

طراحی یک رله دیفرانسیل زمین جدید بر اساس شبکه عصبی احتمالی

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

^۱ دانشجو 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 دیفرانسیل زمین بخشی از حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت است که به منظور تشخیص خطاهای داخلی اتصال به زمین به کار گرفته می‌شود. این طرح حفاظتی حساس و سریع است، اما حین برخی موارد از جمله خطای خارج از ناحیه حفاظتی و یا طی عبور جریان هجومی مغناطیس‌کننده ترانسفورماتور قدرت، به دلیل اشباع ترانسفورماتورهای جریان، ممکن است دچار عملکرد اشتباه شود. در این مقاله، یک طرح هوشمند جدید برای این رله، بر اساس شبکه عصبی مصنوعی ارائه می‌شود. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، یک ترانسفورماتور قدرت واقعی تحت موارد بسیاری از شرایط کاری مختلف شامل خطای داخلی، خطای خارجی و برق‌دار شدن آن، در محیط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود. سپس بر اساس نتایج حاصل، اطلاعات یک سیکل از جریان دیفرانسیلی مربوط به هر مورد از شرایط مذکور به‌عنوان الگوهای نمونه استفاده شده تا شبکه عصبی احتمالی با استفاده از آن آموزش یابد. در نهایت، از شبکه آموزش‌یافته به‌عنوان هسته تشخیص‌دهنده در طرح این رله نوین استفاده می‌شود. نتایج پیاده‌سازی این روش، کارایی عالی آن را از حیث ایمنی در مقابل عملکرد کاذب، تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: رله دیفرانسیل زمین، ترانسفورماتور قدرت، اشباع ترانسفورماتور جریان، شبکه عصبی احتمالی.

۱. مقدمه

ترانسفورماتور قدرت یک تجهیز بسیار حیاتی و گران‌قیمت در سیستم‌های انرژی الکتریکی است. بنابراین استفاده از طرح‌های حفاظتی قابل اطمینان و سریع در مقابل خطاهای داخلی برای آن بسیار اهمیت دارد [۱]. به‌علاوه، سیستم‌های حفاظتی مورد استفاده بایستی ایمنی بالایی در برابر عملکرد کاذب داشته باشند [۲].

رله دیفرانسیل فاز^۱، طرح حفاظت اصلی ترانسفورماتورهای قدرت در مقابل خطاهای داخلی است. با این حال، عبور یک جریان هجومی مغناطیس‌کننده در زمان برق‌دار شدن ترانسفورماتور قدرت و همین‌طور اشباع ترانسفورماتورهای جریان طی رخداد خطای خارجی با جریان‌های خطای بزرگ، ممکن است باعث ظاهر شدن یک جریان دیفرانسیلی کاذب در آن شود به‌طوری که رله دچار عملکرد کاذب گردد [۳]. پژوهش‌های بسیاری برای بهبود عملکرد رله دیفرانسیل در چنین شرایطی انجام گرفته‌اند. برای مثال، استفاده از تبدیل موجک [۴]، تبدیل S [۵]، هوش مصنوعی [۶] و روش‌های هیبریدی [۷] برخی از روش‌های پرکاربرد در این حوزه هستند.

حساسیت رله دیفرانسیل فاز در تشخیص خطاهای داخلی فاز به فاز و اغلب خطاهای فاز به زمین بسیار مناسب است. با این حال، برای برخی خطاهای فاز به زمین روی سیم‌پیچ که محل خطا به نقطه ختشی زمین‌شده ترانسفورماتور قدرت، نزدیک می‌باشد و یا اینکه جریان خطا محدود شده می‌باشد، حساسیت این رله برای تشخیص خطا کافی نیست [۸]. رله دیفرانسیل زمین^۲ به‌عنوان یک روش حفاظتی مکمل برای پوشش چنین شرایطی به کار گرفته می‌شود [۹]. در واقع این رله از تغییرات نسبتاً بزرگ‌تر جریان هادی ختشی نسبت به جریان فازها، برای تشخیص خطاهای زمین محدودشده استفاده می‌کند [۱۰]. از سوی دیگر، عملکرد صحیح رله دیفرانسیل زمین نیز کاملاً متأثر از اشباع ترانسفورماتورهای جریان^۳ (CT) است. در واقع، ظهور جریان دیفرانسیلی کاذب به دلیل اشباع ترانسفورماتورهای جریان، طی خطاهای خارجی با دامنه جریان خطای بزرگ یا طی عبور جریان هجومی مغناطیس‌کننده ترانسفورماتور قدرت، ممکن است باعث عملکرد ناپسند این طرح حفاظتی شود [۱۱]. استفاده از ترانسفورماتورهای جریان با ابعاد مناسب‌تر می‌تواند عملکرد سیستم حفاظتی را تا حدودی بهبود ببخشد اما آثار اشباع آن‌ها کاملاً مرتفع نمی‌شود [۱۲]. به‌کارگیری رله دیفرانسیل زمین امپدانس بالا نیز سطح معینی از ایمنی در مقابل اشباع ترانسفورماتورهای جریان فراهم می‌آورد، اما برای استفاده از این طرح،

برخی ملاحظات ویژه لازم است. به‌طوری که تعداد دوره‌های برابر برای ترانسفورماتورهای جریان خطوط فاز و ختشی و همین‌طور مشخصه‌های اشباع مشابه و ولتاژ نقطه زانویی بزرگ برای این نوع رله ضروری است [۱۳].

امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی ساخت میکروپروسورها، استفاده از رله دیفرانسیل زمین نوع امپدانس پایین بسیار گسترش یافته است [۱۴]. برای این نوع رله، ملاحظات ویژه ذکرشده برای نوع امپدانس بالا لازم نیست و این در حالی است که حساسیت بیشتری نیز دارد [۱۵]. با این حال این نوع رله نیز حین اشباع ترانسفورماتورهای جریان در معرض عملکرد کاذب قرار دارد [۱۶]. استفاده از روش‌های جریان مقاوم‌ساز تطبیق‌پذیر [۱۷] و ناظر جهتی [۱۸] عملکرد این رله‌ها را بهبود می‌دهد، ولی با استفاده از این روش‌ها همچنان این مشکل در بسیاری موارد محتمل است [۱۹-۲۱]. در مرجع [۱۹] پیشنهاد شده که یک طرح مرکب از رله دیفرانسیل زمین و رله خطای زمین برای جلوگیری از برخی موارد عملکرد کاذب استفاده شود؛ با این حال، این روش در جلوگیری از عملکرد کاذب در موارد خطای خارجی که جریان‌های نسبتاً بزرگی از هادی ختشی می‌گذرد مؤثر نیست. یک ناظر جهتی جدید در مراجع [۲۰-۲۱] بر اساس یک مقایسه‌گر دیجیتال فاز در حوزه زمان، ارائه شده که پیاده‌سازی آن منجر به بهبود عملکرد طرح حفاظتی مذکور به‌خصوص در زمان برق‌دار شدن ترانسفورماتور قدرت گردیده است، اما اثربخشی این روش جدید برای انواع خطاهای خارجی به غیر از خطای فاز به زمین، بررسی نشده است. بایستی عنوان کرد که به‌رغم ارائه روش‌های متعدد برای بهبود عملکرد طرح‌های حفاظتی ترانسفورماتور، به‌خصوص برای رله دیفرانسیل فاز، تنها روش‌های پیشنهادی برای افزایش کارایی رله دیفرانسیل زمین موارد اشاره‌شده فوق است. از این‌رو، انجام پژوهش برای بهبود عملکرد این طرح حفاظتی حائز اهمیت است.

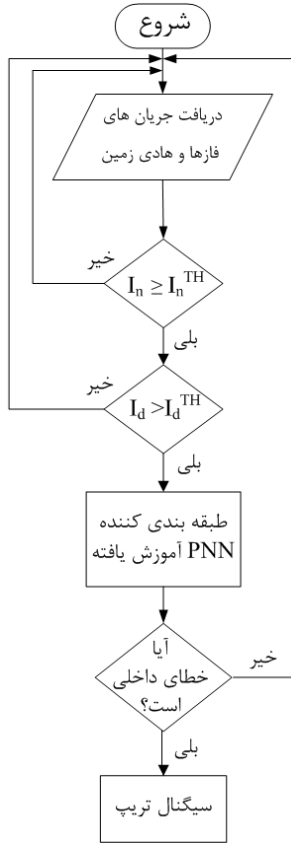
مقاله پیش رو، یک رله دیفرانسیل زمین جدید بر پایه شبکه عصبی احتمالی ارائه می‌دهد. برای این کار، در ابتدا روش پیشنهادی در بخش ۲ شرح داده می‌شود. در بخش ۳، پیاده‌سازی طرح پیشنهادی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی یک سیستم قدرت نمونه در قیاس با برخی روش‌ها ارائه شده است. در بخش ۴ عملکرد رله هوشمند جدید در برخی حالات خاص ارزیابی می‌شود. در نهایت مقاله با بخش ۵ یعنی بخش نتایج پایان می‌پذیرد.

