طراحي حفاظت ديستانس پايدار در برابر رفتار گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني با استفاده از شبكه‌هاي عصبي

حسن خراشادي‌زاده
عضو هيأت علمي گروه مهندسی برق قدرت، دانشكده فني مهندسي، دانشگاه بيرجند

چكيده

ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني كه عموماً در خطوط انتقال به كار مي‌روند در هنگام ايجاد خطا دچار حالات گذرايي مي‌شوند كه بر عملكرد رله‌هاي حفاظتي الكترونيكي و ديجيتالي به دليل سرعت عملكرد بالا و حساسيت زياد آنها تأثير مي‌گذارند. اين مقاله ابتدا يك مرور كلي بر ساختمان و رفتار گذراي يك ترانسفورماتور ولتاژ خازني خواهد داشت آنگاه تأثير رفتار گذراي اين ترانسفورماتور ولتاژ بر عملكرد رله ديستانس بررسي خواهد شد. در نهايت روشي براي كاهش تأثير اين رفتار گذرا بر عملكرد رله ديستانس به كمك شبكه‌هاي عصبي ارائه خواهد شد. نتايج حاصل از شبيه‌سازي نشان مي‌دهد كه اين روش داراي سرعت و حساسيت مناسبي براي تمامي خطاها، خصوصاً خطاهايي كه در نزديكي مرز ناحيه حفاظتي رله رخ مي‌دهد، مي‌باشد و در برابر پديده‌هايي همچون رفتار گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني، مقاومت خطا، مؤلفه dc جريان كه رله‌هاي مرسوم را تحت تأثير قرار مي‌دهد، پايدار و غير حساس مي‌باشد.

كلمات كليدی: رله ديستانس، ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني، اضافه برد و شبكههاي عصبي.

A Novel Distance Protection Immune to the Effects of CVT Transients Using Artificial Neural Network

H. Khorashadi-Zadeh
Department of Power Eng., University of Birjand

Abstract

This paper presents the design of a novel method for improvement of the operation of distance relays during capacitive voltage transformer transients using artificial neural network. The proposed module uses voltage and current signals to learn the hidden relationship existing in the input patterns. Simulation studies are preformed and the influence of changing system parameters, such as fault resistance and source impedance is studied. Details of the design procedure and the results of performance studies with the proposed relay are given in the paper. Performance studies show that the neural networks improve the operation of distance relays during capacitive voltage transformer transients and reduce the effects of system variables such as fault resistance, source impedance and decaying DC offset on the decision made by the distance relay.

Key words: Distance relay, CVT transient, Artificial neural network.

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني ابزاري جهت تبديل ولتاژهـاي بالا به سيگنالهاي مناسب براي سيـستمهاي حفـاظتي و كنترلـي در سيستمهاي فشارقوي و فوق فشارقوي مـي‌باشـند. اسـتفاده از ترانـسفورماتورهاي ولتـاژ خـازني در سيـستمهاي فـشار قـوي هزينه‌هاي تبديل ولتاژ را به شدت كاهش مي‌دهـد. بـا ايـنحـال، ويژگيهاي ساختاري ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني باعث مي‌شود تا رفتار گذراي نامناسبي در هنگام رخـداد اتـصال كوتـاه داشـته باشد. اين رفتار گذرا عموماً موجب عملكرد نادرست و يا تأخير در ارسال فرمان قطع توسط رله‌هاي حفاظتي خصوصاً رله ديستانس مي‌شود.

هنگاميكه در اثر خطا، ولتاژ به شدت كاهش مي‌يابد ولتاژ خروجي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني به دليل وجود عناصر ذخيره‌ساز انرژي (سلف و خازنهاي ترانسفورماتور ولتاژ خازني) و مشخصه غير خطي هسته ترانسفورماتور دقيقاً از ولتاژ ورودي تبعيت نمي‌كند و يك دوره گذرا در عملكرد ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني به وجود مي‌آيد.

عملكرد گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني مؤلفه اصلي ولتاژ خطا را كاهش مي‌دهد. اين كاهش در مؤلفه اصلي ولتاژ موجب كاهش امپدانس محاسبه شده مي‌گردد. اگر كاهش ولتاژ اصلي به اندازه كافي زياد باشد، زون يك رله ديستانس، عملكرد بيجا خواهد داشت و در مواردي‌كه خطا خارج زون حفاظتي است، عمل مي‌نمايد.

يك روش معمول براي رفع مشكل اضافه برد رله ديستانس ناشي از رفتار گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني، كاهش برد زون يك رله مي‌باشد. روش ديگر، ايجاد تأخير در عملكرد ناحيه حفاظتي يك رله ديستانس است. اين تأخير از عملكرد رله در هنگام حالات گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني جلوگيري مي‌كند. اين روش باعث بالا رفتن زمان پاكسازي خطاهاي نزديك رله مي‌شود [۱]. در مرجع [۲] روشي براساس تشخيص نسبت امپدانس منبع به امپدانس سيستم پيشنهاد شده است. اين روش تا حدودي قادر به رفع اين مشكل در رله‌هاي ديستانس مي‌باشد. در مرجع [۳] روشي براساس استفاده از فيلتر ديجيتال غير برگشتي در يك رله ديستانس براي حذف رفتار گذراي ترانسفورماتور ولتـاژ خازني ارائه شده است. در سال ۱۹۹۸ نيز ايسكوسكي و همكارانـش روشي را مبني بر استفاده از فيلتري كه تابع انتقال آن معكوس تابع انتقال ترانسفورماتور ولتاژ خازني باشد پيشنهاد نمودند [۵-۴]. اما فيلتر پيشنهادي داراي تأخير زيادي بوده و علاوه بر اين تابع انتقالي كه براي ترانسفورماتور ولتاژ خازني در نظر گرفته شده است، در نقطه كار خطي شده و در كل گستره عملكرد ترانسفورماتور ولتاژ خازني مدل در نظر گرفته شده صادق نمي‌باشد. در مرجع [۶] الگوريتمي براساس شبكه‌هاي عصبي براي حذف اثر رفتار گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني ارائه شده است. در اين روش با استفاده از شبكه‌هاي عصبي معكوس تابع انتقال ترانسفورماتور ولتاژ خازني مدل شده است.

در اين مقاله رله ديستانسي براساس كاربرد شبكه‌هاي عصبي پيشنهاد شده است كه در برابر رفتار گذراي ترانـسفورماتور ولتـاژ خازني پايدار و غير حساس است. شبكه‌هاي عصبي مصنوعي جزء دسته‌اي از سيستمهايي قرار دارند كه با پـردازش روي داده‌هـاي تجربي دانش يا قانون نهفته در وراي داده‌ها را به سـاختار شـبكه منتقل مي‌كنند. اين سيستمها براساس محاسبات روي داده‌هـاي عددي يا مثالها قوانين كلي را فرا مـي‌گيرنـد و بنـابراين بـه آنهـا سيستمهاي هوشمند اطلاق مي‌شود. شبكه‌هاي عصبي مـصنوعي با وجود اينكه از نظر توانائيها با سيستمهاي عصبي طبيعـي قابـل قياس نيستند ويژگيهايي را دارا مي‌باشند كه آنها را در بعـضي از كاربردها مانند تشخيص الگو، كنترل ربات و به طـور كلـي هرجـا كه نياز به يادگيري يك نگاشت خطي و غير خطي باشد، متمـايز مي‌نمايد. از جملة ايـن ويژگيهـا مـي‌تـوان از قابليـت يـادگيري، قابليت تعميم، پردازش موازي و مقاوم بودن شبكه‌هاي عصبي نام برد. قابليت شبكه‌هاي عصبي محققين سيستمهاي قدرت را براي حـل مشـكلات، در زمينه‌هاي مختلف مانند پخش بار اقتـصادي، حفاظت، كنتـــرل و مونيتـورينـــگ[1] سيـستـمهاي قـدرت بـــه سمت كاربرد شبكه‌هاي عصبي جذب نمـوده اسـت [۷]. يكـي از دلايل پيشنهاد كاربرد شبكه‌هاي عصبي مصنوعي در قدرت ناشي از قابليت بالاي سيستمهاي عصبي مـصنوعي در تـشخيص نـويز، مقاوم بودن، تلرانس خطا، قابليت كلـي‌نگـري[2] و . . . آنهـا بـوده است. قابليـت مهـم مقـاوم بـودن شـبكه‌هـاي عـصبي در مقابـل تغييرات پارامترهاي سيستم نيز عامل مهمـي در توجـه بـه ايـن شبكه‌ها در كاربرد براي حفاظت سيستمهاي قدرت مي‌باشد.

