

یک روش جدید بر مبنای تبدیل S های پربولیک اصلاح شده برای تمایز خطای داخلی از دیگر شرایط غیر عادی در ترانسفورماتور قدرت

عبدالرضا بهوندی^۱، دانشجوی دکتری؛ سید قدرت اله سیف السادات^۲، استاد؛ علیرضا صفاریان^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران - اهواز - ایران - A-behvandi@phdstu.scu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران - اهواز - ایران - seifossadat@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران - اهواز - ایران - a.saffarian@scu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک روش جدید برای تمایز خطای داخلی از دیگر شرایط غیر عادی در ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. از آنجایی که سیگنال‌های جریان دیفرانسیل نایستاستند هستند، یک ابزار قدرتمند هم‌چون تبدیل S برای تحلیل زمان-فرکانس آن‌ها مورد نیاز است. در ابتدا شبیه‌سازی‌های مختلفی برای حالت‌های خطای داخلی، جریان هجومی، خطای خارجی، اضافه تحریک و فوق اشباع برای شرایط کاری مختلف ترانسفورماتور با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آن با استفاده از نرم افزار PSCAD/EMTDC انجام می‌گیرد. پس از آن سیگنال‌های جریان دیفرانسیل بدست آمده، توسط تبدیل S های پربولیک اصلاح شده آنالیز می‌شوند. از ماتریس تبدیل S های پربولیک اصلاح شده، ویژگی‌های مهم استخراج می‌شوند و بر اساس آن‌ها شرایط مختلف تشخیص و کلاس بندی می‌گردند. این ویژگی‌ها شامل: انرژی سطح اول کانتور، شاخص واریانس، انحراف معیار فاز مولفه اصلی و هارمونیک دوم و سه معیار ویژه است. فرایند اجرای تبدیل S های پربولیک اصلاح شده و پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در نرم افزار MATLAB انجام خواهد شد. در این مقاله همه حالت‌های گذرای ممکن و اثر اشباع ترانسفورماتورهای جریان در نظر گرفته می‌شوند. در نهایت صحت و دقت روش پیشنهادی با روش‌های مختلف در شرایط با نویز و بدون نویز مقایسه می‌شوند. نتایج بدست آمده عملکرد خوب روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: حفاظت دیفرانسیل، تبدیل S های پربولیک اصلاح شده، خطای داخلی، فوق اشباع، اضافه تحریک.

A New Modified Hyperbolic S Transform-Based Method for Discrimination of Internal Fault from Other Abnormal Conditions in Power Transformer

Abdolreza Behvandi¹, PhD Student; Seyed Ghodrattollah Seifossadat², Professor; Alireza Saffarian³, Assistant Professor

1- Faculty Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: A-behvandi@phdstu.scu.ac.ir

2- Faculty Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: seifossadat@yahoo.com

3- Faculty Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: a.saffarian@scu.ac.ir

Abstract: In this paper, a new method is presented for discrimination of internal fault other abnormal conditions in power transformers. Since the differential current signals are non-stationary, a powerful tool such as S transform is needed for time-frequency analysis of them. First, by considering the effective factors, different simulations for internal fault, inrush current, external fault, over-excitation and ultrasaturation conditions are performed via PSCAD/EMTDC software in different operating conditions of transformer. Then, the obtained differential current signals are analyzed by modified hyperbolic S transform. Important characteristics are extracted from modified hyperbolic S transform and according to them, different conditions are distinguished and classified. These features include: energy contour of first level, variance index, standard deviation of the fundamental frequency and second harmonic component and three special criteria. The process of modified hyperbolic S transform and performing the proposed algorithm are performed in MATLAB software. In this paper, all of possible transient conditions and effects of the saturation of current transformers are considered. Finally, the accuracy and precision of the proposed method are compared with different methods in conditions with noise and without noise. The results show good performance of the proposed method.

Keywords: Differential protection, modified hyperbolic stockwell transform, internal fault, ultrasaturation, over-excitation.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹

نام نویسنده مسئول: سید قدرت اله سیف السادات

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اهواز - بلوار گلستان - دانشگاه شهید چمران اهواز - دانشکده مهندسی - گروه برق.

۱- مقدمه

زیادی ایجاد نخواهد شد [۹،۱۰]. لذا روش‌های مبتنی بر هارمونیک دوم برای تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی به اندازه کافی قابل اعتماد نیستند.