۲. روش پیشنهادی

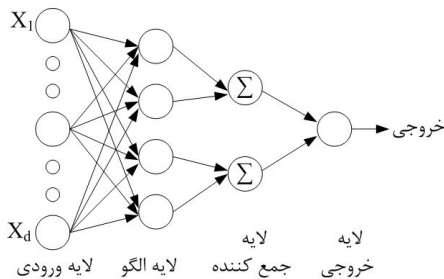
جریان دیفرانسیلی در رله دیفرانسیل زمین امپدانس پایین معمولاً از رابطه (۱) حاصل می‌آید [۲۲]. در این رابطه، i_a ، i_b و i_c جریان‌های خطوط

1. Phase Differential Relay
2. Ground Differential Relay
3. Current Transformer

هریک از الگوهای نمونه در یک طبقه معین ساخته می‌شود. سپس خروجی‌های واحد الگو به واحد جمع‌کننده مناسب آن طبقه متصل می‌شود. در لایه خروجی، طبقه‌ای که احتمال بزرگ‌تری دارد به‌عنوان طبقه برنده انتخاب می‌شود [۲۳].



شکل (۱): الگوریتم به‌کارگرفته‌شده در رله هوشمند جدید



شکل (۲): ساختار شبکه عصبی احتمالی

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، شبکه عصبی احتمالی یک شبکه پیشخور با چهار لایه است که قادر به تحقق یک طبقه‌بندی بهینه است [۲۴]. برای شرح بیشتر، اگر فرض شود که $x \in R^d$ بردار الگوی d بعدی، $i = (S_1, S_2, S_3, \dots, S_k)$ طبقه متناظر آن و k نیز تعداد طبقه‌های ممکن باشد، احتمال استقرایی $p_r(S_i|x)$ که مربوط به طبقه S_i است، توسط قانون بیز به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$p_r(S_i|x) = \frac{p_r(S_i|x)p_r(S_i)}{p(x)} \quad (2)$$

فاز متصل به ترانسفورماتور هستند و جریان هادی ختی نیز با I_n نشان داده شده است. جریان‌های مذکور به‌وسیله CTها به سیستم حفاظتی تحویل داده می‌شود. در صورت اشباع‌ناپذیر فرض نمودن CTها، جریان دیفرانسیلی تنها در صورت وجود خطای داخلی فاز به زمین روی ترمینال یا سیم‌پیچ ترانسفورماتور ظاهر می‌شود. با این حال، حین خطای خارجی و عبور جریان هجومی، اشباع احتمالی CTها منجر به ظهور جریان دیفرانسیلی می‌شود که چنین جریانی نوعاً کاذب است و اگر مقدار آن به‌اندازه کافی بزرگ باشد، نتیجه‌اش عملکرد نابجای رله خواهد بود [۱۹]. بدیهی است که با توجه به منشأ متفاوت حصول جریان دیفرانسیلی در وضعیت خطای داخلی در مقایسه با شرایط خطای خارجی و جریان هجومی، شکل موج این جریان هنگام خطای داخلی دارای ویژگی‌های متفاوتی از دیگر شرایط مذکور خواهد بود. بنابراین، در این روش، در ابتدا یک ترانسفورماتور قدرت در موارد زیادی از شرایط کاری مذکور شبیه‌سازی می‌شود. سپس، اطلاعات یک سیکل از جریان دیفرانسیلی در هر مورد شبیه‌سازی، به‌عنوان یک الگوی نمونه انتخاب می‌شود. با استفاده از الگوهای نمونه به‌دست‌آمده شبکه عصبی احتمالی به‌عنوان یک طبقه‌بندی‌کننده هوشمند کارا، آموزش می‌یابد. پس از حصول اطمینان از دقت تشخیص شبکه آموزش‌یافته، از آن به‌عنوان هسته هوشمند طرح حفاظتی جدید استفاده می‌شود. ساختار رله پیشنهادی بدین صورت است که در مرحله اول، اندازه جریان هادی ختی با یک مقدار قابل تنظیم (I_n^{TH}) مقایسه می‌شود؛ زیرا خطای داخلی فاز به زمین همیشه با برقراری جریان در هادی ختی همراه است و با این کار بسیاری از موارد بالقوه عملکرد کاذب رله حذف می‌شود [۱۹]. در صورتی که جریان هادی نول بزرگ‌تر باشد، اندازه جریان دیفرانسیلی در ابتدا با یک مقدار آستانه قابل تنظیم توسط کاربر (I_d^{TH}) مقایسه می‌گردد و اگر اندازه جریان دیفرانسیلی بزرگ‌تر باشد، طبقه‌بندی‌کننده هوشمند مذکور فعال می‌شود تا شرایط پیش‌رو را تشخیص دهد و در صورت وجود خطای داخلی سیگنال تریپ را تولید کند. چنین ساختاری برای رله پیشنهادی در شکل (۱) قابل مشاهده است.

$$i_d(t) = i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) - i_n(t) \quad (1)$$

۱.۲. شبکه عصبی احتمالی

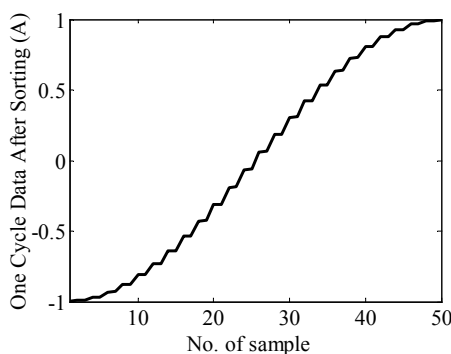
شبکه عصبی احتمالی یکی از انواع شبکه‌های عصبی پیشخور است. ساختار اصلی آن یک شبکه عصبی مستقیم بر پایه تخمین تابع توزیع چگالی احتمالی پارزن و قانون طبقه‌بندی بیز است. شبکه‌های عصبی احتمالی می‌توانند بعد از تعیین مجموعه الگوهای نمونه در طی یک مرحله ساخته شوند. لذا زمان لازم برای ایجاد آن از دیگر انواع شبکه‌های عصبی بسیار کمتر است. این شبکه با تعیین بردار وزن برای

مثال به صورت صعودی). این کار تا حدود زیادی وابستگی شکل موج الگوهای حاصل برای خطاهای داخلی به نقطه شروع سیکل انتخابی را از بین می برد. شایان ذکر است در صورت اینکه جریان دیفرانسیلی سینوسی خالص باشد، بدون توجه به اینکه کدام سیکل در نظر گرفته شده، شکل موج حاصله الگوی نمونه پس از مرتب سازی یکتا خواهد بود. برای درک بهتر، اگر از تابع $y = \sin(100\pi t + \theta)$ یک سیکل دلخواه با نرخ نمونه برداری ۵۰ نمونه بر سیکل ذخیره گردد، سپس مقادیر ذخیره شده به صورت صعودی مرتب شود، منحنی نشان داده شده در شکل (۳) حاصل می آید که یکتاست. با توجه به این توضیحات، برای ساخت یک بردار ورودی الگو از یک سیکل جریان دیفرانسیلی انتخابی، از رابطه (۵) استفاده می شود. در این رابطه، نرخ نمونه برداری n فرض شده است. همچنین بایستی ذکر شود که m مقدار ماکزیموم قدر مطلق مقادیر نمونه برداری شده این سیکل نمونه است و با استفاده از ضریب $\frac{1}{m}$ مقادیر عناصر موجود در بردار الگو بین -۱ تا +۱ محدود می شوند که برای استفاده در پروسه آموزش طبقه بندی کننده مطلوب است. اگر NT تعداد الگوهای مربوط به خطای داخلی معادل با وضعیت لازمه تولید سیگنال تریپ و NB نیز تعداد مجموع الگوهای مربوط به خطای خارجی و جریان هجومی و معادل با وضعیت لازمه بلاک رله باشد، ماتریس ورودی آموزش شبکه عصبی مطابق رابطه (۶) قابل بیان است. در این ماتریس، بخش T و B به ترتیب از بردارهای ورودی مربوط به خطاهای داخلی و شرایط دیگر تشکیل شده اند. بنابراین بردار خروجی نیز مطابق با رابطه (۷) خواهد بود که در این بردار درایه "1" به معنای عملکرد رله و درایه "0" معادل با وضعیت بلاک آن است.