1- Monitoring
2- Generalization

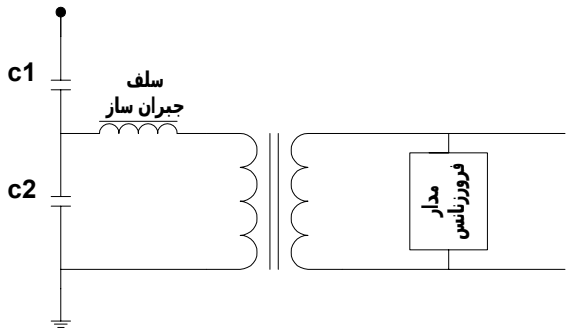
در زمینه حفاظت، قابلیت شبکه‌هاي عصبي در تشخیص الگـو بـا اسـتقبال ویـژه‌اي روبـرو شـده اسـت. در اغلـب الگوریتمهـاي حفاظتي ولتاژ و جریان اندازه‌گیري شده در محل نصب رله مـورد استفاده قرار گرفته و با توجه به ایـن اطلاعـات ورودي، وضـعیت سیستم تخمین زده مي‌شود. بدین طریق الگوریتمهاي حفـاظتي با دستهبندي حالات مختلف سیستم بـه حالـت عـادي و حالـت خطا و . . . عملکردهاي مناسب لازم را از خود بروز مي‌دهنـد. در واقع مي‌توان گفت در اغلـب روشـهاي حفـاظتي یکـي از اهـداف اصـلي الگـوریتم دسـته‌بنـدي مناسـب حـالات سیـستم از روي الگوهاي اطلاعات ورودي مـي‌باشـد. بـا توجـه بـه قابلیـت بـالاي شبکه‌هاي عصبي در تشخیص و دسته‌بنـدي الگوهـا استفاده از این روش در شبکه‌هاي قدرت مناسب به نظر مي‌رسد. از جمله از کاربردهاي شبکه‌هاي عصبي در حفاظت مي‌تـوان از کاربردهـاي آن در تشخیص خطا، تعیین نوع خطا، تشخیص جهت خطا یـاد کرد [۱۲-۸].

در این مقاله ضمن بررسي تأثیر رفتار گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني بر عملکرد رله دیستانس، روشي براساس کاربرد شبکه‌هاي عصبي جهت بهبود عملکرد رله دیستانس پیشنهاد خواهد شد. مطالعات شبیه‌سازي قابلیت این روش را در تشخیص انواع خطاها در شرایط مختلف سیستم قدرت خصوصاً در شرایط گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني نشان مي‌دهد. الگوریتم پیشنهادي با الگوریتم فوریه تمام سیکل نیز مقایسه شده است و نتایج حاصل از مقایسه این دو روش، کارایي بالاي این الگوریتم را نسبت به روشهاي مرسوم نشان مي‌دهد.

۲-سـاختمان ترانـسفورماتورهاي ولتـاژ خـازني و رفتـار گذراي آنها

ترانسـفورماتورهاي ولتاژ خازني مطابق شکل (۱) از یك ترانسـفورماتور کاهنـده، سلف جبـرانسـاز، خازنـهاي کوپـلاژ (C1,C2)، و مدار میرا کننده فرورزونانس تشکیل شده است.

خازنهاي کوپلاژ به صورت مقسم ولتاژ براي کاهش ولتاژ خط به یك سطح متوسط عموماً ۵ تا ۲۵ کیلوولت به کار مي‌روند. سلف جبران‌ساز اثر راکتانس خازنهاي کوپلاژ را در فرکانس سیستم حذف مي‌نماید. این حذف راکتانس موجب جلوگیري از شیفت فاز میان ولتاژ اولیه و ولتاژ ثانویه در مؤلفه اصلي مي‌گردد. ترانسفورماتور کاهنده نیز سطح ولتاژ میاني را به ولتاژ نامي رله تبدیل مي‌کند.

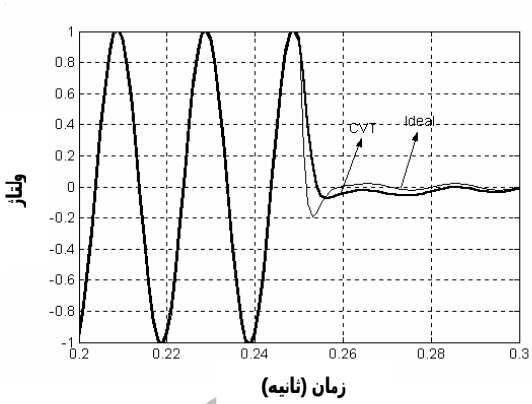


شکل ۱- ساختار کلي یك ترانسفورماتور ولتاژ خازني

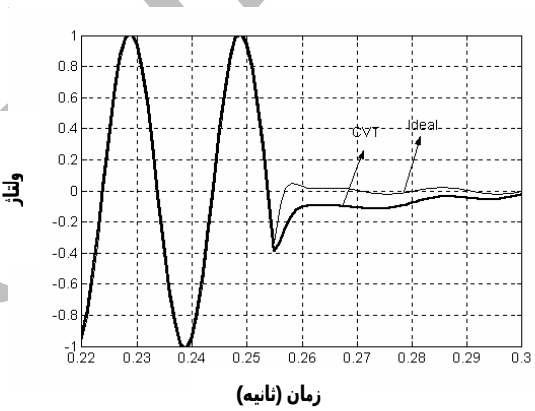
سلف جبران ساز و ترانسفورماتور کاهنده داراي هسته آهني مي‌باشند و علاوه بر تلفات مسي و آهني، موجب ایجاد پدیده فرورزونانس به دلیل رفتار غیر خطي هسته آهني نیز مي‌شوند. سازندگان ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني با بررسي پدیده فرورزونانس مدار مناسبي جهت میرا کردن آن در نظر مي‌گیرند. این مدار عموماً در ثانویه ترانسهاي کاهنده براي جلوگیري از اضافه ولتاژ در اثر فرورزونانس به کار برده مي‌شود.

در صورتیکه خطا منجر به کاهش ناگهاني ولتـاژ خـط گـردد، ولتاژ ثانویه نمی‌تواند به طور لحظه‌اي تغییـر کنـد. ایـن موضـوع ناشـي از وجـود عناصـر ذخیـره‌سـاز انـرژي (خازنهـاي کـوپلاژ و سلفهاي جبران‌ساز) و مشخصه غیر خطي هسته اسـت [۱۳و۱۴]. این پدیده منجر به ایجاد رفتار گـذرا در عملکـرد ترانـسفورماتور ولتاژ خازني شده و موجب مي‌شود تا ولتـاژ ثانویـه آن در چنـین شرایطي از ولتاژ اولیه تبعیت نکند.