برخی شیوه‌های مدرن بر مبنای شبکه عصبی هوشمند و الگوریتم‌های بهینه‌سازی [۴]، منطق فازی [۱۱] به علاوه مدل مارکوف مخفی [۱۲] ارایه شده‌است. محدودیت روش‌های مبتنی بر یادگیری این است که تعداد زیادی از مجموعه داده‌ها برای روند آموزش مورد نیاز است. علاوه بر این، ساختار مناسب در روش‌های پیشین اغلب از طریق سعی و خطا انتخاب می‌شود که به این معنی است که فرآیند آموزش زمان زیادی نیاز دارد. تبدیل موجک^۲ (WT) یک ابزار قوی پردازش سیگنال است به همین دلیل روش‌هایی بر مبنای تبدیل موجک برای حفاظت ترانسفورماتورها در [۱۹-۱۳] ارایه شده‌است. روش ارایه شده در [۱۳]، از تفاوت زمانی بین لحظه‌های اغتشاشات و اشباع ترانسفورماتورهای جریان به منظور تشخیص خطا استفاده می‌کند. از شکل موج جزئیات موجک در [۱۴] به منظور تشخیص خطا استفاده شده‌است. در حالی که در [۱۵] یک بسته موجک برای این منظور پیشنهاد شده‌است. همچنین در برخی روش‌ها از مدل‌های ترکیبی تبدیل موجک و ماشین بردار پشتیبان [۱۶]، ترکیب تبدیل موجک و شبکه عصبی هوشمند [۱۷] به علاوه مفهوم ضریب هم‌بستگی [۱۸] استفاده شده‌است.

از تبدیل S به دلیل مصونیت در برابر نویز در مطالعات سیستم قدرت [۲۰، ۲۱] و حفاظت ترانسفورماتور [۲۲] استفاده شده‌است. به دلیل تمرکز انرژی پایین تبدیل S در حوزه زمان - فرکانس، مراجع [۲۳، ۲۴] استفاده از پنجره هایپربولیکی به جای پنجره گوسین را پیشنهاد داده‌اند. این روش به تبدیل S هایپربولیکی معروف است. در [۲۵] تبدیل زمان-زمان که سری زمانی یک‌بعدی به سری زمانی دو بعدی تجزیه می‌کند برای حفاظت ترانسفورماتور پیشنهاد شده‌است. همچنین محققان سعی کرده‌اند که با منحنی مشخصه متغیر، موجب انعطاف بیش-تر رله‌های دیفرانسیلی در برابر اغتشاشات موجود شوند. روش حفاظتی ارایه شده در [۲۶] صفحه مشخصه رله دیفرانسیلی را به نواحی خطای داخلی، خطای خارجی و جریان هجومی تقسیم می‌کند. روش خودوقتی [۲۷] با توجه به شدت خطا و به منظور جلوگیری از عملکرد اشتباه، به صورت خودکار تنظیم می‌شود.

بررسی مقالات در چند سال اخیر نشان دهنده این است که در اکثر مقالات شرایط غیرخطای داخلی که مورد بررسی قرار گرفته شامل خطاهای خارجی و جریان هجومی با/ بدون اشباع ترانسفورماتور است. بنابراین شرایط اضافه تحریک و فوق‌اشباع به عنوان حالت‌های گذرا در ترانسفورماتورهای قدرت، بندرت مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

برای خطاهای خارجی، جایی که جریان خطا بزرگ است، این احتمال وجود دارد که یکی از ترانسفورماتورهای جریان دچار اشباع شود. در نتیجه شکل موج جریان ثانویه ترانسفورماتور تحت اشباع دچار اعوجاج شده و سبب تولید جریان دیفرانسیلی می‌شود که با عملکرد نادرست رله همراه می‌شود [۱].

ترانسفورماتورهای قدرت به دلیل این که مقدار زیادی توان بین تولید و توزیع مدیریت می‌کند، نقش بسیار مهمی در سیستم قدرت ایفا می‌کند. در حدود ۱۰٪ خطاهای سیستم قدرت در ترانسفورماتور صورت می‌گیرد، که ۷۰٪ این خطاها به دلیل اتصال کوتاه در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور می‌باشد [۱]. از مهم‌ترین اغتشاشات در شبکه‌های انتقال، می‌توان به خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور قدرت اشاره کرد [۲]. میزان قطعی ترانسفورماتور تأثیرات زیادی بر قابلیت اطمینان و هم-چنین اقتصاد سیستم قدرت دارد. میزان قطعی ترانسفورماتور قدرت به چندین عامل مانند شرایط کارکرد ترانسفورماتور قدرت، نگهداری دوره-ای، طول عمر ترانسفورماتور قدرت و عملکرد سیستم رله حفاظت بستگی دارد [۳]. شرایط غیرعادی که منجر به عملکرد اشتباه رله خواهد شد، شامل خطاهای داخلی، جریان‌های هجومی ناشی از برق‌دار کردن ترانسفورماتور، خطاهای خارجی، اضافه تحریک و فوق اشباع است [۴]. این شرایط غیرعادی برای حفاظت ترانسفورماتور چالش‌برانگیز است به-همین دلیل استفاده از یک سیستم حفاظت مناسب اهمیت فراوانی دارد. طرح حفاظت دیفرانسیل به عنوان یک طرح واحد برای حفاظت ترانسفورماتور قدرت با توان نامی بالای ۱۰ MVA استفاده می‌شود [۵، ۶]. هدف اصلی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور، تشخیص خطاهای داخلی با حساسیت بالا و تمایز آن از دیگر شرایط گذرای احتمالی (جریان‌های هجومی ناشی از برق‌دار کردن ترانسفورماتور، اشباع ترانسفورماتور جریان در اثر خطاهای خارجی، اضافه تحریک و فوق‌اشباع) در ترانسفورماتور می‌باشد.