$$IV = \text{ascending sort} \left(\frac{1}{m} \begin{bmatrix} i_d^{\text{sample } 1} \\ \vdots \\ i_d^{\text{sample } n} \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

$$IM = [T_{n \times NT} \quad \vdots \quad B_{n \times NB}] \quad (6)$$

$$OV = [1_{1 \times NT} \quad \vdots \quad 0_{1 \times NB}] \quad (7)$$



شکل (۳): شکل موج یکتا پس از مرتب کردن صعودی مقادیر یک سیکل نمونه از یک شکل موج سینوسی

که در آن، تابع چگالی احتمال این الگو در طبقه هایی است که باید از هم جدا شوند، $p_r(S_i)$ احتمالات طبقه هاست و فرض می شود که $p(x)$ دارای مقداری ثابت باشد. قانون تصمیم گیری برای طبقه S_i این است که برای این طبقه مقدار $p_r(S_i|x)$ ماکزیمم گردد و این زمانی رخ خواهد داد که برای تمامی $i \neq j$ شرط زیر برقرار باشد:

$$p_r(x|S_i)p_r(S_i) > p_r(x|S_j)p_r(S_j) \quad (3)$$

در نهایت با فرض اینکه احتمالات $p_r(S_i)$ برای کلاس های مختلف مشخص باشند و تابع توزیع چگالی احتمال به صورت گوسی باشد، تخمین تابع چگالی احتمال به صورت زیر خواهد بود.

$$\hat{p}(x|S_i) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} \sigma_i^d |S_i|} \sum_{j=1}^{n_i} \exp \left[\frac{-(x - x_j)^T (x - x_j)}{2\sigma_i^2} \right] \quad (4)$$

در عبارت فوق، x_j^i الگوی نمونه j ام از کلاس S_i که $|S_i| = n_i$ و σ_i ضریب هموارساز هستند. با استفاده از این رابطه، میزان تعلق نمونه ورودی به هر طبقه به طور جداگانه محاسبه می شود. همان طور که پیش از این اشاره شد، طبقه ای به عنوان برنده انتخاب می شود که بیشترین احتمال را به خود اختصاص دهد.

شبکه های عصبی احتمالی به لحاظ سرعت بالا و قدرت تعمیم پذیری مناسب نسبت به شبکه های عصبی مصنوعی پس انتشار برتری دارد. تنها عیب شبکه عصبی احتمالی نیاز آن به ذخیره الگوهای آموزشی است که با توجه به پیشرفت تکنولوژی در ساخت حافظه هایی با ظرفیت بالا، نگرانی برای میزان ذخیره اطلاعات وجود ندارد.

۲.۲. انتخاب و آماده سازی الگوهای نمونه

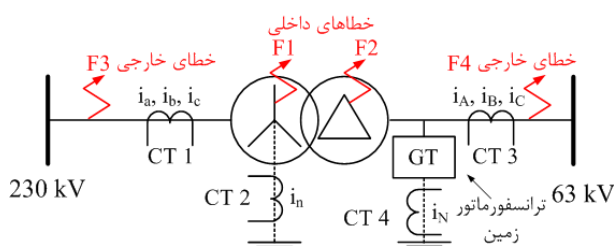
اطلاعات یک سیکل جریان دیفرانسیل پس از هر مورد رخداد خطا یا جاری شدن جریان هجومی، به عنوان الگوی نمونه استخراج شده آن مورد از وضعیت کاری ترانسفورماتور قدرت، در نظر گرفته می شود. شکل موج جریان دیفرانسیلی حین خطای داخلی دارای شکل موج سینوسی یا شبه سینوسی است [۱۹]. با توجه به این مسئله، شکل موج یک سیکل جریان دیفرانسیل در هر مورد خطای داخلی کاملاً وابسته به نقطه شروع سیکل نمونه برداری است. از این رو، برای حصول آموزش دقیق طبقه بندی کننده بایستی تعداد سیکل های انتخابی به عنوان الگوی آموزش، بسیار افزایش یابد که این مسئله، زمان آموزش و احتمالاً واگرایی پروسه آموزش را افزایش می دهد. اما با یک راهکار خلاقانه ساده، این مشکل مرتفع خواهد شد. این راهکار از این قرار است که به جای استفاده مستقیم از یک سیکل اطلاعات خام جریان های دیفرانسیل انتخابی، در ابتدا مقادیر جریان این سیکل مرتب شود (برای

۳. شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش یک سیستم قدرت انتخاب شده و نتایج شبیه‌سازی آن در شرایط گوناگون، برای پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی به کار گرفته می‌شود.

۱.۳. سیستم قدرت تحت مطالعه

برای آماده‌سازی ماتریس ورودی برای آموزش شبکه عصبی احتمالی، نتایج شبیه‌سازی یک سیستم قدرت نمونه برای تعداد بزرگی از موارد خطاهای داخلی و خارجی و همین‌طور جریان هجومی لازم است. بنابراین، بخشی از یک پست فشارقوی (همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده)، شامل یک ترانسفورماتور قدرت 160 MVA ، $230/63 \text{ kV}$ ، ترانسفورماتور زمین و ترانسفورماتورهای جریان مربوطه انتخاب و در محیط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. برخی از مشخصات سیستم مذکور در بخش پیوست مقاله قابل مشاهده است. برای شبیه‌سازی CTها از مدل دقیق جیلز اترتون^۱ استفاده شده است. فرکانس نمونه‌برداری نیز در شبیه‌سازیها 2500 Hz انتخاب شده است. بنابراین، برای سیستم قدرت تحت مطالعه با فرکانس 50 Hz ، یک سیکل شامل 50 نمونه است و مطابق با تئوری نایکوئیست تا 1250 Hz را می‌توان استخراج کرد [۲۵]. شایان ذکر است که روش پیشنهادی قابل اعمال برای سیستم‌هایی با فرکانس نمونه‌برداری دیگر نیز می‌باشد اما زمان مورد نیاز برای پیاده‌سازی روش برای فرکانس نمونه‌برداری بیشتر، افزایش می‌یابد. با توجه به توضیحات فوق، مواردی از خطاهای داخلی، خارجی و برق‌دار شدن ترانسفورماتور که برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند در بخش‌های ذیل به اختصار تشریح شده است.



شکل (۴): دیاگرام تک خطی سیستم قدرت تحت مطالعه

۱.۱.۳. خطاهای داخلی

در این بخش از مطالعه، موارد زیادی از خطاهای داخلی شبیه‌سازی شده‌اند، به طوری که محل خطا، مقاومت خطا، لحظه وقوع خطا و شار پسماند مغناطیسی CTها در نظر گرفته شده است. برای شرح بیشتر، ترانسفورماتور قدرت از سمت فشارقوی انرژی‌دار می‌شود و بار نامی

آن در سمت فشارضعیف متصل شده است. برای محل خطای داخلی سمت $Y (F1)$ ، 10 نقطه مختلف روی سیم‌پیچ با فاصله‌های معادل 10 ، 20 ، 30 ، 40 ، 50 ٪ طول سیم‌پیچ از نقطه ختشی و برای موقعیت خطای داخلی سمت $\Delta (F2)$ ، 11 نقطه مختلف با فاصله‌های معادل 5 ، 10 ، 15 ، 20 ، 25 ، 30 ، 35 ، 40 ، 45 ٪ طول سیم‌پیچ از ترمینال در نظر گرفته شده‌اند. شایان ذکر است که در سیم‌پیچ با اتصال Y دامنه جریان خطا برای خطاهای نزدیک به نقطه ختشی کمتر می‌باشد و این در حالی است که در سیم‌پیچ با اتصال Δ کمترین جریان خطا مربوط به وضعیتی است که خطا درست در وسط سیم‌پیچ واقع شده باشد [۲۶]. همچنین، هر مورد خطا با 3 مقدار مختلف مقاومت خطا شبیه‌سازی شد. کمترین مقاومت لحاظ شده صفر اهم است و بیشترین مقاومت نیز به گونه‌ای انتخاب شده است تا جریان دیفرانسیلی با اندازه حدود 10 ٪ حاصل آید. باید ذکر کرد این مقدار جریان دیفرانسیلی به‌عنوان حداقل تنظیم برای جریان عمل‌کننده رله دیفرانسیل زمین توصیه شده است [۲۷]. برای احتساب اثر لحظه خطا روی نتایج، 11 نقطه که به‌طور یکنواخت از یک سیکل انتخاب شده‌اند به‌عنوان زمان رخداد خطا در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، چگالی شارهای متفاوت برای CTها لحاظ شده است که شامل 0 ، $+85$ ٪، و -85 ٪ مقدار نامی هستند. در نهایت، با حذف برخی موارد کم‌اهمیت، نتایج شبیه‌سازی 1053 مورد از خطاهای داخلی ممکن برای استفاده در پروسه آموزش فراهم شد.