عملکرد گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني به شدت بستگي به زمان شروع خطا دارد. در شکل (۲) و (۳) رفتار یك ترانسفورماتور ولتاژ خازني در هنگام ایجاد خطا در نقطه پیك و صفر ولتاژ نشان داده شده است. در این شکلها ولتاژ واقعی ثانویه ترانسفورماتور ولتاژ خازني و ولتاژ ایده‌ال ثانویه ترانسفورماتور براي یك نوع خطا در دو زاویه مختلف ۰ و ۹۰ درجه نشان داده شده است. چنانچه در شکل (۲) مشاهده مي‌شود خروجي ترانسفورماتور ولتاژ تا t = ۰/۳ ثانیه با خروجي ایده‌آل ترانسفورماتور مغایرت دارد در حالیکه در شکل (۳) دیده مي‌شـود کـه با زاویه شروع خطاي صفر درجه این تفاوت بعد از t = ۰/۳ ثانیه نیز همچنان ادامه دارد. براي زواياي شروع دیگر وضعیت خروجي تراسفورماتور ولتاژ بین این دو وضعیت خواهد بود.



شکل ۲- خروجي يك ترانس ولتاژ خازني در هنگام رخداد خطا در پيك ولتاژ



شکل ۳- خروجي يك ترانس ولتاژ خازني در هنگام رخداد خطا در صفر ولتاژ

هر بخشي از ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني به نحوي در رفتار گذراي آن تأثير مي‌گذارد. مثلاً نسبت دور بالاتر ترانسفورماتور كاهنده تأثير بار را روي خازنهاي تراسفورماتورهاي ولتاژ خازني كاهش مي‌دهد. قاعدتاً بارگيري متفاوت از خازنهاي كوپلاژ ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني بر روي شكل و دوره حالت گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني تأثير دارد.

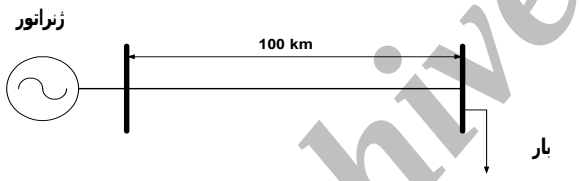
خازنهاي كوپلاژ نيز تأثير زيادي در رفتار گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني دارند. خازنهاي كوپلاژ از تعدادي واحد خازني متصل شده به يكديگر تشكيل مي‌شوند. تعداد واحدهاي خازني بستگي به سطح ولتاژ اوليه دارد. هر چه ميزان خازنها بيشتر شود دامنه گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني كاهش بيشتري خواهد داشت. در واقع افزايش مقدار خازن ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني قيمت آن را افزايش مي‌دهد اما پاسخ گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني را كاهش خواهد داد. از اين لحاظ طراح بايد يك بهينه‌سازي ميان كارايي و قيمت ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني انجام دهد.

مدارت ميراساز فرورزونانس نيز به دو نوع اكتيو و پسيو تقسيم مي‌گردد. براي اطلاع از ساختمان آنها مي‌توان به مرجع [۱۵] مراجعه نمود. ميتوان نشان داد كه مدارت ميراساز پسيو تأثير بسيار كمتري نسبت به مدارت ميراساز اكتيو بر حالات گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني دارند [۱۵].

۳- عملكرد رله ديستانس در برابر رفتار گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني

۳-۱- شبيه سازي سيستم قدرت

براي بررسي عملكرد رله ديستانس يك سيستم قدرت ۴۰۰ كيلوولت مشابه شكل (۴) به كمك نرمافزار EMTDC شبيه‌سازي شده است [۱۶]. مشخصات اين سيستم در جدول (۱) داده شده است. چنانچه در جدول (۱) مشاهده ميشود نسبت امپدانس سيستم (نسبت امپدانس منبع به امپدانس خط) از ۰/۱ تا ۳۰ متغير در نظر گرفته شده است. اين موضوع به دليل وابستگي شديد رفتار گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني به اين پارامتر مي‌باشد.

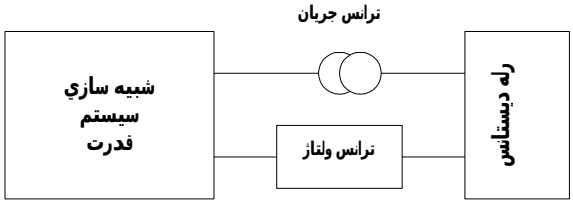


شکل ۴- سيستم شبيهسازي شده براي توليد اطلاعات

جدول ۱- مشخصات سيستم شكل (۴)

امپدانس واحد طول خط Ω/km	۰/۰۳۸۲+ j ۰/۴۳۲
امپدانس بار Ω	۳۰
نسبت امپدانس سيستم	۰/۱-۳۰

براي بررسي رفتار رله ديستانس در برابر حالات گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني نتايج حاصل از شبيه‌سازي سيستم قدرت مطابق شكل (۵) از مدلهاي ترانسفورماتور جريان و ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني عبور داده شده و در اختيار رله ديستانس قرار گرفته است و براي اينكه رفتار رله تنها در برابر رفتار گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني بررسي گردد مدل ترانس جريان به صورت ايده‌ال فرض شده است.



شكل ۵- طرح كلي بهكار رفته جهت بررسي رفتار رله ديستانس

مدل در نظر گرفته شده براي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني مطابق شكل (۱) شامل خازنهاي كوپلاژ، سلف جبران ساز، ترانس كاهنده و مدار ميرا كننده فرورزونانس و بردن ميباشد. مقادير اين پارامترها در جدول (۲) آورده شده است.

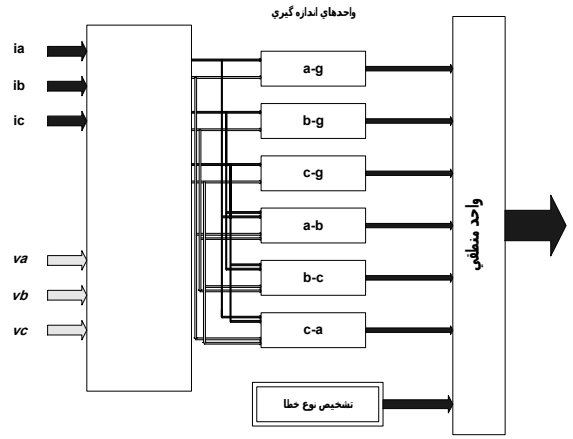
جدول ۲- پارامترهاي ترانسفورماتور ولتاژ خازني

اندوكتانس نشتي و مقاومت سيم پيچ اوليه	1.4kΩ, 1.2H
اندوكتانس نشتي و مقاومت سيم پيچ ثانويه	0.125Ω, 0.125mH
نسبت تبديل تراسفورماتور كاهنده	22 (kV): 0.110 (kV)
C1 (nF)	2.2
C2 (nF)	0.5
L (H) (راكتور جبران ساز)	253.4
فركانس(Hz)	50
ولتاژ نامي (kV)	400

۳-۲- شبيهسازي رله ديستانس

براي بررسي رفتارگذراي رلة ديستانس، يك رلة ديستانس ديجيتالي با الگوريتم فوريه تمام سيكل، شبيهسازي شده است. ساختار رلة ديستانس ديجيتالي شبيهسازي شده به صورت شكل (۶) ميباشد.