یکی از مسائل مهم در عملکرد نادرست حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور، جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی است که در طول برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت ایجاد می‌شود. جریان هجومی شامل مقدار قابل توجهی مولفه هارمونیک دوم است. بنابراین طرح بازدارنده هارمونیک به عنوان یکی از نخستین روش‌های تشخیص جریان هجومی، از نسبت مولفه هارمونیک دوم به مولفه اصلی جریان دیفرانسیلی برای تشخیص این شرایط استفاده می‌کند [۱]. در [۷] الگوریتم‌هایی بر مبنای هارمونیک دوم به منظور تمایز جریان هجومی از خطاهای داخلی پیشنهاد شده‌است. این روش بر این مبنا است که در شرایط جریان هجومی، نسبت هارمونیک دوم از شرایط خطای داخلی بزرگ‌تر است. از طرف دیگر، اشباع ترانسفورماتورهای جریان یا مقاومت خطای غیرخطی در هنگام اتصال ترانسفورماتور به یک خط انتقال طولانی باعث افزایش دامنه هارمونیک دوم در خطای داخلی خواهد شد [۸]. عیب این روش این است که ممکن است بنا به دلایلی مثل اشباع ترانسفورماتورهای جریان، وقوع پدیده تشدید در سیستم، وجود خازن سنت یا ظرفیت خازنی توزیع شده در خط انتقال متصل به ترانسفورماتور و یا وجود بارهای غیرخطی، مولفه هارمونیک دوم در جریان خطای داخلی نیز مقدار قابل ملاحظه‌ای داشته-باشد. از طرفی با پیشرفت در ساخت مواد سازنده هسته در ترانسفورماتور-های مدرن، در حین برق‌دار نمودن ترانسفورماتور مؤلفه هارمونیک دوم

زمان کوتاه^۴ (STFT) و تبدیل موجک از تبدیلات مهم در آنالیز فرکانس - زمان هستند که سیگنال را به بخش‌های ابتدایی (اتم‌ها) تجزیه کرده و سعی می‌کنند هر بخش را در فرکانس و زمان به صورت هم‌زمان محل - سازی کنند. این تبدیلات در بسیاری موارد دارای رزولیشن فرکانس - زمان ضعیف هستند و به پنجره‌های مورد استفاده برای آنالیز سیگنال بستگی دارند.

تبدیل S یک آنالیز فرکانس - زمانی است که از یک پنجره گوسین^۵ برای محاسبه ماتریس S استفاده می‌کند [۲۴]. المان‌های این ماتریس اعداد مختلطی هستند که دامنه و فاز فرکانس‌های مختلف را در هر زمان مشخص می‌کند، لذا اطلاعات کاملی از شکل موج مورد نظر به دست خواهد آمد.

تبدیل S می‌تواند به عنوان ترکیبی از تبدیل فوریه کوتاه مدت و تبدیل موجک در نظر گرفته شود [۳۱]. تبدیل S در مسایل کلاس بندی و استخراج ویژگی اعمال شده بر روی سیگنال‌های غیرایستا مانند سیگنال‌های کیفیت توان [۳۲]، عملکرد بالایی دارد. به مانند تبدیل موجک، تبدیل S استاندارد یک پنجره گوسین متحرک دارد که شکل آن به وسیله فرکانس تعیین می‌شود [۲۴]. به عبارت دیگر تبدیل S استاندارد یک پنجره گوسین دارد که ارتفاع و عرض آن به ترتیب رابطه مستقیم و معکوس با فرکانس دارند. برخلاف تبدیل موجک، محدوده طیف فاز با توجه به مبدا زمان در کنار طیف دامنه، مشخص است. این داده‌های فاز اطلاعات مکملی درباره طیف مورد نظر فراهم می‌کنند که به وسیله تبدیل موجک کسب نخواهد شد. هم چنین، تبدیل S در مقایسه با تبدیل موجک در برابر نویز مقاومت تر است [۲۴]. در تبدیل S، با افزایش فرکانس، طول پنجره گوسین کاهش می‌یابد. این شرایط موجب افزایش رزولیشن فرکانس در فرکانس‌های پایین و افزایش رزولیشن زمان در فرکانس‌های بالا می‌شود. این به عنوان یک محدودیت برای آنالیز برخی سیگنال‌ها مانند سیگنال‌های سینوسی، محسوب می‌شود [۳۰].

