

Immunity Improvement of a Low-Impedance Restricted Earth Fault Relay by Making its Mechanism Intelligent based on Support Vector Machine

Ali Ebadi¹, Seyyed Mehdi Hosseini², Ali Akbar Abdoos³

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

a.ebadi@stu.nit.ac.ir

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

mehdi.hosseini@nit.ac.ir

³ Dept. of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

a.abdoos@nit.ac.ir

Abstract:

Low-impedance Restricted Earth Fault (REF) relay is a unit of digital protection system of power transformers that its duty is detecting single phase to ground faults on the transformer terminal and turning it to core faults on its windings. It is a fast and sensitive type of protection schemes. However, during external fault with high magnitude fault currents and flowing magnetizing inrush current of power transformer, due to Current Transformer (CT) saturation, it may be exposed to maloperation. In this paper, immunity improvement of a REF relay is shown by making its algorithm intelligent. To do so, in the first step, major parameters used in the operating characteristic of a conventional REF relay and neutral current are chosen to be employed as the training input of Support Vector Machine (SVM) classifier. Then, a sample power system including a power transformer and related CTs is simulated by using PSCAD/EMTDC software under many different operating conditions involving internal fault, external fault, and inrush current. Finally, support vector machine is trained using obtained simulation results and after validating its accuracy, is employed as the intelligent core of the new REF protection scheme.

Keywords: Current Transformer Saturation, Restricted Earth Fault, Power Transformer, Support Vector Machine.

ارتقا ایمنی رله خطای زمین محدودشده امپدانس پایین با هوشمندسازی

الگوریتم عملکردی آن بر پایه روش ماشین بردار پشتیبان

علی عبادی^۱، سیدمهدی حسینی^{۲*}، علی اکبر عبدوس^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران

a.ebadi@stu.nit.ac.ir

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

mehdi.hosseini@nit.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران

a.abdoos@nit.ac.ir

چکیده: رله خطای زمین محدودشده امپدانس پایین، بخشی از سیستم حفاظت دیجیتال ترانسفورماتور قدرت است که وظیفه آن تشخیص خطاهای تکفاز به زمین روی ترمینال ترانسفورماتور یا خطای سیم‌پیچ به هسته آن است. این طرح حفاظتی نوعاً حساس و سریع است؛ با این حال، هنگام رخداد خطای خارجی با جریان‌های خطای بزرگ و همین‌طور طی جاری‌شدن جریان هجومی مغناطیس‌کننده ترانسفورماتور قدرت، به دلیل اشباع ترانسفورماتورهای جریان در معرض عملکرد کاذب قرار دارد. در این مقاله نشان داده شده است هوشمندسازی الگوریتم رله خطای زمین محدودشده به ارتقا ایمنی آن منجر خواهد شد. برای نیل به این هدف، در گام نخست، متغیرهای اصلی به‌کاررفته در مشخصه عملکردی رله خطای زمین محدودشده نمونه به همراه جریان هادی نول به‌عنوان پارامترهای ورودی برای آموزش روش طبقه‌بندی‌کننده ماشین بردار پشتیبان انتخاب می‌شوند. سپس سیستم قدرت نمونه شامل ترانسفورماتور قدرت واقعی و ترانسفورماتورهای جریان مربوطه با تعداد بسیار زیادی از شرایط کاری مختلف شامل خطای داخلی، خطای خارجی و جریان هجومی در محیط PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شوند. درنهایت، ماشین بردار پشتیبان با استفاده از نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌ها آموزش داده می‌شود و پس از ارزیابی دقت، به‌عنوان هسته هوشمند طرح حفاظت خطای زمین محدودشده جدید به کار گرفته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اشباع ترانسفورماتور جریان، خطای زمین محدودشده، ترانسفورماتور قدرت، ماشین بردار پشتیبان

۱- مقدمه

سریع و ایمن امری اساسی است. حفاظت دیفرانسیل فاز از پرکاربردترین روش‌های حفاظتی ترانسفورماتور در مقابل خطاهای داخلی است [۱]؛ با این حال این طرح حفاظتی در برخی خطاهای سیم‌پیچ به هسته که محل خطا نزدیک به نقطه ختنی ترانسفورماتور است یا اینکه جریان خطای زمین محدودشده باشد، دارای حساسیت کافی برای تشخیص خطا نیست [۲]. برای غلبه بر این مشکل از طرح حفاظتی خطای زمین محدودشده^۱ (REF) به‌عنوان طرح حفاظتی مکمل استفاده می‌شود [۳]. رله REF نیز نوعاً طرح حفاظت

ترانسفورماتور، عنصر حیاتی و گران‌قیمت از سیستم قدرت است؛ بنابراین تجهیز آن با طرح‌های حفاظتی مطمئن،

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۰۵/۲۷

نام نویسنده مسئول : سید مهدی حسینی

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

از چنین روشی در بسیاری از مواقع عملکرد رله را بهبود داده است؛ اما در موارد خطای خارجی که با حصول جریان بزرگ در هادی نول همراه است، کارایی ندارد. در [۱۶،۱۷] یک ناظر جهتی جدید براساس یک مقایسه گر دیجیتال فاز در حوزه زمان، برای ارتقای ایمنی رله REF پیشنهاد شده است؛ اما کارایی این روش تنها برای شرایط جریان هجومی و خطای خارجی نوع تکفاز به زمین بررسی شده و عملکرد آن در دیگر انواع خطای خارجی ارزیابی نشده است.

در این مقاله، ارتقای ایمنی رله REF با استفاده از هوشمندسازی الگوریتم آن به روش ماشین بردار پشتیبان^۳ ارائه شده است. برای این کار، در بخش ۲ عملکرد رله REF مرسوم، با تعداد بسیاری از شرایط مختلف، شبیه سازی و ارزیابی می شود. شرح دقیقی از روش پیشنهادی در بخش ۳ ارائه شده است. ارزیابی مقایسه ای نتایج حاصل از پیاده سازی روش جدید در بخش ۴ ارائه شده است و در نهایت مقاله پیش رو با بخش نتیجه گیری پایان می پذیرد.