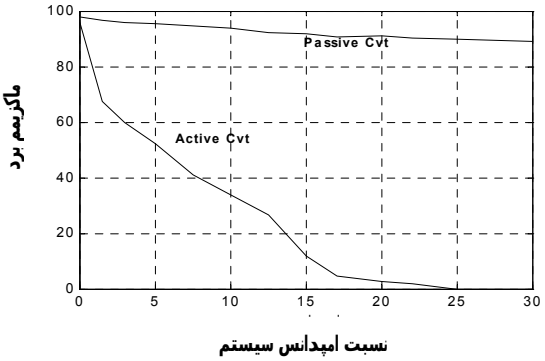
چنانچه در شكل ديده ميشود ابتدا نمونههاي ولتاژها و جريانهاي سه فاز از فيلتر آنتي اليازينگ عبور داده ميشوند سپس از اين نمونهها با فركانس ۱ kHz نمونهبرداري ميشود بعد از حذف مؤلفه dc، جريانها و ولتاژها در اختيار ۶ المان اندازهگيري امپدانس قرار خواهد گرفت. واحد منطقي رله نيز براساس خروجي واحد تعيين نوع خطا[1] و المانهاي اندازهگيري فرمان مناسب را صادر خواهد كرد.



شكل ۶- ساختار رلة ديستانس شبيهسازي شده

۳-۳- عملكرد رله ديستانس

ناحيه حفاظتي اول رله ديستانس ۸۰ % خط انتقال در نظر گرفته شده است. با ايجاد خطا در انتهاي مرز ناحيه حفاظتي، خطاهاي نزديك مرز شبيهسازي شده و اطلاعات به دست آمده بعد از عبور از مدل ترانس جريان و ترانس ولتاژ خازني در اختيار رله ديستانس قرار گرفته است. تست براي هر دو حالتيكه ترانس ولتاژ داراي ميراكننده فرورزونانس اكتيو و مدار ميرا كننده پسيو ميباشد براي نسبت امپدانسهاي سيستم متفاوت ۱از ۰/۱ تا ۳۰ انجام شده است. نتايج حاصل از اين تست در شكل (۷) مشاهده ميشود. منحني مشخص شده در اين شكل ماكزيمم تنظيم برد رلهاي كه براي خطاي انتهاي خط عمل نميكند (دچار اضافه برد نميشود) را مشخص ميكند.

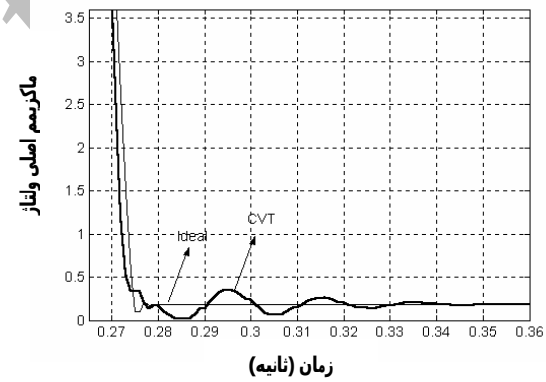


شكل ۷- نتايج ناشي از تست رله ديستانس براي ترانسهاي ولتاژ خازني با مدار ميراكننده اكتيو و پسيو

1- Phase-Selection

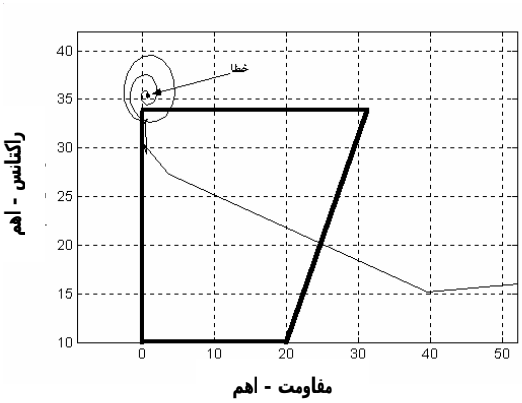
چنانچه در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد هنگامیکه ترانسفورماتور ولتاژ خازني داراي ميرا كننده اكتيو است براي جلوگيري از اضافه برد رله ديستانس براي نسبت امپدانس سيستم بزرگتر از ۲۴، رله ديستانس زون يك خود را از دست مي‌دهد ولي هنگاميكه ترانسفورماتور ولتاژ خازني داراي ميرا كننده پسيو است در حوزه وسيعي از نسبت امپدانسهاي سيستم، برد ناحيه يك نياز به تغيير چنداني ندارد.

علت اضافه برد رله ديستانس در اثر حالت گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني، كاهش مؤلفه اصلي ولتاژ مي‌باشد. اين موضوع در شكل (۸) نشان داده شده است. چنانچه در شكل ديده مي‌شود در حالت گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني دامنه ولتاژ نسبت به حالت ايده‌ال آن كاهش پيدا مي‌كند و اين كاهش موجب كاهش امپدانس ديده شده توسط رله و اضافه برد آن خواهد شد.



شكل ۸- كاهش مولفه اصلي ولتاژ در حالت گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني

شكل (۹) مسير تغييرات امپدانس براي يك خطاي دو فاز به زمين كه در ۸۵ كيلومتري از رله ديستانس رخ داده است را نشان مي‌دهد. مشاهده مي‌شود كه امپدانس محاسبه شده توسط رله به دليل رفتار گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني از داخل محدوده يك عبور كرده و براي مدتي در داخل آن باقي مانده است. از آنجائيكه در عملكرد ناحيه حفاظتي اول رله ديستانس، تأخيري در نظر گرفته نمي‌شود رله ديستانس عمل خواهد نمود.



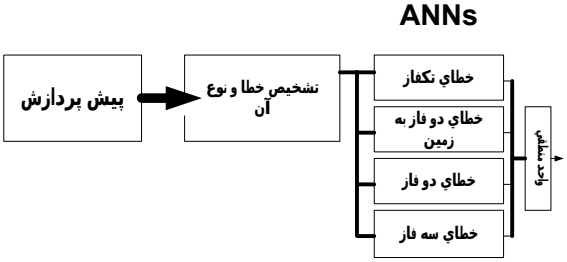
شكل ۹- مسير تغييرات امپدانس ديده شده توسط رله ديستانس در هنگام يك خطاي دو فاز به زمين در ۸۵ كيلومتري از محل رله

۴- روش پيشنهادي براي جلوگيري از اضافه برد رله

با توجه به نتايج به دست آمده از بخش قبلي مي‌توان دريافت كه اضافه برد رله ديستانس در صورتيكه شبكه داراي نسبت امپدانس سيستم بالا و ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني نيز داراي مدار ميرا كننده اكتيو باشند بسيار شديد خواهد بود و امكان عملكرد اشتباه رله ديستانس در اثر رفتار گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني افزايش بيشتري پيدا مي‌كند.

بنابراين بايد به دنبال راهي براي تشخيص نسبت امپدانس سيستم بود. در اينجا براي تشخيص نسبت امپدانس سيستم بالا و تأثير آن بر روي تنظيمات رله از روش شبكه‌هاي عصبي مصنوعي استفاده شده است. نسبت امپدانس سيستم تأثير مستقيم بر روي سطح ولتاژ و جريان دارد و به نظر مي‌رسد كه با در نظر گرفتن ورودیهاي جريان و ولتاژ براي شبكه عصبي، اين شبكه قادر به تشخيص نسبت امپدانس سيستم مي‌باشد.