اگرچه تبدیل S قابل استفاده در بازه وسیعی از ناحیه‌ها است اما عملکرد آن وابسته به شکل پنجره است. مطالعات بسیاری به منظور بهبود تبدیل S با ارایه پنجره‌های جدید صورت گرفته است. در [۳۳]، یک تبدیل S تعمیم یافته پیشنهاد شده است که کنترل بیشتری بر روی تابع پنجره فراهم می‌کند. سپس، تبدیل S به منظور پذیرش یک پنجره دلخواه توسعه داده شده است [۳۴]. با داشتن این تبدیل S تعمیم یافته، پنجره‌های بی گوسین [۳۵] و هایپربولیک معمولاً علاوه بر پنجره گوسین تبدیل S استاندارد استفاده می‌شوند. پنجره گوسین فقط یک پارامتر دارد، اما شکل پنجره هایپربولیک به وسیله مجموعی از پارامترها تعیین می‌شود [۳۴]. در مقایسه با تبدیل S، تبدیل S هایپربولیک (HST) رزولیشن و قابلیت آنالیز گذرای بهتری فراهم می‌کند اما نتایج به نویز حساس تر می‌باشند. به منظور حل این مشکل، HST تعمیم داده شده در [۳۶] پیشنهاد شده است که علاوه بر رزولیشن و قابلیت آنالیز گذرای بهتر، مقاومت خوبی در برابر نویز خواهد داشت. باین حال، مقدار محاسبات تبدیل S تعمیم داده شده خیلی زیاد و در نتیجه زمان محاسبات طولانی است. به منظور حل این مشکل، از MHST استفاده خواهد شد.

اضافه تحریک ترانسفورماتور به این معنی است که شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور تحت تاثیر مستقیم افزایش ولتاژ در دو سر سیم - پیچی ترانسفورماتور، از شرایط نرمال فراتر می‌رود. در شرایط اضافه تحریک، هسته دچار اشباع شده و در نتیجه جریان مغناطیس کنندگی افزایش می‌یابد. بنابراین عدم انطباق جریان‌های ثانویه ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت، موجب تولید جریان دیفرانسیلی و عملکرد رله حفاظتی خواهد شد. شرایط اضافه تحریک در ترانسفورماتورهایی که مستقیماً به ترمینال‌های ژنراتور متصل می‌باشند، به طور ویژه رخ می‌دهد. در شرایط اضافه تحریک، جریان دیفرانسیل مولفه های هارمونیک فرد قابل توجهی دارد که در طرح بازدارنده هارمونیک از هارمونیک پنجم، برای تشخیص این شرایط استفاده می‌شود [۶].

در سال ۲۰۰۵ برای اولین بار پدیده گذرای دیگری معرفی شد. این پدیده گذرا خاص که از برق دار کردن ترانسفورماتور باردار ایجاد می‌شود، تحت عنوان فوق اشباع نام دارد [۲۸]. فوق اشباع به عنوان یک پدیده بسیار خطرناک و تهدید جدی برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور شناخته شده است. در این شرایط دامنه مولفه اصلی بالا و مولفه هارمونیک دوم کم است. بازدارنده هارمونیک دوم که برای شناسایی جریان هجومی استفاده می‌شود نیز نمی‌تواند این شرایط را تشخیص دهد. بنابراین رله دیفرانسیل این شرایط را به عنوان خطای داخلی محسوب می‌کند و عملکرد نادرستی خواهد داشت [۲۹].

در این مقاله، برای اولین بار هر دو شرایط اضافه تحریک و فوق اشباع در کنار دیگر شرایط در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین کلیه شرایط در ابتدا در نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه سازی شده و سپس داده‌های اندازه گیری شده (جریان دیفرانسیل فازهای a و b و c) بعد از نرمالیزه شدن، حذف صفر و تطبیق فاز به تبدیل S هایپربولیک اصلاح شده (MHST) داده خواهد شد. خروجی تبدیل S، ماتریسی است که سطرهای آن متناظر با حوزه فرکانس و ستون‌های آن متناظر با حوزه زمان است. ویژگی‌های استخراج شده از ماتریس MHST به الگوریتم روش پیشنهادی اعمال خواهند شد. با استفاده از این ویژگی‌ها شرایط مختلف دسته بندی می‌شوند.

در الگوریتم پیشنهادی از انرژی شرایط مختلف استخراج شده از ماتریس MHST به عنوان ویژگی اصلی استفاده خواهد شد. این ویژگی با توجه به اینکه مقدار دامنه جریان دیفرانسیل در موارد مختلف شبیه سازی شده در یک شرایط خاص متفاوت است، الگوریتم را به چهار مرحله مختلف تقسیم می‌کند. "دیگر ویژگی‌های استخراج شده شامل: شاخص واریانس، انحراف معیار فاز مولفه اصلی و هارمونیک دوم و سه معیار ویژه، در هر مرحله شرایط مختلف را از یکدیگر متمایز می‌کنند."