۲- بررسی عملکرد رله REF امیدانس پایین

نمونه ای از رله REF بایاس شده که در این پژوهش بررسی شده است، دارای مشخصه نشان داده شده در شکل ۱ است. درخور ذکر است سازنده، شرح دقیق این مشخصه و تنظیمات توصیه شده آن را در [۱۸] ارائه کرده است. همان طور که در این شکل دیده می شود متغیرهای تعیین کننده در مشخصه عملکردی این رله، جریان های دیفرانسیل و مقاوم کننده هستند که به ترتیب از روابط (۱) و (۲) محاسبه می شوند. در این روابط I_a ، I_b و I_c جریان های فازها هستند و جریان هادی نول نیز با I_n نشان داده شده است.

$$I_{diff} = |I_a + I_b + I_c - I_n| \quad (1)$$

$$I_R = 0.5(\max\{|I_a|, |I_b|, |I_c|\} + |I_n|) \quad (2)$$

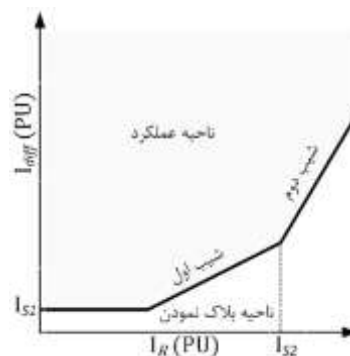
برای ارزیابی عملکرد رله مذکور، سیستم قدرت نشان داده شده در شکل (۲) انتخاب شده است که شامل ترانسفورماتور قدرت ۲۳۰/۶۳ کیلو ولتسی و ترانسفورماتورهای جریان و زمین است. برخی مشخصات ترانسفورماتورهای مذکور در بخش ضمایم ارائه شده اند.

دیفرانسیلی محسوب می شود که وظیفه آن تشخیص خطاهای تکفاز به زمین روی ترمینال ترانسفورماتور یا خطای سیم پیچ به هسته آن است [۴]. این رله برای حفاظت از سیم پیچ با اتصال ستاره زمین شده استفاده می شود؛ با این حال اگر ترانسفورماتور زمین، بین سیم پیچ با اتصال مثلث ترانسفورماتور قدرت و ترانسفورماتورهای جریان^۲ (CT) نصب شده باشد، رله REF برای حفاظت از سیم پیچ مثلث نیز به کارگیری می شود [۵]؛ البته باید ذکر کرد در صورت عبور جریان های خطای خارجی با دامنه بزرگ و همین طور هنگام جاری شدن جریان های هجومی مغناطیس کننده^۳ ترانسفورماتور قدرت که نوعاً شامل مؤلفه DC میراثونده کند است، وقوع اشباع شدید ترانسفورماتورهای جریان و در نتیجه عملکرد نابجای رله REF محتمل است [۶،۷].

استفاده از طرح حفاظت خطای زمین محدود شده نوع امیدانس بالا سطح معینی از ایمنی در برابر اشباع ترانسفورماتورهای جریان فراهم می آورد [۸]؛ با این حال برای به کارگیری این نوع رله، نسبت دورهای CT های فازها و مسیرنول و همین طور مشخصه های اشباع آنها باید مشابه باشد و در عین حال CT های استفاده شده باید ولتاژ نقطه زانویی بزرگ و بسیار مشابه داشته باشند [۹]. در واقع به لحاظ تاریخی، در ابتدا به دلیل محدودیت تکنولوژی، تنها این نوع رله REF موجود بوده است؛ اما امروزه استفاده از رله های امیدانس پایین نومریکال بسیار گسترش یافته است. یک مزیت استفاده از این نوع رله، لازم نبودن مشابهت نسبت دور و مشخصه های اشباع CT ها است و مزیت دیگر آن در قیاس با رله REF نوع امیدانس بالا، حساسیت زیاد آن است [۱۰]؛ با این حال، این رله در طی رخداد خطای خارجی یا عبور جریان هجومی مغناطیس کننده ترانسفورماتور قدرت مستعد عملکرد کاذب است [۱۱]. روش های ناظر جهتی [۱۲،۱۳] و جریان مقاوم کننده تطبیق پذیر [۱۴] برای بهبود ایمنی این نوع رله ها در برابر عملکرد کاذب به کار گرفته می شود. همچنین در بسیاری از موارد که همراه با اشباع شدید ترانسفورماتورهای جریان است، مشکل عملکرد ناخواسته وجود دارد [۱۵-۱۷]. در [۱۵] ترکیبی از رله خطای زمین و رله REF برای مقاوم سازی رله در مقابل عملکرد کاذب پیشنهاد شده است. شایان ذکر است استفاده

برق‌دار می‌شود و بار نامی آن نیز به سمت ۶۳ kV متصل می‌شود. برای مکان‌های خطای داخلی سمت ستاره (F1)، ۱۰ نقطه روی سیم‌پیچ با فاصله‌های معادل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ...، ۱۰۰٪ طول سیم‌پیچ از نقطه خنثی و برای موقعیت خطاهایی داخلی سمت مثلث (F2) ۱۱ نقطه با فاصله‌های معادل ۰، ۵، ۱۰، ...، ۵۰٪ طول سیم‌پیچ از ترمینال در نظر انتخاب شده‌اند. باید ذکر کرد در سیم‌پیچ با اتصال ستاره، خطاهای سیم‌پیچ به هسته نزدیک به نقطه خنثی دارای کمترین دامنه جریان خطا است و این در حالی است که کمترین جریان خطای سیم‌پیچ به هسته در اتصال مثلث، مربوط به رخداد خطا در نقطه وسط یک سیم‌پیچ است [۲۱]. همچنین، برای هر مورد خطا ۳ مقدار مختلف از مقاومت خطا لحاظ شده است. کمترین مقاومت خطای در نظر گرفته شده صفر اهم است و بزرگ‌ترین مقاومت خطا نیز طوری انتخاب شده است که جریان دیفرانسیلی با مقدار حدود ۱۰ درصد حاصل آید. شایان توجه است این مقدار جریان دیفرانسیلی برای حداقل تنظیم جریان عمل‌کننده رله REF پیشنهاد می‌شود [۱۸]. جهت در نظر گرفتن اثر زمان رخداد خطا، ۱۱ لحظه مختلف از ابتدا تا انتهای سیکل ۶۰ ام (۱۰۰ تا ۱۲۰ میلی‌ثانیه) با فواصل ۲ میلی‌ثانیه، برای هر مورد خطا در نظر گرفته شده است. همچنین برای CTها چگالی شار پسماند بین ۰٪، +۸۵٪ و -۸۵٪ مقدار نامی آن لحاظ شده است. در نهایت با حذف برخی موارد نسبتاً مشابه، نتایج شبیه‌سازی ۱۰۵۳ مورد از خطاهای داخلی ممکن برای ارزیابی عملکرد رله REF آماده می‌شود؛ برای مثال، شکل (۳) و (۴) به ترتیب جریان دیفرانسیلی و خط سیر جریان دیفرانسیلی مربوط به رله نصب‌شده در سمت ستاره ترانسفورماتور قدرت است؛ هنگامی که یک خطای داخلی زمین با مقاومت صفر روی ترمینال همین سمت در لحظه ۱۰۰ ms رخ دهد. با توجه به شکل (۳)، چنین خطای شدیدی همراه با اشباع ترانسفورماتورهای جریان بوده است؛ به طوری که جریان دیفرانسیلی تاحدودی متفاوت از مقدار واقعی آن محاسبه می‌شود.