۲.۱.۳. خطاهای خارجی

برای نیل به اهداف این مقاله، تعداد زیادی از شدیدترین خطاهای خارجی ممکنه شبیه‌سازی شده است. برای این کار، همه انواع خطای خارجی شامل خطاهای تک‌فاز به زمین، فاز به فاز، فاز به زمین و سه‌فاز، با مقاومت‌های کوچک مختلفی در نظر گرفته شد. برای محل وقوع خطا نیز دو حالت لحاظ شده است. در یک حالت، منبع به سمت Δ متصل شد و ترانسفورماتور از سمت Y بارگیری شد که در این وضعیت محل وقوع خطای خارجی ($F3$) نیز سمت Y است. در حال دوم، محل وقوع خطای خارجی ($F4$) سمت Δ می‌باشد و سمت منبع و بار نیز بالعکس حالت قبلی است. به‌علاوه، مشابه با خطاهای داخلی مطالعه‌شده، 11 نقطه مختلف انتخاب‌شده از یک سیکل به‌عنوان لحظات خطا تعیین شدند. در نهایت، با احتساب چگالی شار پسماند متفاوت برای CTها، 440 مورد خطای خارجی شبیه‌سازی شد. از آنجایی که طرح رله دیفرانسل زمین فرضی نصب‌شده در هر دو سمت ترانسفورماتور متأثر از هر مورد خطا هستند، نتایج 880 وضعیت از خطای خارجی برای استفاده در بخش‌های بعدی آماده استفاده شده است.

۳.۱.۳. برق دار شدن ترانسفورماتور قدرت

جریان هجومی معمولاً طی برق دار شدن ترانسفورماتور قدرت ظاهر می شود و ناشی از افزایش چگالی شار هسته است. این جریان شامل یک مؤلفه DC میرای کند است که می تواند منجر به اشباع CT شود و در نتیجه احتمال عملکرد کاذب رله دیفرانسل زمین را افزایش دهد. دامنه و شکل موج جریان هجومی مغناطیس کننده ترانسفورماتور ذاتاً تصادفی است و عمدتاً به زاویه وصل ولتاژ، پسماند مغناطیسی و منحنی مغناطیسی هسته آن بستگی دارد [۲۱]. در این بخش، تعداد ۵۱۰ مورد از وضعیت های مختلف برق دار شدن ترانسفورماتور شبیه سازی شده است تا نتایج حاصل در پیاده سازی روش پیشنهادی به کار گرفته شود. برای این کار، ترانسفورماتور بی بار یک مرتبه از سمت Y و مرتبه دیگر از سمت Δ برق دار می شود، به طوری که در هر مورد زاویه وصل ولتاژ بین ۰ تا ۳۶۰ درجه با گام های ۷/۲ درجه ای تغییر می کند. شایان ذکر است که لحظات برق دار شدن همگی در سیکل ۱۶ قرار گرفته اند. به علاوه، مقادیر مختلفی از شار پسماند بین ۸۵٪ و ۸۵٪+ مقدار نامی، برای CTها و ترانسفورماتور قدرت در نظر گرفته شده است.

۲.۳. نتایج آموزش و تست شبکه عصبی احتمالی

همان طور که قبلاً ذکر شد، برای ساخت ماتریس های ورودی برای آموزش و تست طبقه بندی کننده، بایستی بردارهای ورودی استخراج شده از تعداد بزرگی از خطاهای داخلی و خارجی و شرایط برق دار شدن ترانسفورماتور به کار گرفته شود. برای این کار از نتایج شبیه سازی های بخش قبلی که شامل ۱۰۵۳ مورد خطای داخلی، ۸۸۰ مورد خطای خارجی و ۵۱۰ مورد جریان هجومی است، استفاده می شود. برای شرح بیشتر، یک سیکل پس از رخداد خطا یا برق دار شدن به طور تصادفی انتخاب می شود و از دیتای مربوط به آن سیکل، بردار ورودی مربوط محاسبه می شود تا در پروسه آموزش به کار رود. به طریق مشابه، یک سیکل از دیتای دیده نشده نیز برای استفاده در مرحله تست انتخاب می شود. قابل ذکر است که همه مراحل پیاده سازی و ارزیابی روش پیشنهادی در محیط MATLAB انجام گرفته است. کامپیوتر مورد استفاده نیز دارای پردازشگر دو هسته با فرکانس ۲/۵ گیگاهرتز و مقدار حافظه ۸ گیگابایت است.

جدول (۱): نتایج آموزش و تست PNN در قیاس با یک روش سنتی و یک روش نظارت جهتی جدید

روش	تنظیمات	تعداد تشخیص غلط از ۱۰۵۳ مورد خطای داخلی	تعداد تشخیص غلط از ۵۱۰ مورد جریان هجومی	تعداد تشخیص غلط از ۸۸۰ مورد خطای خارجی	زمان آموزش (s)	زمان اجرا (ms)	دقت کلی (%)
PNN	$\sigma=0/1$	۱	۸	۲۱	۰/۱	۴/۵	۹۸/۷۷
روش سنتی	تنظیمات توصیه شده [۲۷]	۰	۴۷	۲۰۳	-	۰/۱	۸۹/۷۶
ناظر جهتی جدید	مطابق با مرجع [۲۰]	۰	۱۶	۵۳	-	۰/۰۹	۹۷/۱۷

طبقه بندی کننده، فرایند متوقف نشده و با ورود اطلاعات لحظات بعدی در نهایت خطا تشخیص داده خواهد شد. با توجه به جدول مذکور، استفاده از طبقه بندی کننده آموزش یافته تعداد ۸ مورد عملکرد کاذب از تعداد ۵۱۰ مورد جریان هجومی و همین طور ۲۱ مورد عملکرد نابجا از ۸۸۰ مورد خطای خارجی در پی خواهد داشت. چنین آماری معادل با دقت کلی ۹۸/۷۷٪ برای طبقه بندی آموزش یافته است. این در حالی است که دقت کلی تشخیص شرایط توسط روش سنتی ۸۹/۷۶٪ است. بدین صورت که رله مذکور به ترتیب دارای ۴۷ و ۲۰۳ مورد عملکرد کاذب برای خطاهای خارجی و جریان هجومی بوده است و روش ناظر جهتی جدید نیز با تشخیص بدون نقص همه موارد خطای داخلی و در عین حال با داشتن تعداد به ترتیب ۱۶ و ۵۳ مورد عملکرد کاذب برای جریان هجومی و خطای خارجی دارای دقت تشخیص ۹۷/۱۷٪ است.

با توجه به نتایج موجود در جدول (۱)، دقت تشخیص شبکه عصبی احتمالی آموزش یافته، یک روش سنتی برای رله امیدانس پایین [۲۷] و همین طور یک روش نظارت جهتی جدید بر اساس مقایسه گر دیجیتال فاز در حوزه زمان [۲۰]، قابل مقایسه است. پارامترهای قابل تنظیم طبقه بندی کننده هوشمند از طریق سعی و خطا تعیین شده است؛ زیرا اطلاعات اندک درباره ساختار یک طبقه بندی کننده برای حصول عملکرد بهینه آن کافی است. طبقه بندی کننده PNN تنها یک پارامتر قابل تنظیم به نام پارامتر هموارسازی دارد (σ) که آن هم روی ۰/۱ تنظیم شده است. طول مدت زمان آموزش این طبقه بندی کننده هوشمند ۰/۱ ثانیه بوده است. نتایج تست شبکه آموزش یافته نشان می دهد که تنها ۱ مورد از ۱۰۵۳ مورد خطاهای داخلی توسط آن تشخیص داده نشد که این به معنای عدم شناسایی مطلق این موارد از خطاهای داخلی نیست؛ زیرا پس از ورود اطلاعات یک سیکل و عدم تشخیص خطای داخلی توسط

مطرح برای ترانسفورماتور قدرت تحت حفاظت، توسط اپراتور و مطابق با استانداردها و روش‌های موجود قابل انتخاب است.