چنانچه در شكل (۱۰) نشان داده شده است در روش پيشنهادي چهار شبكه عصبي براي خطاهاي تكفاز به زمين، دو فاز به زمين، دو فاز و سه فاز در نظر گرفته شده است كه شبكه مناسب به كمك يك تشخيص دهنده خطا از نوع Superimposed فعال مي شود. اين شبكه‌هاي عصبي براساس ورودیها كه جريان و ولتاژ فازهاي مختلف مي‌باشد وجود خطا را در ناحيه حفاظتي تشخيص داده و پيغام مناسب را براي واحد منطقي ارسال مي‌كند. واحد منطقي براساس خروجي شبكه‌ها تصميم مناسب براي صدور فرمان خروجي را خواهد گرفت.

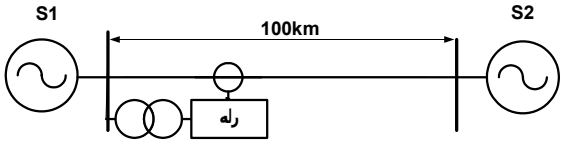


شکل ۱۰- الگوريتم رله ديستانس پيشنهادي براساس شبکه‌هاي عصبي

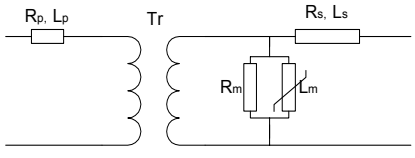
۴-۱- شبيهسازي سيستم قدرت جهت تهيه الگوها

سيستم قدرت سه فازه ۴۰۰ kV دو ماشينه، با خط انتقال صد کيلومتري به صورت نشان داده شده در شکل (۱۱) براي تهيه الگوهاي آموزشي و تست، توسط نرمافزار EMTDC شبيه‌سازي شده است. دو منبعي که در دو طرف خط قرار گرفته‌اند در واقع مدار معادل تونن ديده شده از دو انتهاي خط مي‌باشند. مدل خط انتقال به صورت Bergron است. در جدول (۳) مشخصات اين سيستم نشان داده شده است.

مدل در نظر گرفته شده براي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني مانند بخش ۳ شامل خازنهاي کوپلاژ، سلف جبران‌ساز، ترانس کاهنده و مدار ميرا کننده فرورزونانس و بردن مي‌باشد. مقادير اين پارامترها نيز مطابق جدول (۲) براي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني با مدار ميرا کننده اکتيو در نظر گرفته شده است. مدل ترانسفورماتور جريان به کار رفته در شکل (۱۲) آورده شده است. مشخصات اين ترانسفورماتور در جدول (۴) آورده شده است.



شکل ۱۱- سيستم به کار رفته جهت توليد الگوهاي آموزشي



شکل ۱۲- مدل ترانسفورماتور جريان

جدول ۳-مشخصات سيستم نشان داده شده در شکل (۱۱)

۰/۰۷۲+j۰/۴۱۶	امپدانس توالي مثبت ومنفي خطΩ/km
۰/۳۴۶+j۱/۰۶۶	امپدانس توالي صفر خط Ω/km
۴۱/۷	امپدانس ژنراتورها Ω
۱۰	نسبت X/R ژنراتورها

جدول ۴- مشخصات ترانسفورماتور جريان

۰/۴۶ ،۸×۱۰$^{-۴}$	مقاومت و اندوکتانس ثانويه سيم پيچ ثانويه (Ω)
۱۰۰۰:۱	نسبت تبديل
۶/۵×۱۰$^{-۴}$	سطح (m^2)
۰/۶	طول (m)
۵۰	فرکانس (Hz)
۴۰۰	ولتاژ نامي(kV)

جدول ۵- شرايط توليد الگوهاي آموزشي

تکفاز به زمين، دو فاز به زمين، سهفاز، دو فاز	نوع خطا
مقادير ۹۵،۹۰،۸۵،۸۱،۸۰،۷۸،۷۵،۷۰،۵۰،۲۵	محل خطا (km)
مقادير مختلف بين (۱۰-۰)	مقاومت خطا (خطاهاي شامل زمين)
۱۲-۱۲۰۰	امپدانس منبع Ω
مقادير مختلف بين (۳۶۰-۰)	زاويه شروع خطا (۰)
مقادير مختلف بين (۱۰- تا۱۰+)	زاويه توان (۰)

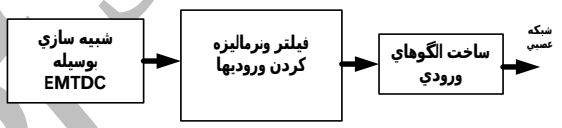
ترکيب خطاهايي کـه در جـدول (۵) نـشان داده شـده اسـت جهت آموزش شبکه بر روي اين سيستم توليـد شـده‌انـد. فـرض براين است کـه محـدوده اول ۸۰% خـط باشـد. چنـانچـه ديـده مي‌شود الگوها شامل انواع خطاها، با زواياي شروع و امپدانـسهاي منبع و مقاومتهاي مختلف در محلهاي متفاوت در داخل و خـارج ناحيه حفاظتي مي‌باشند.

در الگوهاي آموزشي خطاهاي زمين با مقاومت بـين ۰ تـا ۱۰ اهم در نظر گرفته شده‌اند. ضمناً براي اينکه مشخص شود که آيـا در آموزش شبکه نياز به در نظر گرفتن δ هاي مختلف به‌منظـور

قابلیت پاسخگویی شبکه در جهتهای مختلف انتقال توان وجود دارد، رفتار دامنه ولتاژ و جریانهای فازهای مختلف در خطاهای متفاوت نسبت به δ بررسي شده است. در این بررسي مشخص شد که میزان تغییرات دامنه‌ها با تغییر δ زیاد می‌باشد و لازم است آموزش شبکه براي δ هاي مختلف نیز در نظر گرفته شود. بنابراین شبکه عصبي براي خطاهاي مختلف با زواياي δ متفاوت بین ۱۰- تا ۱۰+ درجه نیز آموزش داده شده است. امپدانس منبع نیز بین ۱۲ تا ۱۲۰۰ اهم تغییر داده شده است تا حالتهاي مختلف سیستم در الگوهاي آموزشي در نظر گرفته شود.

۴-۲-پیش پردازش الگوها

فرآیند تولید الگوهاي ورودي که از نمونه‌هاي جریان و ولتاژ به دست مي‌آیند در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳- فرآیند تولید الگوهاي آموزشي

نمونه‌هاي ولتاژ و جریانهاي سه فاز در محل رله توسط نرم‌افزار EMTDC به دست مي‌آیند. این نمونه‌ها توسط یك فیلتر پایین‌گذر باتروورث درجه دو و یك فیلتر dc، به صورت فیلتري که در مرجع [۱۷] معرفي شده است، فیلتر مي‌شوند. سپس اطلاعات در اختیار یك فیلتر فوریه تمام سیکل قرار گرفته و دامنه‌هاي جریان و ولتاژ فازهاي مختلف به دست مي‌آیند. ولتاژها و جریانها در محدودة (۱ و ۱-) نرمالیزه مي‌شوند.