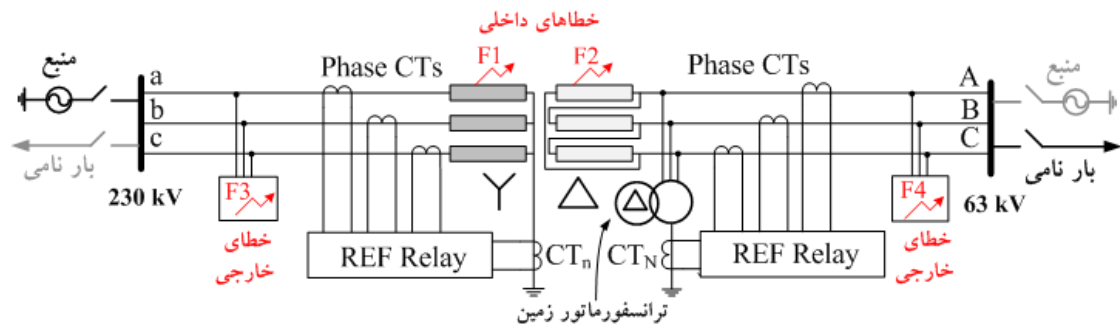
این سیستم قدرت با استفاده از نرم‌افزار معتبر PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود. برای شبیه‌سازی ترانسفورماتورهای جریان از مدل دقیق جیلز اترتون^۴ استفاده می‌شود [۱۹]. فرکانس نمونه‌برداری در شبیه‌سازی‌ها ۵۰۰ Hz انتخاب شده است؛ بنابراین، برای سیستم قدرت تحت مطالعه که فرکانس آن ۵۰ Hz است، یک سیکل شامل ۵۰ نمونه است و مطابق با نظریه نایکوئیست تا هارمونیک ۱۲۵ام را می‌توان استخراج کرد [۲۰]؛ البته باید ذکر کرد روش پیشنهادی اعمال‌پذیر برای سیستم‌هایی با فرکانس نمونه‌برداری دیگر هم است؛ اما بدیهی است زمان لازم برای پیاده‌سازی روش با افزایش فرکانس نمونه‌برداری افزایش می‌یابد. با توجه به این توضیحات، تعداد زیادی از شرایط گوناگون کاری ترانسفورماتور قدرت شامل خطاهای زمین داخلی، خطاهای خارجی و جریان هجومی برای مطالعه عملکرد رله REF نمونه، شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از نتایج حاصله، الگوریتم رله مذکور در محیط MATLAB پیاده‌سازی و تحلیل می‌شود. شایان ذکر است برای این رله، تنظیمات توصیه‌شده سازنده لحاظ شده است. شرح بیشتر این شرایط و نتایج حاصله در بخش‌های زیر ارائه شده است.



شکل (۱): مشخصه رله REF امیدانس پایین تحت مطالعه

۲-۱- خطاهای داخلی

برای به دست آمدن طیف جامعی از خطاهای داخلی، اثر محل خطا، مقاومت خطا، لحظه وقوع خطا و شار پسماند مغناطیسی ترانسفورماتورهای جریان در نظر گرفته می‌شوند. برای شرح بیشتر، ترانسفورماتور قدرت از سمت ۲۳۰ kV

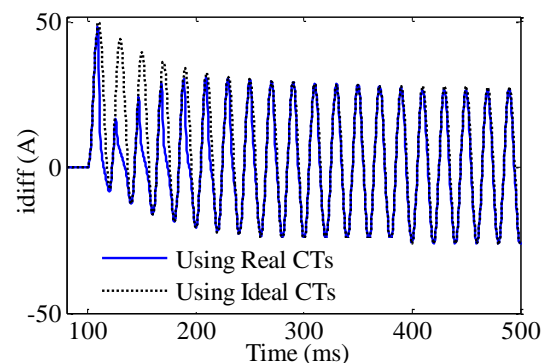


شکل (۲): سیستم قدرت تحت مطالعه

۲-۲- خطاهای خارجی

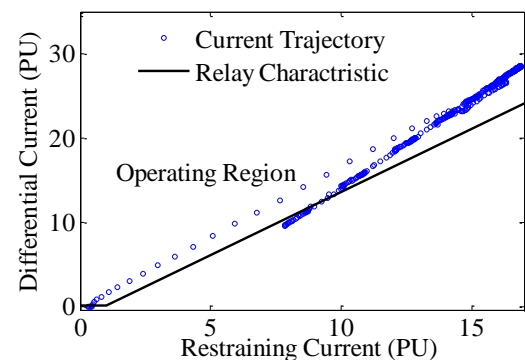
برای حصول اهداف این مقاله، تعداد بسیاری از شدیدترین موارد خطاهای خارجی شبیه‌سازی شده‌اند. برای این کار، تمام انواع خطای خارجی شامل خطاهای تک‌فاز به زمین، فاز به فاز، فاز به زمین و سه‌فاز، با چندین مقاومت خطای کوچک لحاظ شده‌اند. دو حالت مختلف نیز برای مکان خطا در نظر گرفته شده است. در حالت نخست، سمت مثلث ترانسفورماتور به منبع متصل می‌شود و ترانسفورماتور از سمت ستاره بارگیری می‌شود که در این حالت مکان خطای خارجی (F3) سمت ستاره است. در دومین حالت، مکان خطای خارجی (F4) سمت مثلث است؛ به طوری که سمت منبع و بار نیز بالعکس حالت اول در نظر گرفته شده است. مشابه با خطاهای داخلی، ۱۱ نقطه مختلف از سیکل ۳۶م بعنوان لحظات وقوع خطا انتخاب شده است و با لحاظ کردن چگالی شار پسماند متفاوت برای CTها، ۴۴۰ مورد خطای خارجی شبیه‌سازی می‌شوند. با توجه به اینکه عملکرد رله‌های REF نصب‌شده در هر دو سمت ترانسفورماتور قدرت به صورت بالقوه تحت تأثیر هر مورد خطای خارجی است، می‌توان با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده این رله را در ۸۸۰ وضعیت مختلف ارزیابی کرد؛ برای مثال، جریان‌های دیفرانسیلی و خط سیر جریان رله نصب‌شده در سمت مثلث، مربوط به خطای سه‌فاز با مقاومت صفر در همان سمت ترانسفورماتور قدرت که در لحظه ۱۰۰ ms رخ داده است، به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شوند. با توجه به شکل (۵)، اندکی پس از وقوع خطا، جریان دیفرانسیلی ظاهر می‌شود. بدیهی است علت آن تنها اشباع ترانسفورماتورهای جریان است که در

علی‌رغم شرح مذکور، جریان دیفرانسیلی درست در لحظه وقوع خطا شروع به افزایش کرد و با توجه به شکل (۴)، خط سیر جریان بدون هیچ مشکلی وارد ناحیه عملکرد رله می‌شود. با بررسی همه حالات در نظر گرفته شده، مشخص شده است این رله برای همه ۱۰۵۳ مورد خطای داخلی در نظر گرفته شده عملکرد صحیح داشته است و این نتیجه حساسیت زیاد و مناسب رله امپدانس پایین در تشخیص خطای داخلی را تأیید می‌کند.