۱.۴. سرعت عملکرد حین خطای داخلی

برای بررسی سرعت عملکرد طرح حفاظت دیفرانسیل زمین پیشنهادی حین خطاهای داخلی، دو مورد خطای بسیار سبک و بسیار شدید در نظر گرفته شده است. خطای سبک مطالعه‌شده، حاصل رخداد خطا با مقاومت ۲۵۰۰ اهم روی ترمینال سمت اتصال Y ترانسفورماتور قدرت در لحظه ۱۰۰ میلی‌ثانیه است. همان‌طور که شکل (۵-الف) دیده می‌شود، تغییرات جریان در فاز خطادار نسبت به زمان‌های قبل رخداد خطا، بزرگ نبوده است و در نتیجه هیچ اشباعی در ترانسفورماتور جریان نصب‌شده روی این فاز رخ نداده است. دلیل این امر، اندازه بزرگ مقاومت خطاست که باعث محدود شدن جریان خطا شده است. به تبع جریان دیفرانسیلی حاصل نیز دارای دامنه کوچک (در حد حداقل جریان مورد نیاز برای عمل نمودن رله مرسوم) می‌باشد و لحظه شروع افزایش این جریان نیز دقیقاً همان لحظه رخداد خطاست (شکل ۵-ب را مشاهده کنید). با توجه به شکل (۵-ج)، خط سیر جریان دیفرانسیلی روش سستی بدون هیچ مسئله وارد ناحیه عملکرد آن می‌شود که این به معنای تولید سیگنال تریپ توسط آن است. سیگنال‌های تریپ مربوط به روش سستی و طرح هوشمند پیشنهادی در شکل (۵-د) نشان داده شده‌اند. مطابق این شکل، روش سستی تحت مطالعه، ۱۴ میلی‌ثانیه پس از رخداد خطا آن را تشخیص داده، درحالی‌که این زمان برای طرح پیشنهادی ۲۳/۷ میلی‌ثانیه است. خطای شدید در نظر گرفته‌شده نیز با مقاومت صفر در لحظه ۱۰۰ میلی‌ثانیه روی ترمینال سمت Y ترانسفورماتور رخ می‌دهد. با توجه به محل و مقاومت خطا، دامنه جریان خطا به شدت افزایش می‌یابد و جریان فاز خطادار نیز به شدت افزایش یافته که نتیجه آن اشباع CT است (شکل ۶-الف را مشاهده کنید). بنا بر توضیحات داده‌شده، جریان دیفرانسیلی نیز با دامنه بسیار بزرگ ظاهر می‌شود که البته شکل موج آن همان‌طور که در شکل (۶-ب) قابل مشاهده است، متأثر از پدیده اشباع ترانسفورماتور جریان است. شایان ذکر است که در این حالت نیز لحظه شروع ظهور جریان دیفرانسیلی همان لحظه رخداد خطاست؛ زیرا در خطای داخلی اتصال به زمین، اصولاً خود رخداد خطا عامل ظهور جریان دیفرانسیلی است و این در حالی است که تنها سرمنشأ جریان دیفرانسیلی احتمالی که ممکن است حین خطای خارجی و جریان هجومی ظاهر شود، اشباع ترانسفورماتورهای جریان است. با توجه به شکل (۶-ج)، خط سیر جریان دیفرانسیلی مربوط به رله مرسوم در این حالت نیز بدون هیچ مشکلی وارد ناحیه عملکرد رله شده است. دامنه بسیار بزرگ جریان خطا باعث شده که رله متداول تحت مطالعه تنها ۱/۷ میلی‌ثانیه پس از خطا عملکرد داشته

همان‌طور که انتظار می‌رفت، روش سستی در تشخیص خطاهای داخلی هیچ عملکرد اشتباهی نداشت و این تأکید مجددی بر حساسیت مناسب رله‌های دیفرانسیل فاز امپدانس پایین است که به قیمت ایمنی پایین‌تر آن در مقابل عملکرد کاذب نیز می‌باشد. روش ناظر جهتی جدید نیز در قیاس با دو روش دیگر دارای عملکرد متوسطی از حیث دقت تشخیص است و برتری مطلق نیز در این مقایسه با شبکه عصبی آموزش‌یافته می‌باشد. پارامتر مهم دیگر در تحلیل قیاسی عملکرد این روش‌ها، زمان اجراست. این زمان با اندازه‌گیری فاصله زمانی بین ورود هر سیکل اطلاعات به روش پیاده‌سازی شده و زمان تشخیص وضعیت موجود بر اساس این اطلاعات، به دست آمده است. زمان اجرای روش‌های سستی و ناظر جهتی جدید به ترتیب تنها ۰/۱ ms و ۰/۰۹ ms است درحالی‌که مقدار آن برای شبکه PNN معادل ۴/۵ ms می‌باشد. با توجه به این مقادیر، شبکه هوشمند آموزش‌یافته دارای عملکرد نسبتاً کندتر نسبت به دیگر روش‌هاست. البته سرعت کمتر آن را بایستی در کنار دقت تشخیص مطلقاً برترش مورد ارزیابی قرار داد؛ زیرا این مقدار تأخیر زمانی را نمی‌توان مانع حصول اهداف یک طرح حفاظتی ترانسفورماتور قدرت دانست. خاطرنشان می‌شود که در عمل برای این نوع رله‌ها نمی‌توان چنین احتمالات بالایی را برای عملکرد کاذب انتظار داشت؛ زیرا برای نیل به اهداف این مقاله، بسیاری از موارد خطاهای خارجی و جریان هجومی در نظر گرفته‌شده جزء بدترین شرایط ممکن بوده‌اند.

۴. ارزیابی عملکرد رله هوشمند جدید

در این بخش در گام اول، رله هوشمند جدید که ساختار آن در شکل (۱) نشان داده شده، پیاده‌سازی و عملکرد آن در قیاس با روش سستی ارزیابی می‌شود. در گام بعدی نیز مقاومت رله هوشمند در مقابل نویز احتمالی بررسی می‌شود. شایان ذکر است که مقایسه کیفی طرح رله دیفرانسل زمین جدید با یک روش مورد استفاده در رله‌های موجود، از حیث تأیید توانمندی بالقوه این طرح برای به‌کارگیری در رله‌های عملی آینده، لازم است هرچند که در بخش قبلی دقت برتر شبکه هوشمند آموزش‌یافته به‌عنوان هسته رله پیشنهادی مشاهده شد.

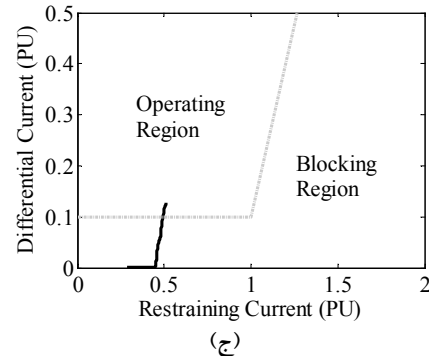
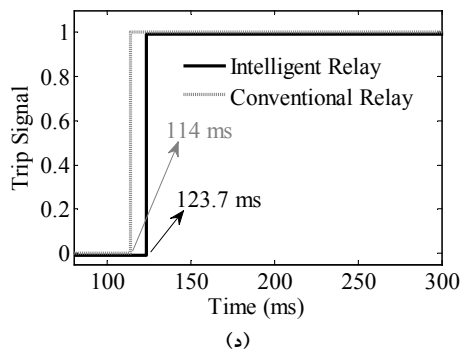
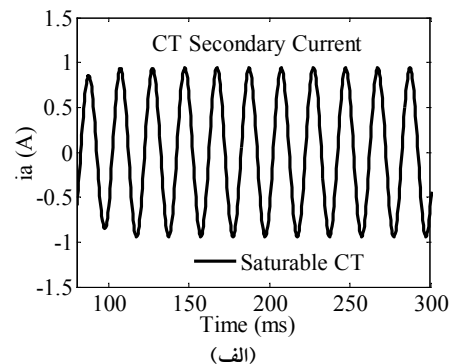
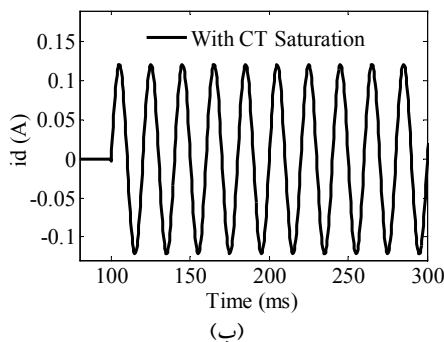
بایستی ذکر شود که مقدار آستانه جریان هادی خشی در طرح رله هوشمند صفر در نظر گرفته شده است تا این بخش از طرح حفاظتی در جلوگیری از عملکرد کاذب نقشی نداشته باشد و بدین گونه تحلیل بهتری از عملکرد هسته هوشمند رله بدست آید. از طرفی، مقدار آستانه جریان دیفرانسیل نیز ۱۰٪ فرض شده که یک مقدار نوعی حداقلی برای آن در رله‌های مرسوم می‌باشد و تنظیمات پیشنهادی سازنده برای رله مرسوم در نظر گرفته شده است [۲۷]. البته تنظیم این دو پارامتر بنا به مقتضیات

به طوری که دامنه جریان خطا نسبت به دامنه جریان هجومی بسیار کوچکتر باشد؛ زیرا تشخیص خطای داخلی در چنین شرایطی از هر شرایط دیگر بسیار سخت تر است. از این روی برای ارزیابی طرح پیشنهادی، ترانسفورماتور قدرت تحت مطالعه را در شرایطی که خطای سبکی با توصیفات موجود در بخش قبلی روی آن موجود است، به طور بی بار از سمت اتصال Y در زمان ۱۰۰ میلی ثانیه برق دار می کنیم. همان طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می شود، جریان عبوری این فاز به صورت ظاهری تنها دارای مشخصات جریان هجومی است. علت این امر مقاومت خطای بسیار بزرگ است که دامنه جریان خطا را بسیار محدود کرده، در حالی که جریان هجومی موجود در این فاز دارای دامنه قابل ملاحظه ای است. با توجه به شکل (۷-ب) تا هنگامی که اشباع شدید در ترانسفورماتورهای جریان رخ نداده (اوایل سیکل سوم)، جریان دیفرانسیلی، شکل موج تقریباً سینوسی با دامنه کوچک دارد که تنها ناشی از وجود خطاست. اما در ادامه با اشباع CTها دامنه این جریان به طور کاذب افزایش می یابد. با این حال، مطابق با شکل (۷-ج)، خط سیر جریان دیفرانسیلی روش سنتی وارد ناحیه عملکرد آن شده و روش سنتی عملکرد صحیح دارد. در نهایت با توجه به شکل (۷-د)، طرح جدید و روش سنتی با تأخیر زمانی به ترتیب ۲۳/۸ و ۱۴/۴ میلی ثانیه خطا را تشخیص می دهند. البته با توجه به سالم بودن شکل موج جریان دیفرانسیل در دو سیکل اول پس از برق دار شدن این صحت عملکرد قابل انتظار نیز بود.

