اساس آن پس از گذشت ۳ ms اطلاعات به درخت داده شود. برای مشخص ساختن زمان دقیق وقوع خطا از تئوری امواج گذرا استفاده شده است. بر اساس این تئوری، پس از وقوع خطا در سیستم، موج فرکانس بالایی در دو سمت محل وقوع خطا ایجاد شده و به دو انتهای خط می‌رسد. بنابراین می‌توان با ردیابی این موج، وقوع خطا را بلافاصله مشخص نمود. بر این اساس، ابتدا مقادیر فرکانس پایین سیگنال‌های ولتاژ و جریان توسط یک فیلتر بالا گذر حذف می‌گردد (این کار را می‌توان با کم کردن مقادیر نمونه‌برداری شده از مقادیر به دست آمده در یک سیکل قبل به دست آورد) و مطابق (۱) که در آن v و i به ترتیب مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان یک فاز پس از عبور از فیلتر بالا گذر می‌باشد، مقدار f (موج فرکانس بالا) به دست می‌آید.

$$f = v - Z_c \cdot i \quad (1)$$

حال در صورتی که خطایی در سیستم به وقوع نپیوسته باشد، f دارای مقدار نسبتاً کمی است. اما پس از وقوع خطا

خطاهای مختلفی با شرایط گوناگون (مقاومت خطا، زاویه انتقال توان، زمان وقوع خطا، محل وقوع خطا) مطابق با **Error! Reference source not found.** جهت مجموعه آموزشی و جدول ۳ جهت مجموعه تست شبیه‌سازی شده‌اند.

شکل موج تغییرات جریان فازهای a دو مدار و فاز b مدار دوم در اثر یک خطای a_1b_2 در یکی از مدارها در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار EMTDC/PSCAD [۹] انجام شده و برنامه‌های کمکی‌ای نیز جهت استخراج اطلاعات، به دست آوردن فازورها و آماده کردن آن‌ها جهت اعمال به درخت تصمیم نوشته شده‌اند. در نهایت جهت ایجاد درخت تصمیم و انجام تست بر روی آن از نرم‌افزار WEKA [۱۱] استفاده شده است. جهت ساخت درخت از الگوریتم Random Forest استفاده می‌شود. این الگوریتم تعداد معینی درخت تصمیم جداگانه (در این مورد به ۱۱۰ درخت تصمیم جداگانه نیاز است که این عدد پس از چندین مرحله آزمون و خطا به دست آمده است) را با انتخاب تصادفی ۷ ویژگی از مجموعه ویژگی‌های ورودی ایجاد کرده، عمل دسته‌بندی را توسط هر یک از آنها به انجام می‌رساند. حال برای تعیین خروجی سیستم به یک بردار ورودی خاص، کلاسی که خروجی درخت‌های بیشتری باشد، انتخاب می‌گردد [۱۱]. زمان تقریبی ساخت درخت‌ها توسط این الگوریتم کمتر از ۲۰ دقیقه (برای ۷۹۲۴ داده آموزشی) است که در مقایسه با سایر روش‌های تشخیص الگو بسیار کم می‌باشد.

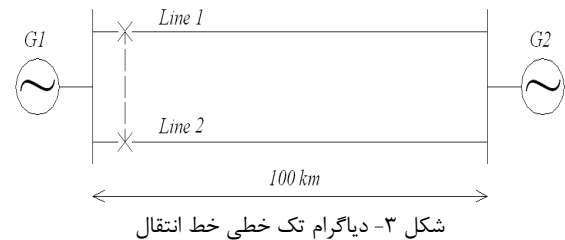
نمونه‌برداری (۱۰ kHz) تشکیل می‌شود. این مقادیر ابتدا از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده می‌شوند، و سپس توسط تبدیل فوریه نیم‌سیکل هارمونیک‌های فرد آن تا فرکانس نوزدهم (۹۵۰ هرتز در سیستم با فرکانس اصلی ۵۰ هرتز) استخراج می‌گردد. در مرحله بعد فازورهای به دست آمده به درخت تصمیم جهت تعیین نوع خطا اعمال می‌گردد. شمایی از روش پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴- آموزش و نتایج شبیه‌سازی

جهت بررسی صحت روش پیشنهادی، از یک خط انتقال ۴۰۰ کیلو ولت، ۱۰۰ کیلومتری مطابق با شکل ۳ و شکل ۴ و جدول ۱ استفاده شده است.

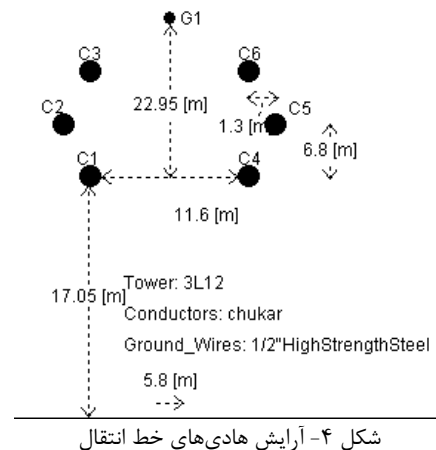
جدول ۱- پارامترهای خط انتقال

پارامترها	مقادیر
شعاع هادی	۰/۰۱۴۷۶ [m]
مقاومت DC	۰/۰۶۳۵ [Ohm/km]
میزان Sag برای همه هادی‌ها	۳/۶۵ [m]



جدول ۲- فهرست تغییرات پارامترها در مجموعه آموزشی

پارامتر	مقادیر
مقاومت خطا	۰، ۳۰، ۵۰ [Ohm]
زاویه انتقال توان	-۲۰، -۱۰، ۱۰، ۲۰ [Degree]
زمان وقوع خطا	۲۰، ۲۵، ۲۹، ۳۳، ۳۸ [ms]
محل وقوع خطا	۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۹۵ [km]
نوع خطا	۵، ۱۰، $b_1a_2g, b_1a_2, a_1c_2g, a_1c_2, a_1b_2g, a_1b_2,$ $c_1b_2g, c_1b_2, c_1a_2g, c_1a_2, b_1c_2g, b_1c_2$



تنها ۳ ms است که زمان بسیار مناسبی حتی در مقایسه با روش‌های دسته‌بندی خط‌های درون-مداری که حداقل ۴ms است و پیچیدگی کمتری را نیز دارند، می‌باشد.