شکل (۳): جریان دیفرانسیلی رله برای رخداد خطای شدید

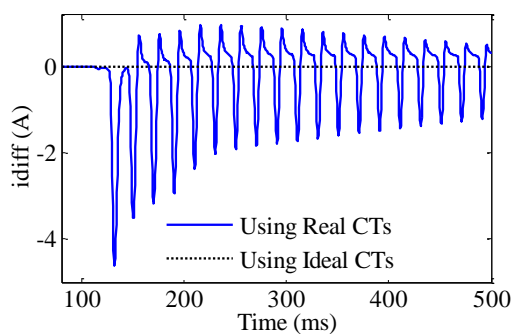
داخلی روی ترمینال سمت ستاره در لحظه ۱۰۰ ms



شکل (۴): خط سیر جریان دیفرانسیلی رله حین رخداد خطای

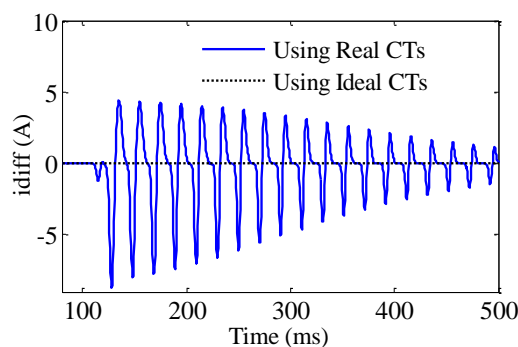
شدید داخلی روی ترمینال سمت ستاره در لحظه ۱۰۰ ms

نظر گرفته شده‌اند. جریان هجومی شامل مؤلفه DC می‌باشوند که موجب اشباع ترانسفورماتورهای جریان می‌شود؛ به طوری که حتی عملکرد کاذب رله را در پی داشته باشد. طبیعت شکل موج جریان هجومی مغناطیس‌کننده ترانسفورماتور تصادفی است و به طور عمده به زاویه وصل ولتاژ، مقدار پسماند مغناطیسی^۵ و منحنی مغناطیسی هسته آن وابسته است [۲۲]. در این بخش تعداد ۵۱۰ مورد از شرایط مختلف برقرارشدن ترانسفورماتور شبیه‌سازی شده‌اند تا نتایج برای ارزیابی رله REF به کار گرفته شوند. برای این کار، ترانسفورماتور قدرت بی‌بار یک بار از سمت ستاره و بار دیگر از سمت مثلث برقرار می‌شود؛ به گونه‌ای که در هر حالت زاویه وصل ولتاژ بین ۰ تا ۳۶۰ درجه با پله‌های ۷/۲ درجه‌ای تغییر می‌کند. باید بیان کرد تمامی لحظات برقرارشدن در سیکل ۳۶ قرار گرفته‌اند. همچنین، برای ترانسفورماتورهای جریان و قدرت مقادیر مختلفی از شار پسماند بین ۸۵٪- و ۸۵٪+ مقدار نامی‌شان، لحاظ شده است؛ برای نمونه، هنگامی که ترانسفورماتور قدرت بی‌بار از سمت ستاره در لحظه ۱۰۰ ms برقرار می‌شود، جریان دیفرانسیلی و خط سیر جریان دیفرانسیلی مطابق با شکل‌های (۷) و (۸) هستند؛ مانند وضعیت خطای خارجی، جریان دیفرانسیلی ظاهر شده نوعاً کاذب است. دامنه بزرگ این جریان موجب می‌شود خط سیر جریان دیفرانسیلی در این حالت نیز وارد ناحیه عملکرد رله شود و در نتیجه رله دچار عملکرد نادرست شود. در مجموع بررسی عملکرد رله در تمامی موارد شرح داده شده، نشان می‌دهد در ۴۷ مورد یعنی ۹/۲ درصد از کل موارد، عملکرد کاذب داشته است. این نتایج لزوم ارائه راهکاری برای بهبود ایمنی این نوع رله را تأیید می‌کند.

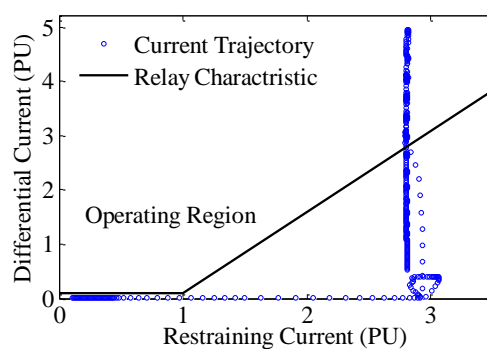


شکل (۷): جریان دیفرانسیلی رله حین جریان هجومی

صورت اشباع‌ناپذیر بودن این ترانسفورماتورها، مطابق شکل مقدار این جریان صفر می‌ماند. دامنه بزرگ جریان دیفرانسیلی موجب می‌شود خط سیر جریان دیفرانسیلی مطابق با شکل (۶) وارد ناحیه عملکرد رله شود و طبیعتاً رله دچار عملکرد کاذب شود. بسیار واضح است که در صورت اشباع‌نشدن ترانسفورماتور جریان، احتمال عملکرد کاذب رله نیز منتفی می‌شود. بررسی عملکرد رله در تمامی ۸۸۰ مورد خطای خارجی نشان می‌دهد این رله در ۲۰۳ مورد یعنی ۲۳/۰۶ درصد کل موارد دارای عملکرد اشتباه است؛ البته باید توجه داشت چنین آماری را برای عملکرد کاذب رله در عمل انتظار نداریم؛ زیرا برای حصول اهداف این پژوهش، تعداد بسیاری از خطاهای در نظر گرفته شده از بدترین موارد بوده‌اند.



شکل (۵): جریان دیفرانسیلی رله برای رخداد خطای خارجی سه‌فاز در سمت مثلث با مقاومت صفر در لحظه ۱۰۰ ms



شکل (۶): خط سیر جریان دیفرانسیلی رله برای خطای خارجی سه‌فاز در سمت مثلث با مقاومت صفر در لحظه ۱۰۰ ms

۲-۳ عبور جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت

برقرارشدن ترانسفورماتور بی‌بار از حیث ظهور جریان هجومی بدترین وضعیت است [۱۷]؛ از این رو در پژوهش پیش‌رو چنین شرایطی برای بررسی عملکرد رله REF در

با توجه به عبارت فوق، برای داشتن مقدار بیشینه m (یعنی افزایش توان جداسازی ماشین بردار پشتیبان)، باید مقدار $\|w\|$ کمینه شود؛ ازاین‌رو، برای داده‌های جداسازی شده خطی، ماشین بردار پشتیبان با کمینه‌سازی تابع $v(w)$ که در رابطه (۴) ارائه شده، همراه با ارضای قید موجود در رابطه (۵)، محقق می‌شود.