۴-۳-آموزش شبکه عصبي

ساختار شبکههاي عصبي در ابتدا به صورت شبکة MLP سه لایه که شامل ورودي نرمالیزه شده مي‌باشد در نظر گرفته شد. شبکه عصبي مربوط به خطاهاي تك فاز داراي سه ورودي دامنه جریان و ولتاژ فازي که دچار خطا شده و دامنه جریان زمین مي‌باشد. این ورودیها به کمك تشخیص دهنده نوع خطا انتخاب میشوند. در مورد شبکه دو فاز به زمین نیز دامنه جریان و ولتاژ فازهایي که دچار خطا شده‌اند و دامنه جریان زمین به عنوان ورودي شبکه عصبي انتخاب شده‌اند. شبکه‌هاي عصبي مربوط به دو فاز و سه فاز نیز به ترتیب داراي چهار و شش ورودي مي‌باشند. در لایة خروجي شبکه‌ها نیز تنها یك نرون در نظر گرفته شد که در صورت وجود خطا در محدودة اول خروجي شبکه برابر یك و در غیر این صورت مساوي صفر باشد. براي آموزش شبکه از الگوریتم آموزشي Marquadt–Levenberg استفاده شده است [۱۸]. تابع انتقال به کار رفته در لایه‌هاي مياني تانژانت هیپربولیك و در لایه نهایي Logsig بوده است.

ساختار شبکه‌هاي عصبي ابتدا به صورت سه لایه در نظر گرفته شدند. معیار آموزش شبکه نیز میانگین جمع مربعات خطا بوده است. براي رسیدن به یك شبکة مناسب تعداد نرونها در لایه‌هاي مياني تغییر داده شدند. میانگین مربعات خطاي ناشي از اعمال ۲۰۰ الگوي متفاوت با الگوهاي آموزشي در نزدیکي مرز به عنوان معیاري براي تشخیص آموزش گرفتن شبکه عصبي در نظر گرفته شده است. در فرآیند آموزش، دیده شد که هیچیك از ساختارهاي سه لایه به خوبي آموزش نگرفته و ضمناً خطاي آزمایش نیز در آنها بالا است. از این لحاظ یك لایه دیگر به شبکه‌ها افزوده شد. با افزودن یك لایة دیگر به شبکه‌ها، رفتار آنها به شدت در آموزش گرفتن بهتر شد. در نهایت چهار شبکه عصبي با ساختار نشان داده شده در جدول (۶) به خوبي توانستند در فرآیند یادگیري حداقل مربعات خطا را به دست آورده و خطاي آزمایش نیز در آنها به مقدار مطلوبي رسید.

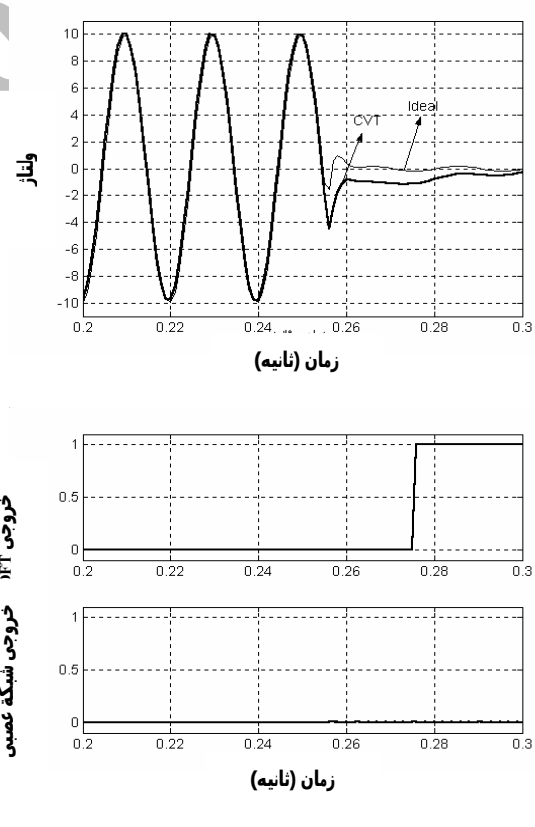
جدول ۶- ساختارهاي نهایي شبکههاي عصبي الگوریتم پیشنهادي

نوع شبکه	ساختار شبکه	تعداد سیکلهاي آموزشي	خطاي نهایي در آموزش	خطاي آزمایش
تکفاز به زمین	۳-۷-۵-۱	۱۰۰۰	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۱۲
دو فاز بزمین	۵-۸-۶-۱	۸۹۰	۰/۰۰۰۹۷	۰/۰۰۲۱
دو فاز	۴-۷-۵-۱	۷۰۰	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۹۳
سه فاز	۶-۷-۷-۱	۷۸۰	۰/۰۰۰۴۹	۰/۰۰۰۹۸

۴-۴- نتایج حاصل از آزمایش الگوریتم پیشنهادي

براي آزمايش اين الگوريتم برنامه‌اي به زبان C نوشته شد كه از وزنهاي به دست آمده از آموزش شبكه‌ها و اطلاعات توليد شده توسط نرمافزار EMTDC استفاده مي‌كند. در اين برنامه ساختار الگوريتم پيشنهادي كه قبلاً به آن اشاره شد پياده شده است. علاوه براين براي اينكه مقايسه‌اي ميان اين روش با يك روش مرسوم قدرتمند نيز انجام شود، يك رله ديستانس ديگر نيز با روش فوريه تمام سيكل در اين برنامه پياده شده است. جهت مقايسه دقيق‌تر بين الگوريتمها، تمامي اجزا در روش فوريه تمام سيكل و ساختار جديد همچون پيش‌پردازشهاي آنتي اليازينگ، حذف مؤلفه DC يكسان در نظر گرفته شده‌اند.

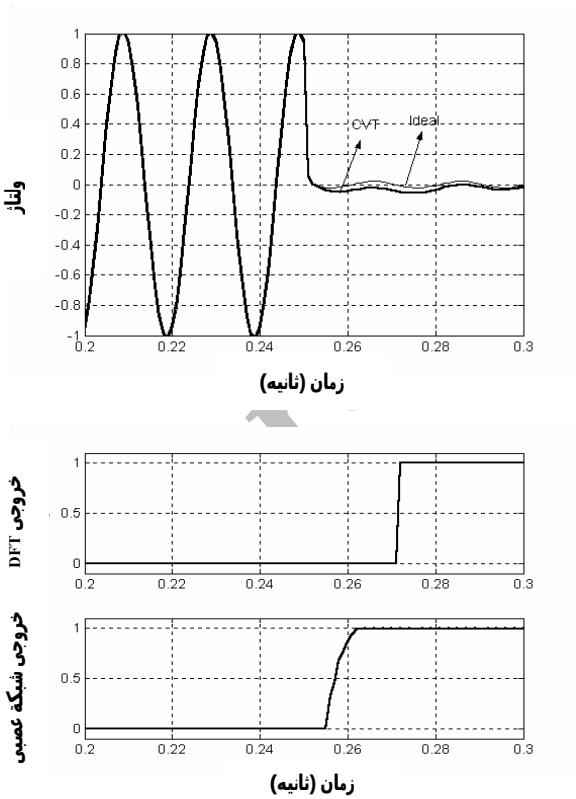
شكلهاي (۱۴ تا ۱۶) خروجي ترانسفورماتور ولتاژ خازني، خروجي رلة ديستانس با الگوريتم فوريه تمام سيكل و خروجي رلة ديستانس پيشنهادي با الگوريتم شبكه عصبي را براي چند خطاي متفاوت نشان مي‌دهند.