باشد و در مقابل طرح پیشنهادی این مقاله، ۳۶/۹ میلی ثانیه برای این کار لازم داشته است (شکل ۶-د را مشاهده کنید). البته ۴/۵ میلی ثانیه از زمان صرف شده طرح هوشمند برای تشخیص خطا، مربوط به زمان اجرای طبقه بندی کننده PNN آموزش یافته است. بایستی به این نکته توجه شود که زمان عملکرد بزرگتر مربوط به طرح پیشنهادی (کمتر از دو سیکل) همچنان برای اهداف حفاظتی مناسب است و در برابر ایمنی بسیار بالاتر این طرح قابل قبول می باشد. البته عملاً خطای زمین در ترانسفورماتورهای قدرت محدود می شود و روش سنتی نیز چنین زمان تشخیص خطای کوچکی را تجربه نخواهد کرد.

۲.۴. صحت عملکرد حین برق دار شدن ترانسفورماتور خطادار

همان طور که در بخش پیشین دیده شد، طرح هوشمند پیشنهادی، عملکرد قابل قبولی در مقابل رخداد خطای داخلی در زمان کار عادی ماشین دارد. اما یکی از چالش های پیش روی یک طرح حفاظت ترانسفورماتور قدرت، عملکرد صحیح در تشخیص خطای داخلی حین برق دار شدن آن است؛ زیرا منطق داخلی رله که بایستی آن را در مقابل عملکرد بیجا حین عبور جریان های هجومی مغناطیس کننده مقاوم کند، ممکن است از عملکرد بجای رله هنگام برق دار شدن یک ترانسفورماتور قدرت دارای خطای داخلی، ممانعت کند. بنابراین بررسی عملکرد طرح پیشنهادی در چنین شرایطی ضروری است. بایستی ذکر شود که بدترین شرایط برای طرح حفاظتی نیز زمانی است که یک خطای داخلی سبک هنگام عبور جریان های هجومی مغناطیس کننده وجود داشته باشد،



شکل (۵): خطای داخلی سبک، الف. جریان فاز خطادار اندازه گیری شده توسط CT؛ ب. جریان دیفرانسیلی؛ ج. خط سیر جریان دیفرانسیلی روش سنتی؛ د. سیگنال های تریپ روش سنتی و طرح هوشمند پیشنهادی؛

۳.۴. ایمنی در برابر عملکرد کاذب

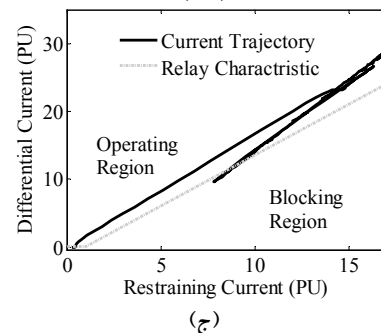
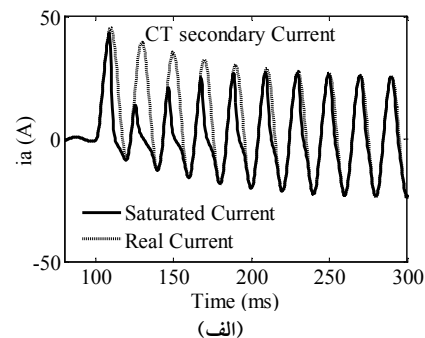
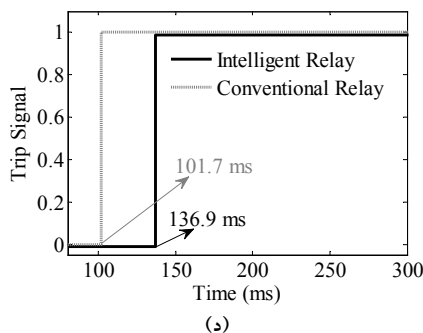
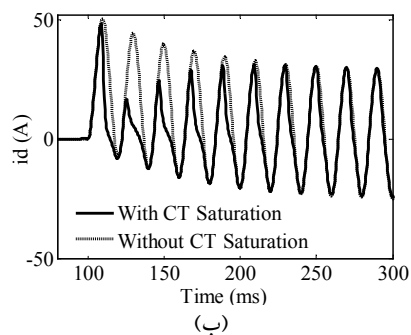
برای نشان دادن ایمنی برتر طرح پیشنهادی در مقایسه با روش سنتی، عملکرد آن حین یک مورد جریان هجومی شدید و یک مورد خطای سه فاز شدید مطالعه شده است. جریان هجومی در نظر گرفته شده حاصل از برق دار شدن ترانسفورماتور قدرت بی بار در لحظه ۱۰۰ میلی ثانیه در سمت Y است. البته پسماند مغناطیسی برای هسته ترانسفورماتور قدرت و همین طور ترانسفورماتورهای جریان به گونه ای لحاظ شده که دامنه های نسبتاً بزرگ برای جریان های هجومی به دست آید. برای مثال جریان فاز C ترانسفورماتور در شکل (۸-الف) نشان داده شده است. مطابق این شکل، مربوطه در این فاز در سیکل سوم پس از برق دار شدن، دچار اشباع شدید می شود. در نتیجه، پدیده اشباع در CTها اندک زمانی پس از برق دار شدن، جریان دیفرانسیلی مانند شکل (۸-ب) پدیدار می شود. بنا بر شکل (۸-ج)، خط سیر جریان دیفرانسیلی روش سنتی وارد ناحیه عملکرد آن شده که این به معنای عملکرد کاذب این رله است. مطابق شکل (۸-د)، زمان عملکرد رله کاذب ۳۱/۲ میلی ثانیه پس از برق دار شدن ترانسفورماتور قدرت است و این در حالی است که عطف به همین شکل، طرح پیشنهادی مذکور در برابر عملکرد کاذب کاملاً مقاوم بوده است.

خطای خارجی شدید در نظر گرفته شده یک خطای سه فاز متقارن با مقاومت صفر است که در لحظه ۱۰۰ میلی ثانیه در سمت Δ ترانسفورماتور قدرت رخ می دهد. جریان خطای یک فاز نمونه نشان داده شده در شکل (۹-الف)، اشباع شدید CT این فاز را در دومین سیکل پس از رخداد خطا نشان می دهد. همان طور که انتظار می رود، جریان دیفرانسیلی با دامنه قابل

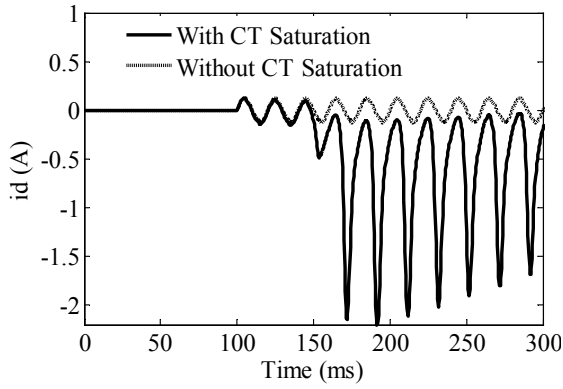
ملاحظه ای مطابق با شکل (۹-ب) ظاهر می شود و با توجه به خط سیر جریان دیفرانسیلی رله مرسوم نصب شده در سمت Δ ترانسفورماتور، این رله عملکرد کاذب خواهد داشت (شکل ۹-ج) مشاهده شود). با توجه به دیگرام های سیگنال تریپ مربوط به رله دیفرانسیل زمین مرسوم و طرح هوشمند پیشنهادی که در شکل (۹-د) قابل مشاهده است، به رغم اینکه رله مرسوم تنها ۳۰ میلی ثانیه پس از رخداد خطا عملکرد کاذب دارد، طرح جدید پیشنهادی در این مورد نیز عملکردی کاملاً پایدار داشته است.