$$v(w) = \frac{1}{2} w^T w \quad (4)$$

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

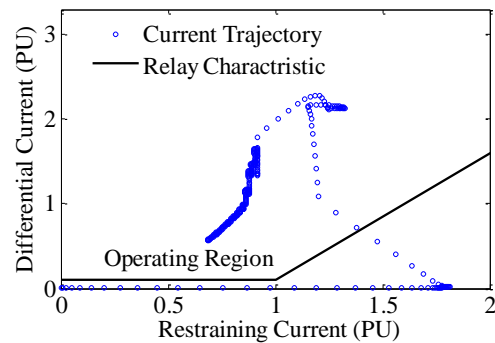
هرچند توضیحات فوق برای درک ساده‌تر روال کار ماشین بردار پشتیبان مفید است، باید ذکر کرد در عمل بیشتر مسائل طبقه‌بندی به صورت خطی جداپذیر نیستند؛ بنابراین برای حل چنین مسائلی، نوع غیرخطی ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است که در آن داده‌های آموزشی به فضایی با ابعاد بزرگ‌تر منتقل می‌شوند. برای نیل به این هدف، تبدیل غیرخطی $\phi(x)$ برای انتقال به کار گرفته می‌شود؛ بنابراین تابع و قید مورد نیاز برای تحقق ماشین بردار پشتیبان مانند عبارات (۶) و (۷) در نظر گرفته می‌شوند.

$$v(w, \varepsilon) = \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \quad (6)$$

$$y_i(w^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

در روابط فوق ε_i متغیرهای کمکی با مقادیر بزرگ‌تر یا مساوی صفرند و برای در نظر گرفتن خطای حاصله استفاده می‌شوند. کمیت C نیز ضریب جریمه نامیده می‌شود که مقدارش همواره بزرگ‌تر از صفر است. بردارهایی که قیود مذکور را به تساوی ارضا کنند، بردار پشتیبان نامیده می‌شوند. این بردارها، تنها بردارهایی هستند که به سطح تصمیم‌گیری و یا ابرصفحه جداکننده بستگی دارند. معادله یادشده را می‌توان با به‌کارگیری اصل لاگرانژ^۷ به صورت رابطه (۸) نوشت که باید شرایط موجود در عبارت (۹) نیز ارضا شوند.

$$L(w, b, \varepsilon, \alpha, \eta) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right) - \sum_{i=1}^N \alpha_i (y_i(w^T \phi(x_i) + b) - 1 + \varepsilon_i) - \sum_{i=1}^N \eta_i \varepsilon_i \quad (8)$$



شکل (۸): خط سیر جریان دیفرانسیلی رله حین جریان هجومی

۳- روش پیشنهادی

همان‌طور که پیش از این ذکر شد روش ارائه‌شده در این مقاله شامل به‌کارگیری ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان طبقه‌بندی‌کننده معتبر و کارا برای هوشمندسازی رله REF مرسوم است؛ ازاین‌رو، در این بخش ابتدا ماشین بردار پشتیبان به اختصار معرفی می‌شود. سپس چگونگی آماده‌سازی و استفاده از آن برای پیاده‌سازی روش به تفصیل تشریح می‌شود.

۳-۱- ماشین بردار پشتیبان

استفاده از ماشین بردار پشتیبان در سال‌های اخیر برای حل مسئله‌های گوناگون طبقه‌بندی، کارایی زیاد آن را اثبات کرده است [۲۳]. این طبقه‌بندی‌کننده برای حل این مسئله‌ها، ابرصفحه‌ای^۶ را می‌یابد که داده‌های ورودی را مطابق با کلاس متناظرشان چنان جدا می‌کند که تفکیک موجود میان کلاس‌ها با بیشترین حاشیه ممکن صورت گیرد [۲۴]. برای شرح بیشتر، اگر مجموعه آموزشی $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$ که از N داده تشکیل شده و شامل دو کلاس نیز است، در نظر گرفته شود، به طوری که x_i نامین مقدار از بردار N بعدی ورودی باشد و y_i نیز با مقادیر ممکنه -1 یا $+1$ کلاس متناظر با آن را نشان دهد، ابرصفحه‌ای که قادر است نقاط را طبق کلاسشان جدا کند، با معادله $W^T x_i + b = 0$ بیان می‌شود. در این عبارت W و b به ترتیب بردارهای وزن و بایاس‌اند. هدف ماشین بردار پشتیبان یافتن مقادیری از بردارهای وزن و بایاس است که به حداکثر جداسازی بین کلاس‌ها منتهی شود. برای این کار، مفهوم حاشیه جداسازی مانند عبارت (۳) تعریف می‌شود [۲۵]:

$$m = \left\| \frac{2}{w} \right\| \quad (3)$$

کافی در موارد شدید جریان هجومی و خطای داخلی ندارد و به بیانی، مستعد عملکرد کاذب است. در واقع علت این امر ثابت بودن تنظیمات رله است. برای شرح بیشتر، مقادیر پارامترهای تنظیم شده رله - که در مشخصه آن (شکل ۱) مشاهده می‌شود - می‌تواند طوری انتخاب شود که حساسیت بیشتری را در مقابل خطای داخلی فراهم آورد؛ ولی تبعات آن ایمنی پایین تر رله در مقابل عملکرد کاذب است. پس کاربر رله باید برای تنظیم آن به حد معین از حساسیت و ایمنی رضایت دهد؛ در حالی که اگر ساختار این رله هوشمند بود، بهترین تصمیم مقتضی برای هر وضعیت توسط آن گرفته می‌شد. نظریه بنیادین این پژوهش نیز تبدیل ساختار غیرهوشمند و انعطاف‌ناپذیر رله به مکانیزم هوشمند است. برای این کار باید در ابتدا بهترین پارامترهای ورودی برای آموزش طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان انتخاب شود. سپس با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، تعداد زیادی از شرایط مختلف عملکردی ترانسفورماتور قدرت شامل خطای داخلی، خطای خارجی و جریان هجومی، ماشین بردار پشتیبان آموزش می‌بیند و دقت آن سنجیده می‌شود. در نهایت پس از تأیید دقت، از آن به‌عنوان هسته هوشمند تصمیم‌ساز در ساختار جدید برای رله پیشنهادی استفاده می‌شود. با توجه به این توضیحات، نخستین مرحله از روش پیشنهادی، انتخاب پارامترهای ورودی مناسب برای آموزش ماشین بردار پشتیبان است. با توجه به اینکه مشخصه بایاس شده رله تحت مطالعه (شکل ۱) براساس دو پارامتر جریان دیفرانسیلی و جریان مقاوم‌کننده بنا شده است، این دو متغیر به‌عنوان نخستین ورودی‌های پروسه آموزش استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، نظر به اینکه وظیفه رله REF تشخیص خطاهای زمین است و این نوع خطا همیشه با ظهور جریان در هادی ختی (نول) همراه است، جریان این هادی نیز گزینه بسیار مناسبی برای استفاده به‌عنوان ورودی پروسه آموزش است. باید توجه کرد مثلاً در خطای خارجی دوفاز و سه‌فاز اصولاً جریان هادی نول صفر است؛ بنابراین استفاده از جریان این هادی به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مهم در فرآیند آموزش، توانایی ماشین بردار پشتیبان را در تفکیک شرایط مختلف کاری را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. با توجه به این