شكل ۱۴- ولتاژ ثانويه فاز A تراسفورماتور ولتاژ خازني و خروجي رله ديستانس با الگوريتم فوريه تمام سيكل و الگوريتم شبكه عصبي براي خطاي دو فاز به زمين در۸۷ كيلومتري با SIR برابر ۲۰

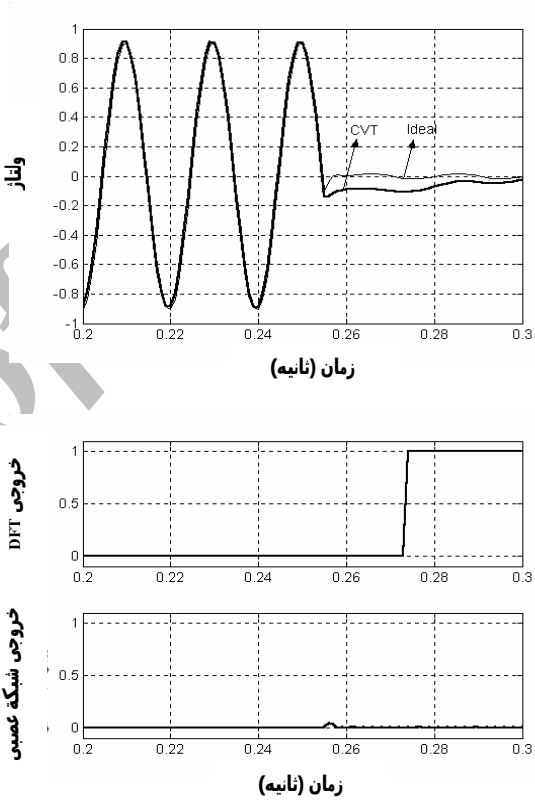
شكل (۱۴) خروجي رلة ديستانس با الگوريتم فوريه تمام سيكل و الگوريتم شبكه عصبي را براي يك خطاي دو فاز به زمين ABG كه با SIR مساوي ۲۰ در ۸۷ كيلومتري از رله با زاويه شروع خطاي صفردرجه در خارج از ناحيه حفاظتي رخ داده است را نشان مي‌دهد. مشاهده مي‌شود كه رله ديستانس با الگوريتم فوريه تمام سيكل، براي خطاي فوق كه خارج از ناحيه حفاظتي مي‌باشد عمل كرده و دچار اضافه برد شده است در حاليكه رله با الگوريتم پيشنهادي در اين فاصله پايدار بوده و خطايي تشخيص نداده است.

شكل (۱۵) خروجي رلة ديستانس را براي يك خطاي تك فاز به زمين با SIR برابر ۵ و زاويه شروع خطاي ۹۰ درجه كه در فاصله ۷۳ كيلومتري از رلة ديستانس رخ داده است را نشان مي‌دهد. ديده مي‌شود كه رلة ديستانس با الگوريتم فوريه تمام سيكل و رله با الگوريتم پيشنهادي داراي عملكرد درستي بوده‌اند اما رله با الگوريتم پيشنهادي داراي سرعت عملكرد بهتري بوده است.



شكل ۱۵- ولتاژ ثانويه فاز A تراسفورماتور ولتاژ خازني و خروجي رله ديستانس با الگوريتم فوريه تمام سيكل و الگوريتم شبكه عصبي براي خطاي تك فاز به زمين در ۷۳ كيلومتري با SIR برابر ۵

شـکل (۱۶) خروجي رلة ديستانس براي يك خطاي سـه فـاز به زمين كه در فاصله ۹۰ كيلومتري از رله رخ داده است را نشان مي دهد. در اين حالت زاويه شروع خطا ۰ درجه و SIR سيـستم ۲۰ بوده است. مـشاهده مـي‌شـود در ايـن حالـت نيـز الگـوريتم پيشنهادي پايدار و قادر به تشخيص صحيح شرايط سيستم بـوده است در حاليكـه الگـوريتم DFT ايـن خطـا را در داخـل ناحيـه حفاظتي خود تشخيص داده است.



شكل ۱۶- ولتاژ ثانويه فاز A تراسفورماتور ولتاژ خازني و خروجي رله ديستانس با الگوريتم DFT و الگوريتم شبكه عصبي براي خطاي سه فاز به زمين در۹۰ كيلومتري با SIR برابر ۲۰

بـراي آزمـايش بيـشتر الگـوريتم، انـواع خطاهـا در محلهـاي مختلف و با زواياي شـروع خطـاي مختلـف، امپدانـسهاي منبـع، مقاومتهاي خطاي متفاوت و زواياي مختلف δ بـين ۱۰- تـا ۱۰+ درجه آزمايش شده‌اند. جدول (۷) نمونه‌هايي از نتايج آزمـايش و مقايسه رله با ساختار جديد را با رله‌اي با الگـوريتم فوريـه تمـام سيكل در شرايط مختلف نشان مي‌دهد. در اين جـدول θ، زاويـه شروع خطا و Δ، زاويه ولتاژ منبع S_1 نسبت به منبع S_2 بر حـسب درجه مي‌باشد و Rf مقاومت خطا و SIR نسبت امپدانس سيستم را نشان مي‌دهد. در هر سه مقاومت خطاي صفر، ۵، ۱۰ اهـم، بـا Δ، θ مختلف و در انواع و محلهاي متفاوت خطا نتـايج حاصـل از آزمايش رلـه با ساختار پيشنهادي و رلـه با الگوريتم فوريه تمـام سيكل نشان داده شده است. بـراي خطاهـايي كـه شـامل زمـين نيستند مقاومت خطا يك پارامتر بحرانـي محـسوب نمـي‌شـود از اين لحاظ عملكرد رله در اين نوع خطاها بـدون در نظـر گـرفتن مقاومت خطا بررسي شده‌اند.

چنانچه ديده مي‌شود براي خطاها با مقاومتهاي خطاي بالا و در شرايطي كه امپدانس منبع زياد بوده است رله با الگوريتم فوريه تمام سيكل قادر به تشخيص صحيح خطاهاي حوالي مرز ناحيه حفاظتي نيست در حاليكه ساختار جديد به خوبي قادر به تعيين ناحيه خطا براي خطاهايي با مقاومتهاي بزرگي نظير ۱۰ اهم و امپدانسهاي منبع تا ۱۲۰۰ اهم مي‌باشد. به عنوان نمونه براي خطاي AG در ۸۳ كيلومتري از رله حفاظتي (خارج ناحيه حفاظتـي) با زاويه شروع خطا ۳۰ درجه (θ) ، زاويه بار ۵ درجـه (Δ) و نسبت امپدانس سيستم ۳۰، رله با الگوريتم فوريه تمام سيكل خطا را داخل ناحيه حفاظتي مي‌بيند در حاليكه رله با الگوريتم پيشنهاد شده خطا را به صورت صحيح در خارج ناحيه حفاظتي تشخيص مي‌دهد. عملكرد نادرست رله در مرز ناحيه حفاظتي ناشي از عوامل متعددي همچون رفتار گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني، مقاومت خطا، خطاي ناشي از ترانسفورماتور ولتاژ و جريان مي‌باشد. مشاهده مي‌شود با وجود اينكه تمامي پديده‌هاي ذكر شده در شبيه‌سازي لحاظ شده‌اند الگوريتم پيشنهادي قادر به عملكرد صحيح در برابر خطاهاي نزديك مرز حفاظتي بوده است. به عبارت ديگر اين الگوريتم علاوه بر اينكه رفتار رله ديستانس را در برابر رفتار گذراي ترانس ولتاژ خازني ترميم نموده است در برابر ساير پديده‌هايي كه عملكرد رله ديستانس را دچار اشتباه مي‌نمايد، پايدار بوده و از كاهش برد و اضافه برد رله جلوگيري نموده است. بنابراين الگوريتم پيشنهادي با وجود رفتارهاي گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني و ساير پارامترهاي مؤثر بر عملكرد رله ديستانس توانسته است ناحيه حفاظتي رله را ثابت نگه داشته و از اضافه برد رله در اثر اين پديده جلوگيري نمايد.