۴.۴. عملکرد طرح هوشمند در حضور نویز

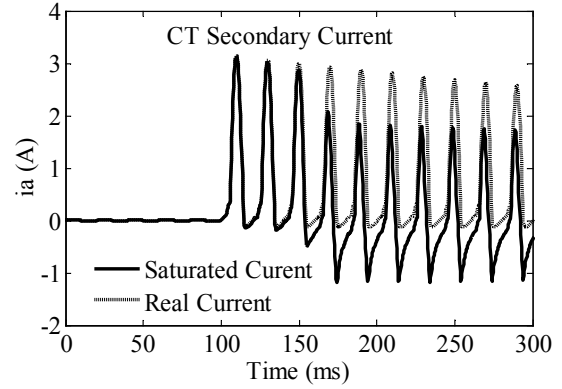
هرچند در سیستم های حفاظتی تلاش می شود تا با عبور سیگنال های ورودی از یک فیلتر پایین گذر نویزهای احتمالی موجود در آن ها حذف شوند، در پژوهش حاضر حساسیت طرح پیشنهادی به وجود نویز با در نظر گرفتن نویز به میزان ۳۰ دسی بل [۲۵] بررسی شده است. برای انجام این کار، هسته هوشمند رله یعنی PNN آموزش یافته که دقت ۹۸/۷۷ در تشخیص ورودی های تست داشت، دوباره با همان ورودی ها مورد تست قرار گرفت، به طوری که این بار نویز با مقدار مذکور به این ورودی ها اضافه شده بود. با این حال به رغم وجود نویز نتایج حاصل با شرایط بدون نویز هیچ تفاوتی ندارد و دقت تشخیص شبکه آموزش یافته، این بار نیز همان ۹۸/۷۷ است. البته با توجه به اینکه در این روش تنها از ریخت شناسی شکل موج استفاده شده و ویژگی هایی مبتنی بر محتوای فرکانس بالای شکل موج های ورودی یا ابزارهایی مانند مشتق و تبدیل موجک که نوعاً نسبت به نویز حساس اند به کار گرفته نشده است، این نتیجه غیر قابل انتظار نیز نبود.



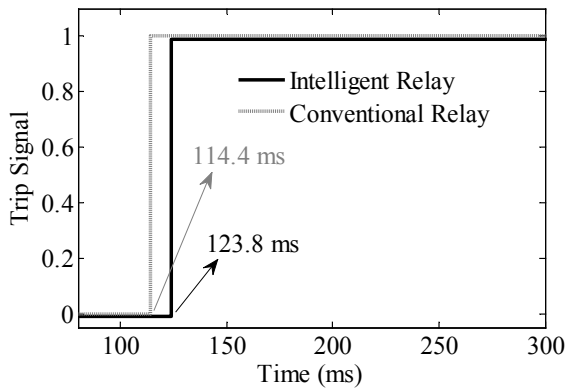
شکل (۶): خطای داخلی شدید، الف. جریان فاز خطا دار اندازه گیری شده توسط CT؛ ب. جریان دیفرانسیلی؛ ج. خط سیر جریان دیفرانسیلی روش سنتی؛ د. سیگنال های تریپ روش سنتی و طرح هوشمند پیشنهادی



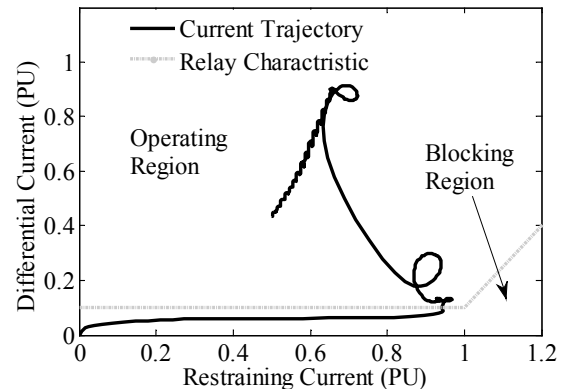
(ب)



(الف)



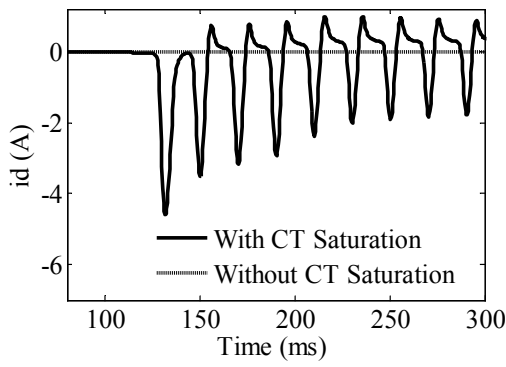
(د)



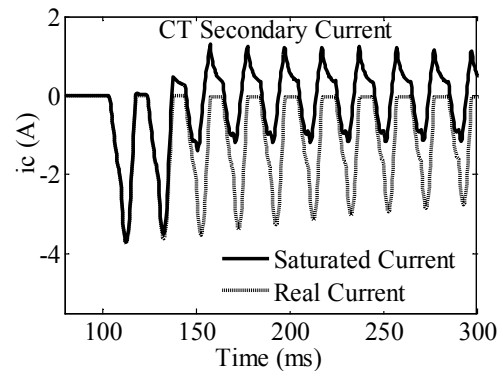
(ج)

شکل (۷): عبور جریان هجومی به همراه خطای داخلی سبک، الف. جریان فاز خطدار اندازه‌گیری شده توسط CT؛

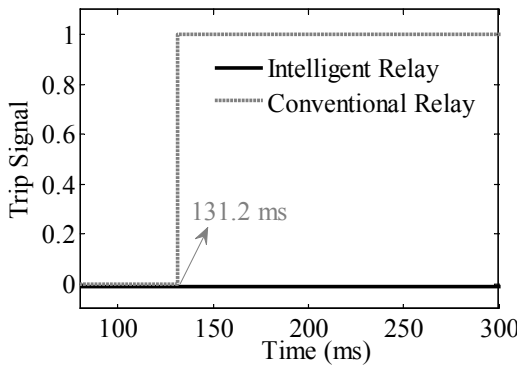
ب. جریان دیفرانسیلی؛ ج. خط سیر جریان دیفرانسیلی روش سنتی؛ د. سیگنال‌های تریپ روش سنتی و طرح هوشمند پیشنهادی



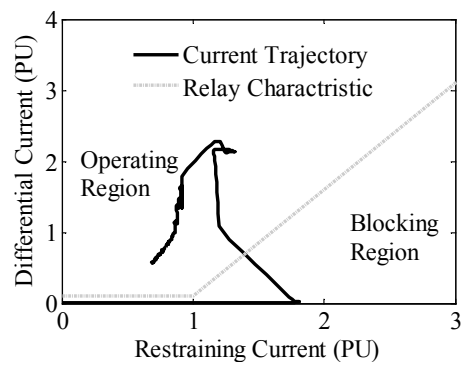
(ب)



(الف)



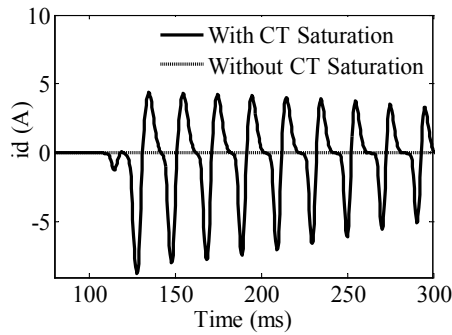
(د)



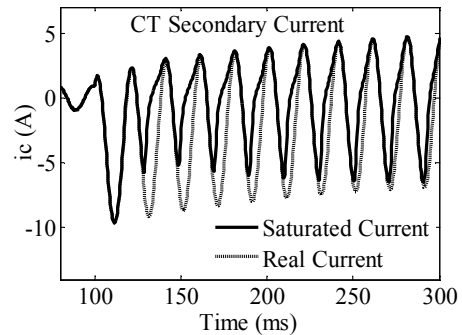
(ج)

شکل (۸): برق‌دار شدن ترانسفورماتور بی‌بار از سمت Y، الف. جریان یک فاز نمونه اندازه‌گیری شده توسط CT؛

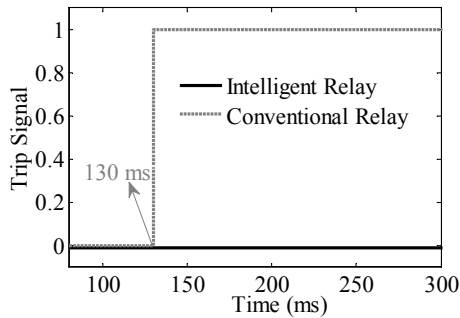
ب. جریان دیفرانسیلی؛ ج. خط سیر جریان دیفرانسیلی روش سنتی؛ د. سیگنال‌های تریپ روش سنتی و طرح هوشمند پیشنهادی