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = w - \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \phi(x_i) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varepsilon_i} = C - \alpha_i - \eta_i = 0$$

در روابط فوق، $\alpha_i \geq 0$ و $\eta_i \geq 0$ متغیرهای کمکی لاگرانژ هستند. با اعمال این شرایط، مسئله بهینه‌سازی به‌صورت عبارت (۱۰) به دست می‌آید که قیود این مسئله نیز در عبارت (۱۱) مشاهده می‌شوند.

$$\text{Maximize} \left\{ \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\phi(x_i) \phi(x_j)) \right\} \quad (10)$$

$$0 < \alpha_i < C$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (11)$$

x_i هایی که برای آنها $\alpha_i > 0$ باشد، به‌عنوان بردار پشتیبان انتخاب می‌شوند. پس از آن، ابرصفحه جداساز از معادله (۱۲) به دست می‌آید.

$$\sum_{SV} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b = 0 \quad (12)$$

در رابطه قبلی SV بردارهای پشتیبان‌اند. در نهایت، طبقه‌بندی‌کننده غیرخطی مانند عبارت (۱۳) خواهد بود [۲۵].

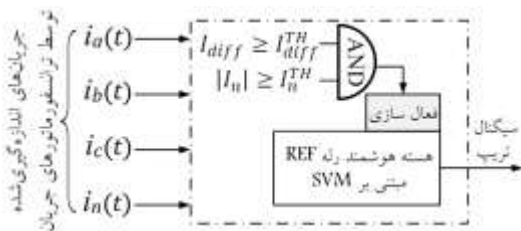
$$y = \text{sign} \left(\sum_{SV} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right) \quad (13)$$

همان‌گونه که پیش از این بیان شد برای طبقه‌بندی مؤثر و صحیح لازم است بردار ورودی با به‌کارگیری تبدیل غیرخطی به فضایی با ابعاد بزرگ‌تر منتقل شود. در عمل این کار به‌طور غیرمستقیم با استفاده از توابع معروف کرنل انجام می‌شود. معروف‌ترین این توابع نیز توابع خطی، چندجمله‌ای، سیگموئید و پایه‌شعاعی‌اند.

۳-۲- هوشمندسازی رله REF

در بخش ۲ مشاهده شد رله REF تحت مطالعه باوجود حساسیت و کارایی مناسب در موارد خطای داخلی، ایمنی

یا مساوی مقادیر آستانه شان شوند، مورد مشکوک به خطای داخلی تشخیص داده می شود و با ارسال سیگنال فعال سازی هسته هوشمند رله فعال می شود که همان ماشین بردار پشتیبان آموزش یافته است و وضعیت پیش رو را تشخیص می دهد. باید ذکر شود در [۱۵] نشان داده شده است که مقایسه جریان هادی نول با یک مقدار آستانه تعدادی از حالات عملکرد کاذب بالقوه را حذف می کند؛ بنابراین ساختار رله هوشمند موجود در شکل (۹) برای به کارگیری در کاربردهای عملی مناسب است.



شکل (۹): ساختار نهایی رله REF هوشمند

۴- شبیه سازی و ارزیابی نتایج

در بخش پیشین شرح داده شد که نتایج شبیه سازی تعداد زیادی از شرایط کاری یک ترانسفورماتور قدرت که شامل خطای داخلی، خطای خارجی و عبور جریان هجومی است، برای ساخت ماتریس های ورودی آموزش و تست طبقه بندی کننده بردار پشتیبان لازم است نتایج به دست آمده در بخش ۲ برای این کار استفاده شوند. همان طور که در بخش مذکور بیان شد تعداد موارد شبیه سازی شده خطاهای داخلی و خارجی و جریان هجومی به ترتیب ۱۰۵۳، ۸۸۰ و ۵۱۰ بوده است. نحوه کار به این صورت است که از نتایج هر مورد شبیه سازی یک سیکل به صورت تصادفی انتخاب می شود و با استفاده از آن بردار ورودی آموزش محاسبه می شود و با استفاده از بردارهای حاصله، ماتریس ورودی آموزش شکل می گیرد. طبیعتاً ابعاد این ماتریس ۳×۲۴۴۳ است. به روش مشابه، یک سیکل متفاوت دیگر از هر مورد شبیه سازی برای به کارگیری در آماده سازی بردار ورودی و طبیعتاً ماتریس ورودی مورد نیاز در پروسه تست، انتخاب می شود. تمامی مراحل ذکر شده و ارزیابی روش پیشنهادی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است و رایانه استفاده شده

توضیحات، بردارهای ورودی آموزش مطابق عبارت (۱۴) در نظر گرفته می شود. شایان ذکر است مقدار معکوس ماکزیمم ورودی های مذکور در بردار مشاهده شده در این عبارت ضرب شده است تا مقادیر ورودی بین ۰ و ۱ محدود شوند و برای استفاده در پروسه آموزش مهیا شوند.

$$IV = \frac{1}{\max\{|I_{diff}|, I_R, |I_n|\}} \begin{bmatrix} I_{diff} \\ I_R \\ |I_n| \end{bmatrix} \quad (14)$$

حال، اگر از نتایج مربوط به هر کدام از حالات شبیه سازی شده، یک سیکل انتخاب شود و از اطلاعات آن سیکل بردار ورودی مربوطه محاسبه شود، می توان ماتریس ورودی آموزش را با استفاده از این بردارها مانند عبارت (۱۵) ساخت. در این عبارت، ستون های زیرماتریس های IE و IC به ترتیب همان بردارهای مربوط به شرایط خطای داخلی، خطای خارجی و جریان هجومی اند. در نهایت ماتریس خروجی آموزش نیز مطابق عبارت (۱۶) در نظر گرفته می شود. در این ماتریس درایه ۱ متناظر با وضعیت خطای داخلی و درایه ۰ نیز مربوط به باقی وضعیت هاست. بدیهی است تعداد ستون های ماتریس های ورودی و خروجی برابرند.

$$IM = [IE \quad EF \quad IC] \quad (15)$$

$$OM = [1 \quad \dots \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (16)$$