۲- تبدیل S

آنالیز فرکانس-زمان یک ابزار قدرتمند به منظور تشریح سیگنال‌ها در حوزه زمان و فرکانس است. این آنالیز سیگنال یک بعدی $x(t)$ به تابع دوبعدی زمان و فرکانس $T_x(t, f)$ تبدیل می‌کند [۳۰]. تبدیل فوریه

۲-۱- تبدیل S هایپربولیک اصلاح شده

تبدیل S تعمیم‌داده از معادله تبدیل S [۳۱] و با جای‌گزینی یک پنجره تعمیم‌داده با پنجره گوسین به دست خواهد آمد:

$$S(\tau, f, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \omega(\tau - t, f, p) \exp(-2\pi i f t) dt \quad (1)$$

p نشان‌دهنده مجموعه‌ای از پارامترها است که شکل پنجره ω را کنترل می‌کند. پنجره تبدیل S باید معادله (۲) را برآورده کند:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \omega(\tau - t, f, p) dt = 1 \quad (2)$$

تبدیل S هایپربولیک می‌تواند با جای‌گزینی پنجره هایپربولیک ω_{HY} به جای پنجره تعمیم‌داده در معادله تبدیل S تعمیم‌داده حاصل شود. معادله (۳) تبدیل S هایپربولیک را نشان می‌دهد:

$$\omega_{HY} = \frac{2|f|}{\sqrt{2\pi}(\gamma_a + \gamma_b)} \times \exp\left[-\frac{f^2 X^2}{2}\right] \quad (3)$$

X برابر است با:

$$X(\tau - t, \{\gamma_a, \gamma_b, \lambda\}) = \frac{\gamma_a + \gamma_b}{2\gamma_a \gamma_b} (\tau - t - \xi) + \frac{\gamma_a - \gamma_b}{2\gamma_a \gamma_b} \sqrt{(\tau - t - \xi)^2 + \lambda^2} \quad (4)$$

در معادله (۴)، X یک هذلولی در $(\tau - t)$ است که به پارامترهای γ_a (backwaed-taper)، γ_b (forward-taper) و پارامتر λ (positivecurvature) که واحد آن زمان است، بستگی دارد. در معادله (۴) باید $0 < \gamma_b < \gamma_a$ برقرار باشد. ξ (translation factor) برای این که حداکثر دامنه ω_{HY} در لحظه $\tau - t = 0$ رخ دهد، در معادله (۵) تعیین می‌شود:

$$\xi = \sqrt{\frac{(\gamma_a - \gamma_b)^2 \lambda^2}{4\gamma_a \gamma_b}} \quad (5)$$

در $f = 0$ ، ω_{HY} نامتقارن است اما با افزایش f، شکل ω_{HY} به سمت پنجره گوسین متقارن همگرا می‌شود.

شکل پنجره هایپربولیک اصلاح‌شده با توجه به معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$\omega_{MHY} = \frac{2\sqrt{|fg|}}{\sqrt{2\pi}(\gamma_a + \gamma_b)} \times \exp\left[-\frac{|fg|X^2}{2}\right] \quad (6)$$

از مقایسه دو معادله (۳) و (۶)، می‌توان دید که تفاوت بین MHST و HST این است که عرض پنجره MHST متناسب با جذر فرکانس است هم‌چنین یک ضریب تنظیم فرکانس-زمان g معرفی می‌کند که رزولیشن فرکانس-زمان را در کل تنظیم می‌کند.

MHST گسسته در معادله (۷) محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$S[j, n] = \sum_{m=0}^{N-1} H[m+n] W_{MHY}(m, n) e^{\frac{j2\pi mn}{N}}, \quad n \neq 0 \quad (7)$$

$$S[j, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h[m], \quad n = 0 \quad (8)$$

N تعداد کل نمونه‌ها می‌باشد و m و n شاخص‌هایی هستند که $j = 0, 1, \dots, N-1$ و $m = 0, 1, \dots, N-1$ ، $n = 0, 1, \dots, N-1$ تبدیل فوریه گسسته با شیفت فرکانسی سیگنال موردنظر نشان می‌دهد. $W_{MHY}(m, n)$ تبدیل فوریه تابع پنجره MHST است.

۳- روش پیشنهادی

در این روش پیشنهادی، در ابتدا اطلاعات جریان دیفرانسیل سه‌فاز با توجه به شبیه‌سازی شرایط مختلف کاری ترانسفورماتور، دریافت می‌شوند. سپس جریان فعال‌سازی مطابق معادله (۹) محاسبه می‌شود.

$$|I_{Diff, St}| = |k \cdot I_{Res}| \quad (9)$$

جایی که k شیب مشخصه دیفرانسیلی درصدی است. I_{Res} جریان بازدارنده است و در معادله (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$I_{Res} = \frac{i_{1s} + i_{2s}}{2} \quad (10)$$

i_{1s} و i_{2s} به ترتیب جریان ثانویه CT در سمت اولیه و جریان ثانویه CT در سمت ثانویه ترانسفورماتور قدرت است

در صورتی که جریان دیفرانسیل سه‌فاز از جریان فعال‌سازی، کوچک‌تر باشد حالت نرمال است و در غیراینصورت پدیده‌های گذرای دیگر اتفاق افتاده است. اطلاعات جریان دیفرانسیل سه‌فاز به MHST داده خواهد شد.