جدول ۳- فهرست تغییرات پارامترها در مجموعه تست

پارامتر	مقادیر
مقاومت خطا	۰، ۲۰، ۴۰ [Ohm]
زاویه انتقال توان	-۱۵، -۷، ۷، ۱۵ [Degree]
زمان وقوع خطا	۲۲، ۲۷، ۳۰، ۳۵ [ms]
محل وقوع خطا	۱۵، ۳۵، ۶۵، ۸۵ [km]
نوع خطا	$b_1a_2g, b_1a_2, a_1c_2g, a_1c_2, a_1b_2g, a_1b_2, c_1b_2g, c_1b_2, c_1a_2g, c_1a_2, b_1c_2g, b_1c_2$

۶- مراجع

[۱] J. D. Stoupis, D. Lubkeman, R. Buettner, D. G. Hart, "Crossover Fault Classification for Power Lines with Parallel Circuits", United States Patent 6741943

[۲] S. S. Skok, S. Tesnjak, N. Vrkic, "Double-Circuit Line Adaptive Protection Considering Different Operation and Switching Modes", IEEE PES, 10-13 Oct. 2004, Vol. 2.

[۳] Y. Hu, D. Novosel, M. M. Saha, V. Leitloff, "An Adaptive Scheme for Parallel-Line Distance Protection", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 17, NO. 1, January 2002.

[۴] Ch. Chen, Ch. Liu, J. Jiang, "A New Adaptive PMU Based Protection Scheme for Transposed/Untransposed Parallel Transmission Lines", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, NO. 2, April 2002.

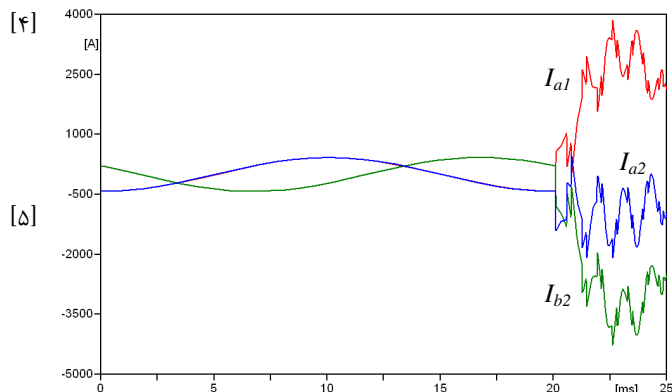
[۵] Ch. Chen, Ch. Liu, J. Jiang, "Counter-propagation Network Based Fault Classification for Double-circuit Lines", MELECON '96, 8th Mediterranean Volume 2, 13-16 May 1996.

[۶] R. K. Aggrawal, Q. Y. Xuan, R. W. Dunn, A. T. Jones, A. Bennett, "A Novel Fault Classification Technique for Double-circuit lines Based on a Combined Unsupervised/Supervised Neural Network", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, NO. 4, October 1999.

[۷] H. Khorashadi-Zadeh, "Artificial Neural Network Approach to Fault Classification for Double Circuit Transmission Line", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 21, No. 4, October 2006.

[۸] A. H. Osman, O. P. Malik, "Protection of Parallel Transmission Lines Using Wavelet Transform", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, January 2004.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تمامی ۲۸۸۴ داده تست توسط درخت تصمیم به درستی دسته‌بندی می‌گردد. با توجه به آموزش درخت با استفاده از اطلاعات دریافتی تا ۳ ms پس از وقوع خطا، زمان دسته‌بندی خطا توسط الگوریتم پیشنهادی ۳ ms می‌باشد.



شکل ۵- شکل موج جریان‌های a_1 و a_2 و b_2 در اثر خطای a_1b_2

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای دسته‌بندی خط‌های بین-مداری در خطوط انتقال دومداره ارایه گردید. در این روش، ابتدا زمان دقیق وقوع خطا توسط اندازه‌گیری موج برگشتی ولتاژ (که از محل وقوع خطا منتشر شده است) تعیین شده، ۳ ms پس از وقوع خطا، فازور هارمونیک‌های فرد جریان تا فرکانس نوزدهم محاسبه و به الگوریتم درخت تصمیم اعمال شده، سپس عمل دسته‌بندی انجام می‌گیرد. بر طبق نتایج به دست آمده، دقت روش پیشنهادی ۱۰۰ درصد می‌باشد. این در حالیست که زمان لازم جهت این دسته‌بندی



“*Electromagnetic Transient Program (EMTDC/PSCAD), and Real Time Digital Simulator (RTDS) manual*”, Manitoba HVDC Research Center, Winnipeg, Canada, 1994 release. [۹]

Y. Sheng, S. M. Rovnyak, "*Decision Tree-Based Methodology for High Impedance Fault Detection*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, April 2004. [۱۰]

<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> [۱۱]