پس از توضیح چگونگی ساخت ماتریس های ورودی و خروجی که برای آموزش و تست ماشین بردار پشتیبان به کارگیری می شوند، یک سؤال باقی می ماند و آن چگونگی استفاده از طبقه بندی کننده آموزش یافته پس از تأیید دقت آن است. راه حل مستقیم برای این کار فعال بودن دائمی طبقه بندی کننده است؛ به گونه ای که در هر لحظه جریان های اندازه گیری شده با ترانسفورماتورهای جریان به آن تحویل و پردازش می شوند. ضعف این روش بار محاسباتی زیاد آن است؛ اما در این مقاله مکانیزم بهینه ای برای استفاده از ماشین بردار پشتیبان به صورت شکل (۹) پیشنهاد می شود. طبق این روش، برای جریان های دیفرانسیلی و هادی نول مقادیر آستانه تنظیم شده کاربر، تعریف می شود. این جریان ها به ترتیب با I_n^{TH} و I_{diff}^{TH} نشان داده شده اند. اگر در لحظه ای جریان های دیفرانسیلی و هادی نول به طور همزمان بزرگتر

پیشنهادی ۹۸/۶۴٪ است که در قیاس با دقت ۸۹/۷۶٪ متعلق به رله REF مرسوم و دقت ۹۷/۱۷٪ روش ناظر جهتی جدید، کاملاً برتر است و این به معنای ایمنی بسیار بیشتر رله REF هوشمند است. تنها ضعف استفاده از رله هوشمند شده در مقابل روش‌های دیگر، زمان اجراء طولانی‌تر آن است؛ اما باید توجه کرد این تأخیر زمانی در حدی نیست که روش جدید، کند به حساب آید و در واقع همچنان برای حصول اهداف حفاظتی کاملاً مناسب است.

جدول (۱): تنظیمات و زمان شبیه‌سازی‌ها

روش	تنظیمات	زمان آموزش (s)	زمان اجراء (ms)
ماشین بردار پشتیبان (SVM)	تابع کرنل پایه شعاعی با $C=1000$	۱/۴	۲/۶
رله REF ساخت Micom	تنظیمات پیشنهادی [۱۸]	-	۰/۱
ناظر جهتی جدید [۱۶]	مطابق با [۱۶]	-	۰/۰۹

جدول (۲): نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش‌ها

روش	تعداد غلط از ۱۰۵۳ مورد خطای داخلی	تعداد تشخیص		دقت کلی (%)
		تعداد تشخیص	تعداد تشخیص غلط از ۵۱۰ مورد جریان مورد خطای خارجی	
ماشین بردار پشتیبان (SVM)	۰	۷	۲۶	۹۸/۶۴
رله REF متداول	۰	۴۷	۲۰۳	۸۹/۷۶
ناظر جهتی جدید [۱۶]	۰	۱۶	۵۳	۹۷/۱۷

۵- نتیجه‌گیری

رله خطای زمین محدود شده امپدانس پایین به‌عنوان مکمل رله دیفرانسیل جهت تشخیص خطاهای تک‌فاز به

نیز دارای پردازشگر دوهسته‌ای با فرکانس ۲/۵ GHz و ۸ GB حافظه RAM است. برای ارزیابی دقیق‌تر کارایی روش جدید، نتایج پیاده‌سازی آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد رله REF مرسوم تحت مطالعه در این مقاله و همین‌طور نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش ناظر جهتی جدید پیشنهاد شده در مرجع [۱۶] مقایسه می‌شود که براساس مقایسه‌گر دیجیتال فاز در حوزه زمان است. تنظیمات و مدت‌زمان‌های مربوط به شبیه‌سازی‌ها در جدول (۱) و نتایج حاصله از پیاده‌سازی روش هوشمند و روش‌های یاد شده در جدول (۲) ارائه شده‌اند. با توجه به جدول (۱)، برای ماشین بردار پشتیبان از تابع کرنل پایه شعاعی با ضریب جریمه $C=1000$ استفاده شده که مقدار آن نیز با سعی و خطا به دست آمده است. مدت زمان لازم برای آموزش این طبقه‌بندی‌کننده ۱/۴ s است. برای رله مرسوم تحت مطالعه نیز تنظیمات توصیه شده سازنده لحاظ شده است و همچنین در شبیه‌سازی ناظر جهتی ارائه شده در مرجع [۱۶] نیز مقادیر تنظیمی پیشنهادی در همین مقاله استفاده شده است. اگر زمان اجراء، فاصله زمانی بین لحظات تحویل جریان‌های اندازه‌گیری شده به روش مدنظر و تولید خروجی آن تعریف شود، رله مرسوم و روش ناظر جهتی جدید با زمان اجراء ۰/۱ ms و ۰/۰۹ ms در مقابل رله هوشمند با زمان اجراء ۲/۶ ms، به زمان پردازش کمتری نیاز دارند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲)، ماشین بردار پشتیبان، مشابه با رله REF مرسوم و روش ناظر جهتی جدید، بدون هیچ ضعفی تمامی موارد خطای داخلی را به درستی تشخیص می‌دهد که این مسئله حساسیت زیاد آن را تأیید می‌کند؛ اما از ۵۱۰ مورد جریان هجومی، این طبقه‌بندی‌کننده در تشخیص ۷ مورد دچار اشتباه شده که در مقابل ۴۷ مورد عملکرد کاذب رله REF تحت مطالعه و ۱۶ مورد تشخیص اشتباه روش ناظر جهتی جدید، نتیجه به مراتب بهتری است. به‌علاوه، رله REF سنتی از تعداد ۸۸۰ وضعیت خطای خارجی در ۲۰۳ مورد عملکرد کاذب دارد و روش ناظر جهتی جدید نیز در ۵۳ مورد عملکرد اشتباه داشته است و این در حالیست که ماشین بردار پشتیبان آموزش یافته تنها ۲۶ مورد را به درستی تشخیص نداده است. به‌طور کل دقت کلی روش هوشمند

جدول (۴): مقادیر نامی ترانسفورماتورهای جریان سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور قدرت

مقدار	نام پارامتر
۲۰۰۰ A	جریان نامی اولیه
۱ A	جریان نامی ثانویه
۵۴/۸ cm	طول مسیر مغناطیسی
۱۰/۳۶ cm ²	مساحت سطح مقطع
۷/۷۷ Ω	مقاومت سیم‌بندی CT
۳۰ VA	بردن کل

جدول (۵): مشخصات ترانسفورماتور قدرت

مقدار	نام پارامتر
۱۶۰ MVA	توان ظاهری نامی
۲۳۰ kV	ولتاژ سمت فشار قوی
۶۳ kV	ولتاژ سمت فشار ضعیف
۱۴٪	امیدانس اتصال کوتاه
۰/۲٪	اتلاف مسی

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره های BNUT/۳۷۰۱۹۹/۹۷ و BNUT/۳۹۰۰۶۶/۹۷ اعلام می دارند

مراجع

- [1] D. Guillén, H. Esponda, E. Vázquez and G. Idárraga-Ospina, "Algorithm for Transformer Differential Protection Based on Wavelet Correlation Modes", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 12, pp. 2871-2879, 2016.
- [2] J.P. Krstivojevic and M.B. Djurić, "A New Algorithm for Transformer Ground Fault Protection", MedPower 2014 (IET), pp. 1-6, November 2014.
- [3] P. Bertrand, B. Gotzig and C. Vollet, "Low Impedance Restricted Earth Fault Protection", Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IET), pp. 479-482, April 2001.
- [4] B. Nimtaj, A. Mahmoudi, O. Palizban and S. Kahourzade, "A Comparison of Two Numerical Relay Low Impedance Restricted Earth Fault Algorithms in Power Transformer", 8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer,