پس از آن MHST بر روی یک سیکل از شکل موج جریان دیفرانسیل اعمال می‌شود. برای یک پنجره داده با نمونه N، خروجی MHST ماتریس $N/2 \times N$ با عناصر اعداد مختلط خواهد بود و ماتریس MHST نامیده می‌شود [۲۴]. سطرها و ستون‌های ماتریس MHST به ترتیب مربوط به حوزه‌های فرکانس و زمان می‌باشند. از این ماتریس، اطلاعات مهمی برحسب مقدار، فاز و فرکانس می‌توان به دست آورد. کانتور دامنه برابر با بیشینه مقدار ماتریس MHST در یک زمان خاص است (بیشینه مقدار در یک ستون مشخص). کانتور فرکانسی^۷ نیز بیشینه مقدار هر مولفه فرکانسی موجود در سیگنال جریان دیفرانسیل است (بیشینه مقدار در یک سطر مشخص).

۳-۱- استخراج ویژگی‌ها

باتوجه به اطلاعاتی که از فرکانس، دامنه و فاز مولفه‌های ماتریس MHST می‌توان به دست آورد، قابلیت ساخت ویژگی‌های متنوعی وجود دارد. براساس حداکثر و حداقل دامنه، میانگین، انحراف معیار استاندارد و واریانس هر سطر (مرتبط با کانتور فرکانسی) یا ستون مشخص (مرتبط با کانتور دامنه)، سطح زیر نمودار کانتور فرکانسی در بازه‌های مختلف، انرژی ماتریس MHST، انرژی سطح‌های مختلف کانتور ماتریس MHST و ...، ویژگی‌های فراوانی حاصل خواهند شد. استفاده از این ویژگی‌ها، حجم بالایی از داده‌ها تولید می‌کند که به کارگیری این حجم اطلاعاتی باعث کاهش سرعت تشخیص شرایط مختلف خواهد شد و ممکن است دقت مطلوب را هم فراهم نکند. دسته‌بندی این ویژگی‌های متنوع و فراوان، بسیار مهم است به دلیل این که تاثیر مستقیمی بر روی الگوریتم پیشنهادی دارد. بنابراین انتخاب ویژگی‌های مهمی که می‌توانند شرایط مختلف را از یکدیگر متمایز کنند، باعث تشخیص دقیق الگوریتم پیشنهادی خواهد شد. علاوه بر این، برای افزایش سرعت تشخیص باید حداقل ویژگی‌های مهم برگزیده شوند. بنابراین توازن میان دقت و سرعت باید در انتخاب ویژگی‌ها لحاظ گردد.

ویژگی‌های به دست آمده از ماتریس MHST به شرح زیر می‌باشند:

$$F6 = Std(Ph(f_2, nT)) \quad (21)$$

انرژی هر سطح کانتور MHST با توجه به معادله (۱۱) محاسبه خواهد شد.

$$Eng_{Li} = m_i \times T_i \quad (11)$$

m_i مقدار دامنه و T_i دوره زمانی سطح کانتور مورد نظر را مشخص می کنند. بنابراین انرژی سطح اول کانتور MHST برابر است با:

$$F1 = Eng_{L1} = m_1 \times T_1 \quad (12)$$

شاخص واریانس: نسبت واریانس دامنه مربوط به فرکانس هارمونیک دوم به واریانس دامنه مربوط به فرکانس اصلی (F2)

$$V_1 = \text{Variance}(A_1) \quad (13)$$

$$V_2 = \text{Variance}(A_2) \quad (14)$$

$$F2 = V_1/V_2 \quad (15)$$

A_2 ، A_1 به ترتیب دامنه مولفه اصلی و دامنه هارمونیک دوم MHST (سطرهای دوم و سوم ماتریس) و V_1 ، V_2 هم چنین به ترتیب واریانس دامنه مربوط به فرکانس اصلی و واریانس دامنه مربوط به فرکانس هارمونیک دوم هستند.

معیار اول ماتریس MHST (F3)

$$F3 = |E_1 - E_2| \times A_{max}(f_1, nT) / (A_{max}(f_2, nT) \times A_{0max}) \quad (16)$$

E_2 و E_1 دو مقدار اول بیشینه انرژی MHST (E) می باشند که از رابطه (۱۷) به دست می آید.

$$E = \text{abs}(\text{MHST})^2 \quad (17)$$

$A_{max}(f_1, nT)$ ، $A_{max}(f_2, nT)$ و A_{0max} به ترتیب بیشینه دامنه مولفه اصلی (بیشینه مقدار سطر دوم MHST)، بیشینه دامنه هارمونیک دوم (بیشینه مقدار سطر سوم MHST) و بیشینه دامنه مولفه DC (بیشینه مقدار سطر اول MHST) هستند. T یک دوره زمانی را مشخص می کند. f_1 و f_2 به ترتیب برابر با فرکانس مولفه اصلی و فرکانس مولفه هارمونیک دوم هستند.