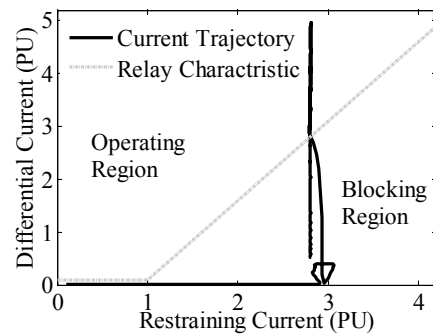
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۹): خطای سه فاز با مقاومت صفر در سمت Δ ، الف. جریان یک فاز نمونه اندازه گیری شده توسط CT؛

ب. جریان دیفرانسیلی؛ ج. خط سیر جریان دیفرانسیلی روش سنتی؛ د. سیگنال های تریپ روش سنتی و طرح هوشمند پیشنهادی

کرده است که این خود مزیت مهمی برای این روش است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره های BNUT/۳۷۰۱۹۹/۹۷ و BNUT/۳۹۰۰۶۶/۹۷ بسیار سپاسگزار می کنند.

ضمیمه ها

جدول (پ-۱): مقادیر نامی CT1 و CT2

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 اهم	مقاومت سیم بندی CT
۳۰ VA	بردن کل

جدول (پ-۲): مقادیر نامی CT3 و CT4

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 اهم	مقاومت سیم بندی CT
۳۰ VA	بردن کل

۵. نتیجه گیری

رله دیفرانسیل زمین امپدانس پایین، حفاظتی سریع و حساس برای ترانسفورماتور قدرت در برابر خطاهای فاز به زمین احتمالی روی ترمینال یا سیم پیچ آن فراهم می آورد. با این حال، عملکرد صحیح این رله متأثر از اشباع ترانسفورماتورهای جریان است. بنابراین، عملکرد کاذب رله مذکور حین خطاهای خارجی با دامنه جریان خطای بزرگ و همین طور طی عبور جریان هجومی مغناطیس کننده ترانسفورماتور قدرت محتمل است. در این مقاله، شبکه عصبی احتمالی آموزش یافته بر اساس نتایج شبیه سازی شرایط مختلف کاری ترانسفورماتور شامل خطای داخلی و خارجی و همین طور جریان هجومی، برای استفاده به عنوان هسته هوشمند یک طرح حفاظت دیفرانسیل زمین جدید پیشنهاد شده است. نتایج پیاده سازی این روش و مقایسه عملکرد آن با برخی از دیگر روش ها، برتری روش هوشمند پیشنهادی را از لحاظ دقت تشخیص اثبات کرده است. از طرفی مقایسه دقیق تر، صحت عملکرد و سرعت طرح پیشنهادی در قیاس با روش سنتی نشان داده است که طرح هوشمند جدید برای حصول اهداف حفاظتی در کاربردهای عملی نیز مناسب است. از مزایای دیگر روش پیشنهادی، عدم وابستگی آن به نوع و مقادیر نامی ترانسفورماتورهای قدرت و جریان است؛ زیرا از الگوهای نمونه برای آموزش طبقه بندی کننده هوشمند PNN استفاده شده است. از سوی دیگر، ارزیابی حساسیت هسته هوشمند رله نسبت به وجود نویز در ورودی آن، حفظ دقت بالایش را برای چنین شرایطی تأیید

جدول (پ-۳): مقادیر نامی ترانسفورماتور قدرت

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

مراجع

- [۱] کی‌نیا، فرشید، افضل، پیمان، اسماعیلی، سعید، «نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی به‌منظور بهره‌وری طول عمر ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تأثیر فرسودگی بر قابلیت اطمینان»، مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۷، شماره ۳، صفحه ۳۱-۲۰، ۱۳۹۶.
- [2] Verzosa, Q. and Lee, W.A., "Testing Microprocessor-Based Numerical Transformer Differential Protection", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 1, pp. 56-64, 2017.
- [۳] باقری، سجاد، مروج، زهرا، قره‌پتیان، گنورک، «تمایز میان عیوب مکانیکی سیم‌پیچ، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریان‌های هجومی در ترانسفورماتورها با استفاده از روش ترکیبی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۱، صفحه ۳۲-۲۱، ۱۳۹۷.
- [4] Saleh, S.A., Scaplen, B. and Rahman, M.A., "A New Implementation Method of Wavelet-Packet-Transform Differential Protection for Power Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 2, pp. 1003-1012, 2011.
- [5] Moravej, Z., Abdoos, A.A. and Sanaye-Pasand, M., "Power Transformer Protection Using Improved S-Transform", Electric Power Components and Systems, Vol. 39, No. 11, pp. 1151-1174, 2011.
- [6] Balaga, H., Gupta, N. and Vishwakarma, D.N., "GA Trained Parallel Hidden Layered ANN Based Differential Protection of Three Phase Power Transformer", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 67, pp. 286-297, 2015.
- [7] Thote, P.B., Daigavane, M.B., Daigavane, P.M., Gawande, S.P., "An Intelligent Hybrid Approach Using KNN-GA to Enhance the Performance of Digital Protection Transformer Scheme", Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 40, No. 3, pp. 151-161, 2017.
- [8] Apostolopoulos, C. and Tsakiris, D., "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.
- [9] Labuschagne, C., Merwe, I.V.D. and Enterprises, E., "A Comparison between High-Impedance and Low-Impedance Restricted Earth-Fault Transformer Protection", in Tech Paper, Schweitzer Eng Labs, pp. 1-9, 2007.
- [10] Krstivojevic, J.P., Djuric, M.B., "A New Algorithm for Transformer Ground Fault Protection", MedPower 2014 (IET Conferences), Athens (Greece), 2-5 November 2014.
- [11] Krstivojevic, J.P. and Djuric, M.B., "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.
- [12] Pihler, J., Grcar, B. and Dolinar, D., "Improved Operation of Power Transformer Protection using Artificial Neural Network", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, pp. 1128-1136, 1997.
- [13] Subramanian, P.V., Ajitha, L., "Practical Considerations for High Impedance Restricted Earth Fault Relay Settings", Journal of the Institution of Engineers, Vol. 96, No. 1, pp. 107-110, 2015.
- [14] Nim Taj, B., Mahmoudi, A. and Kahourzade, S., "Comparison of Low-Impedance Restricted Earth Fault Protection in Power-Transformer Numerical Relays", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 12, pp. 2458-2474, 2011.
- [15] Bertrand, P., Gotzig, B. and Vollet, C., "Low Impedance Restricted Earth Fault Protection", Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam (Netherlands), 9-12 April 2001.
- [16] Kang, J., Byun, S., Yang, J. and Cho, J., "Analysis and Solutions to Unusual Differential Relay Misoperation during External Disturbance", 42nd Western Protective Relay Conference, Washington (USA), 19-22 October, 2015.
- [17] Transformer Management Relay, UR series Instruction Manual, Re-vision 4.8 xs, GE Co, Technical Documents of T60.
- [18] Numerical Differential Protection Relay for Transformers, Generators, Motors, and Branch Points 2003, Technical Documents of 7UT6, Siemens Co.
- [19] Davarpanah, M., Sanaye-Pasand, M., Irvani, R., "Performance Enhancement of the Transformer Restricted Earth Fault Relay", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 1, pp. 467-474, 2012.
- [20] Krstivojevic, J.P., Djuric, M.B., "A New Method of Improving Transformer Restricted Earth Fault Protection", Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 41-48, 2014.
- [21] Krstivojevic, J.P., Djuric, M.B., "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.
- [22] IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers, IEEE Standard C37.91, New York, 3rd edition, May 2008.
- [23] Tripathy, M., Maheshwari, R.P., Verma, H.K., "Application of Probabilistic Neural Network for Differential Relaying of Power Transformer", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 1, No. 2, pp. 218-222, 2007.
- [۲۴] عبدوس، علی‌اکبر، مروج، زهرا، صنایع‌پسند، مجید، «حفاظت دیفرانسیل هوشمند با استفاده از پردازش سیگنال زمان»، رساله دکتری تخصصی، دانشگاه سمنان، سمنان، صفحه ۴۰-۴۱، ۱۳۹۱.
- [25] Gil, M. and Abdoos, A.A., "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.
- [26] Paithankar, Y.G. and Bhide, S.R., "Fundamental of Power System Protection", PHI Learning Private Limited, pp. 80-81, 2010.
- [27] MiCOM P642, P643 & P645-Transformer Protection Relays, Technical Manual, pp. 321-326, 2011.