زمین روی ترمینال ترانسفورماتور قدرت و همین‌طور خطای سیم‌پیچ به هسته آن به کار می‌رود. با وجود سرعت و حساسیت مناسب، این نوع رله ممکن است در اثر اشباع ترانسفورماتورهای جریان حین عبور جریان هجومی مغناطیس‌کننده ترانسفورماتور قدرت یا خطاهای خارجی با دامنه جریان بزرگ، دچار عملکرد کاذب شود. در این مقاله هوشمندسازی الگوریتم عملکردی این نوع رله با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده ماشین بردار پشتیبان برای ارتقا ایمنی آن پیشنهاد شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها، ایمنی برتر رله هوشمند جدید در قیاس با نسخه متداولش و همین‌طور روش ناظر هوشمند جدید براساس مقایسه‌گر دیجیتال فاز در حوزه زمان را تأیید کرده است؛ البته باید ذکر شود رله هوشمند جدید در قیاس با رله متداول و روش ناظر جهتی تحت مطالعه نیازمند زمان اجراء یا پردازش بیشتری است؛ اما میزان تأخیر زمانی چنان نیست که برای نیل به اهداف حفاظتی مناسب نباشد و با توجه به ایمنی بسیار مناسب‌ترش از این کاهش سرعت صرف‌نظر می‌شود. دیگر مزایای روش ارائه شده، سادگی و وجودداشتن هر نوع قید و شرطی برای استفاده از انواع خاصی از ترانسفورماتورهای قدرت و جریان است. نویسندگان استفاده از ترکیب پردازش سیگنال و روش‌های هوشمند برای ارائه رله خطای زمین محدود شده جدید را در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌کنند.

ضمایم

جدول (۳): مقادیر نامی ترانسفورماتورهای جریان سمت

مقدار	نام پارامتر
۶۰۰ A	جریان نامی اولیه
۱ A	جریان نامی ثانویه
۸۴/۸ cm	طول مسیر مغناطیسی
۳۲/۹ cm ²	مساحت سطح مقطع
۴/۳ Ω	مقاومت سیم‌بندی CT
۳۰ VA	بردن کل

- [16] J.P. Krstivojevic and M.B. Djurić, "New Method of Improving Transformer Restricted Earth Fault Protection", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 41-48, 2014.
- [17] J.P. Krstivojevic and M.B. Djurić, "A New Algorithm for Avoiding Maloperation of Transformer Restricted Earth Fault Protection Caused by The Transformer Magnetizing Inrush Current and Current Transformer Saturation", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-18, 2015.
- [18] MiCOM P642, P643 & P645, "Transformer Protection Relays", Technical Manual, pp. 321-326, 2011.
- [19] A.P.S. Baghel and S.V. Kulkarni, "Parameter Identification of The Jiles-Atherton Hysteresis Model Using A Hybrid Technique", *IET Electric Power Applications*, Vol. 6, No. 9, pp. 689-695, 2012.
- [20] M. Gil and A.A. Abdoos, "Intelligent Busbar Protection Scheme Based on Combination of Support Vector Machine And S-Transform", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 8, pp. 2056-2064, 2017.
- [21] Y.G. Paithankar and S.R. Bhide, "Fundamental of Power System Protection", PHI Learning Private Limited, pp. 80-81, 2010.
- [22] R. Hamilton, "Analysis of Transformer Inrush Current And Comparison of Harmonic Restraint Methods in Transformer Protection", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, No. 4, pp. 1890-1899, 2013.
- [23] A. Koochaki, A.A. Abdoos, G. Mirbabae Rokni, "Power Transformer Protection Using Fast Discrete S-Transform and Optimized Support Vector Machine Classifier with Bee Algorithm", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol.8, No. 2, pp. 41-54, 2017.
- [24] A.A. Abdoos, P. Khorshidian Mianaei and M. Rayatpanah Ghadikolaei, "Combined VMD-SVM Based Feature Selection Method for Classification of Power Quality Events", *Applied Soft Computing*, Vol. 38, Issue C, pp. 637-646, 2016.
- [25] A.A. Abdoos, Z. Moravej and M. Sanaye-Pasand, "Intelligent Differential Protection of Power Transformer Using S-Transform", PhD Thesis, Semnan University, pp. 54-58, 2012.
- Telecommunications and Information Technology, pp. 792-795, May 2011.
- [5] K.N. Dinesh Babu, R. Ramaprabha, V. Rajini and V. Nagarajan, "A Case Study on REF Low Impedance IED Mal Operation", *IEEE 6th International Conference on Power Systems*, pp. 1-5, March 2016.
- [6] C. Apostolopoulos and D.Tsakiris, "Design and Performance Evaluation of A High-Impedance Ref Scheme for MV/LV Transformers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 6, pp. 5398-5409, 2015.
- [7] A.A. Abdoos, "Detection of Current Transformer Saturation Based on Variational Mode Decomposition Analysis", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 11, pp. 2658-2669, 2016.
- [8] J.P. Krstivojevic and M.B. Djurić, "Verification of Transformer Restricted Earth Fault Protection by Using The Monte Carlo Method", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 65-72, 2015.
- [9] P.V. Subramanian and L. Ajitha, "Practical Considerations for High Impedance Restricted Earth Fault Relay Settings", *Journal of The Institution of Engineers*, Vol. 96, No. 1, pp. 107-110, 2015.
- [10] P.E. Sutherland, "Application of Transformer Ground Differential Protection Relays", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, No. 1, pp. 16-21, 2000.
- [11] J. Kang, S. Byun, J. Yang and J. Cho, "Analysis and Solutions to Unusual Differential Relay Misoperation During External Disturbance", *42nd Western Protective Relay Conference*, pp. 1-9, October 2015.
- [12] Document No 1MRK 504 016-UEN, "Technical Reference Manual of RET 521*2.3", ABB relay catalogue, 2001.
- [13] Technical Documents Of 7UT6, "Numerical Differential Protection Relay for Transformers, Generators, Motors, and Branch Points", Siemens Co., 2003.
- [14] UR series Instruction Manual, Re-vision 4.8 xs, "T60 Transformer Management Relay", GE Co., 2006.
- [15] M. Davarpanah and M. Sanaye-Pasand and R. Iravani, "Performance Enhancement of The Transformer Restricted Earth Fault Relay", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 1, pp. 467-474, 2012.

¹ Restricted Earth Fault

² Current Transformer

³ Magnetizing Inrush Current

⁴ Jiles-Atherton

⁵ Residual Flux

⁶ Hyperplane

⁷ Lagrange