معیار دوم ماتریس MHST (F4)

$$F4 = (Eng_{L1} - Eng_{L2}) \times \Delta \text{Area} \times \text{Area}_4 / \text{Area}_3 \quad (18)$$

Eng_{L2} انرژی سطح دوم کانتور MHST است و مطابق معادله (۱۱) محاسبه خواهد شد. Area_3 نشان دهنده سطح زیر منحنی نمودار فرکانسی و Area_4 نشان دهنده سطح زیر نمودار فرکانسی بین فرکانس ۲۰۰ تا ۲۰۰ Hz است. ΔArea طبق رابطه (۱۹) بیان خواهد شد.

$$\Delta \text{Area} = \text{Area}_1 - \text{Area}_2 \quad (19)$$

Area_1 و Area_2 به ترتیب مساحت منحنی سطح اول و دوم کانتور MHST در نمودار زمانی هستند.

انحراف معیار فاز مربوط به فرکانس اصلی (F5)

$$F5 = Std(Ph(f_1, nT)) \quad (20)$$

انحراف معیار فاز مربوط به فرکانس هارمونیک دوم (F6)

نسبت مقدار موثر حول نقطه بیشینه به مقدار موثر حول نقطه

کمینه مولفه اصلی در یک دوره زمانی (F7)

$$A(f_1, n_{max}T) = \max(A(f_1, nT)) \quad (22)$$

$$A(f_1, n_{min}T) = \min(A(f_1, nT)) \quad (23)$$

$$k_{max} = \sqrt{\frac{1}{25} \sum_{n_{max}-12}^{n_{max}+12} A(f_1, nT)} \quad (24)$$

$$k_{min} = \sqrt{\frac{1}{25} \sum_{n_{min}-12}^{n_{min}+12} A(f_1, nT)} \quad (25)$$

$$F7 = k_{max} / k_{min} \quad (26)$$

$n_{min}T$ و $n_{max}T$ زمانی را نشان می دهند که دامنه مولفه اصلی بیشینه و کمینه می گردد. برای در نظر گرفتن این لحظات قیود زیر باید رعایت شوند:

- اگر $n_{max} \leq 12$ $\Leftarrow n_{max} = 13$ ؛ اگر $n_{max} \geq 39$
- $\Leftarrow n_{max} = 38$
- اگر $n_{min} \leq 12$ $\Leftarrow n_{min} = 13$ ؛ اگر $n_{min} \geq 39$
- $\Leftarrow n_{min} = 38$

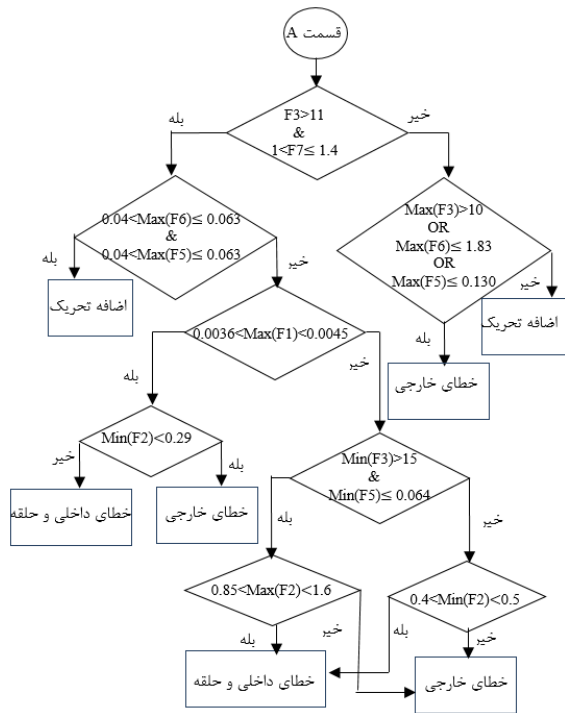
k_{min} و k_{max} به ترتیب مقدار موثر نمونه های مولفه اصلی در اطراف نقاط بیشینه و کمینه هستند.

ویژگی های متنوعی با آزمایش موارد بسیاری در شرایط های مختلف شامل: خطای داخل، خطای حلقه، جریان هجومی، فوق اشباع، اضافه تحریک و خطای خارجی، حاصل می شوند. بنابراین از میان ویژگی های مختلف، ویژگی های معنادار که در بالا ذکر شده اند، انتخاب می شوند.

۲-۲- دسته بندی انواع خطا

بعد از به دست آوردن ویژگی های معنادار، این ویژگی ها به الگوریتم پیشنهادی اعمال می شوند. در هر مرحله با توجه به شرایط مختلف و تمایز آن ها از یک دیگر، حدود مشخصی برای هر کدام از ویژگی ها تعیین می شود. در مراحل مختلف، بیشینه و کمینه این ویژگی ها در بین سه فاز a، b و c به الگوریتم اعمال خواهد شد.