جدول ۷- نتایج آزمایش و مقایسه رله با ساختار پیشنهادي با روش DFT

نوع خطا	محل خطا (km)	SIR	Θ (º)	Δ (º)	Rf=0 Ω		Rf=5 Ω		Rf=10 Ω	
					عملکرد الگوریتمهاي ANN و DFT					
					DFT	ANN	DFT	ANN	DFT	ANN
AG	۲۰	۲۰	۳۰	۱۰	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
AG	۲۰	۳۰	۳۰	-۱۰	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
ABG	۴۰	۱۰	۲۷۰	۱۰	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
ABG	۴۰	۵	۲۷۰	-۱۰	Tr	Tr	Tr	Tr	No-Tr	Tr
CG	۶۵	۵	۹۰	-۵	Tr	Tr	Tr	Tr	No-Tr	Tr
CG	۶۵	۳۰	۹۰	۵	Tr	Tr	Tr	Tr	No-Tr	Tr
BC	۷۵	۲۵	۶۰	۵	Tr	Tr				
BC	۷۵	۲۰	۶۰	-۵	Tr	Tr				
ACG	۷۷	۲۵	۲۱۰	۵	Tr	Tr	No-Tr	Tr	No-Tr	Tr
ACG	۷۷	۲۰	۲۱۰	-۵	Tr	Tr	Tr	Tr	No-Tr	Tr
AG	۷۹	۱۰	۹۰	۵	Tr	Tr	No-Tr	Tr	No-Tr	Tr
AG	۷۹	۲۰	۹۰	-۵	Tr	Tr	Tr	Tr	No-Tr	Tr
CG	۸۰	۳۰	۰	۱۰	Tr	Tr	No-Tr	Tr	No-Tr	Tr
CG	۸۰	۵	۰	-۱۰	Tr	Tr	No-Tr	Tr	No-Tr	Tr
AC	۸۱	۵	۲۱۰	۵	Tr	No-Tr				
CG	۸۲	۳۰	۳۰۰	۱۰	Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr
ABG	۸۲	۲۰	۳۱۰	۱۰	Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr
BC	۸۳	۳۰	۳۴۰	۵	Tr	No-Tr				
ACG	۹۰	۲۰	۹۰	۵	Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr	No-Tr

نتيجه گيري

در اين مقاله عملكرد رله ديستانس در برابر رفتار گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني بررسي شده است. مشاهده شد كه عملكرد رله ديستانس با ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني با مدار ميراكننده اكتيو بسيار نامناسبتر از عملكرد اين رله با ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني با مدار ميرا كننده پسيو مي‌باشد. در اين مقاله از شبكه‌هاي عصبي براي بهبود عملكرد رلة ديستانس در برابر رفتار گذراي ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني استفاده شده است. براي نشان دادن كارايي الگوريتم پيشنهادي يك سيستم قدرت شبيه‌سازي شد و نشان داده شد كه با كمك ساختار پيشنهادي، رله قادر به تشخيص خطاها با امپدانسهاي منبع بالا در بارهاي مختلف، زواياي شروع مختلف و مقاومتهاي خطاي مختلف و شرايط گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني بوده است. اين ساختار با يك رله همراه با الگوريتم فوريه تمام سيكل نيز مقايسه شده است. چنانچه نشان داده شد در هنگام شرايط گذراي ترانسفورماتور ولتاژ خازني براي خطاها با امپدانسهاي بالاي منبع، مقاومتهاي خطاي بالا كه الگوريتم فوريه تمام سيكل قادر به تشخيص صحيح ناحيه خطا در مورد آنها نبود، ساختار جديد با كمك شبكه‌هاي عصبي قادر به طبقه‌بندي مناسب اين خطاها در شرايط مختلف سيستم قدرت بوده و عملكرد مناسبي در قبال آنها داشته است. بنابراين با كمك شبكه‌هاي عصبي مي توان عملكرد رله ديستانس را بهبود داد و با توسعه ناحيه حفاظتي اول رله ميتوان خطاهاي واقع شده بر روي درصد بيشتري از خط را با سرعت بالاتري

پاکسازي نمود.

مراجع

[1] M. Kezunoic, C.W. Fromen and S.L. Nilsson, “Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Protective Relay Transient Studies,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7 no. 4, October 1992.

[2] D. Hou and J. Roberts, “Capacitive Voltage Transformer: Transient Overreach concerns and Solutions for Distance Relaying,” Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 1, 26-29 May 1996, pp. 119–125.

[3] H.B. Siguerdidjane, “Application of Digital Power Simulators: advantages,” Proceedings of First International Conference on Digital Power System Simulators, College Station, TX, USA, April 1995, pp. 83-87.

[4] J. Izykwski, B. Kaztenny, E. Rosolowski, M. Saha and B. Hillstrom, “Dynamic Compensation of Capacitive Voltage Transformer,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 1, January 1998.

[5] B. Kasztenny, et al, “Distance Relays and Capacitive Voltage Transformers – Balancing Speed and Transient Overreach,” 53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers

[6] H. Khorashadi-Zadeh, “Correction of Capacitive Voltage Transformer Distorted Secondary Voltages Using Artificial Neural Networks,” In Proceedings Seventh Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering, Sep. 2004, Belgrad-serbia and Montenegro (Neural 2004).

[7] M. Kezonuic, “A Survey of Neural Net Application to Protective Relaying and Fault Analysis,” Eng. Int. Sys. vol. 5, no. 4, Dec. 1997, pp. 185-192.

[8] H. Khorashadi Zadeh and M. Sanaye-Pasand “Power Transformer Differential Protection Scheme Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Algorithms,” Proc. of the 39nd International Universities Power Engineering Conference, UPEC2004, 2004, pp. 747-753.

[9] P. Bastard, M. Meunier and H. Regal, “Neural Network-Based Algorithm for Power Transformer Differntial Relays,” IEE Proc. Gener. Transmission Distribution, 1995, 142(4), pp. 386-392.

[10] El-Gallas, A.I. El-Hawary and M. Sallam, A.A. Kalas, “Swarm-Intelligently Trained Neural Network for Power Transformer Protection,” Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 1, 13-16 May 2001, pp. 265-269.

[11] A.L. Orille-Fernandez, N.K.I. Ghonaim and J.A Valencia , “A FIRANN as a Differential Relay for Three Phase Power Transformer Protection,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 2, Apr. 2001 pp. 215-218.

[12] M.M. Saha, J. Izykowski, M. Lukowicz and E Rosolowski “Application of ANN Methods for Instrument Transformer Correction in Transmission Line Protection,” Proc. of the 7th Int. IEE Conference Developments in Power System Protection DPSP 2001, 9-12 April 2001, pp. 303-306.

[13] A. Sweetana, “Transient Response Characteristics of Capacitive Potential Devices,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 90, no. 5, September/October, 1971.

[14] IEEE Committee Report “Transient Response of Coupling Capacitor Voltage Transformers,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100, no. 5, May 70, pp. 42-46.

[15] H.J. Vermeulen, “Equivalent Circuit Modeling of a Capacitive Voltage Transformer for Power System Harmonic Frequencies,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10 no. 4, October 1995.

[16] PSCAD/EMTDC User’s Manual, Manitoba HVDC Research Center, Winnipeg, Manitoba, Canada.

[17] A. Ferrero, S. Sangiovanni and E. Zappitelli, “A New Algorithm for Digital Relaying with Symmetrical Components,” Proc. IMEKO TC-4 International Symposium on Intelligent Instrumentation for remote and On-Site Measurements, Brussels, 12-13 May 1993, pp. 341-345.

[18] M.T. Hagan and M.B. Menhaj, “Training Feedforward Networks With the Marquardt Algorithm,” IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 5, no. 6, 1994, pp. 989-993.