ویژگی مهمی که در این الگوریتم قسمت های مختلف را ایجاد می کند، بیشینه ویژگی انرژی سطح اول MHST در بین سه فاز است. چهار قسمت اصلی الگوریتم با تعیین محدوده های مختلف برای این ویژگی ایجاد می گردند. در شرایط مختلف که یک سیستم قدرت با آن روبرو می شود، شدت و ضعف این شرایط تعیین کننده دامنه انرژی های مختلف است. خطاهای داخلی با مقاومت بسیار کم، دامنه بزرگی دارند که منجر به تولید انرژی با دامنه بالایی خواهند شد. با توجه به الگوریتم، اگر دامنه انرژی که مطابق با رابطه (۱۲) به دست می آید از ۰/۱۱۵۰ فراتر رود نشان دهنده وقوع یک خطای داخلی است. محدوده های مختلف بیشینه



شکل ۱: فلوجارت روش پیشنهادی

لازم به ذکر است معادله (۳۰) که نشان دهنده قید اول در قسمت A الگوریتم پیشنهادی است، نیازی به بیشینه و کمینه ویژگی‌ها ندارد و با رعایت در یکی از سه فاز ممکن برقرار است:

$$F3 > 11 \quad (30) \\ \& \\ 1 < F7 \leq 1.6$$

۴- نتایج

۴-۱- شبیه‌سازی سیستم قدرت

به‌منظور تولید سیگنال‌های گذرا، یک ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ MVA، ۶۳/۲۳۰ kV، با فرکانس نمونه‌برداری مطابق شکل (۲) در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC مدل‌سازی می‌شود.

هم‌چنین برای شبیه‌سازی رفتار واقعی CT در شرایط مختلف، نیاز به یک مدل دقیق است. در [۳۷]، یک مدل دقیق ریاضی برای ترانسفورماتورهای جریان جهت پیش‌بینی عملکرد گذرا ارائه شده است. در این مقاله از مدل JA که در [۳۸] تشریح شده است استفاده خواهیم کرد. منحنی مغناطیسی این مدل در شکل (۳) نشان داده شده است.

با پیاده‌سازی سیستم قدرت نشان داده‌شده در شکل (۲) در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC و اجرای آن در شرایط مختلف شامل: خطای داخلی و حلقه، جریان هجومی، خطای خارجی، اضافه تحریک و فوق اشباع، ۶۱۰ مورد شبیه‌سازی، با فرکانس نمونه‌برداری ۲/۵ kHz فراهم می‌گردد. در این مقاله به‌علت محدودیت فضای مقاله، از هر شرایط یک نمونه نشان داده خواهد شد.

انرژی سطح اول بدست‌آمده از رابطه (۱۲) که سه قسمت دیگر الگوریتم را تشکیل می‌دهند، در معادلات (۲۷)، (۲۸) و (۲۹) مشخص می‌شوند.

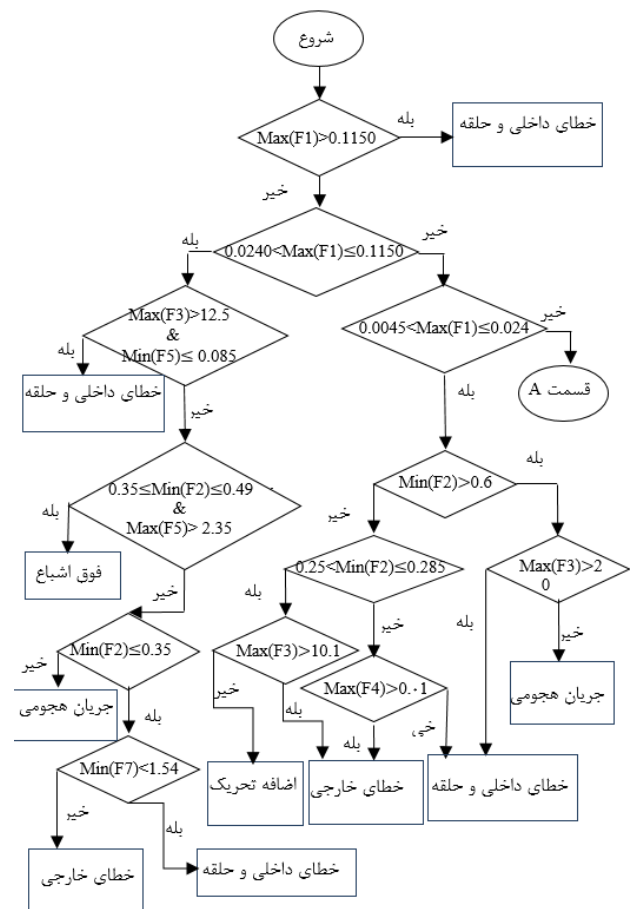
$$0.0240 < \max(F1) \leq 0.1150 \quad (27)$$

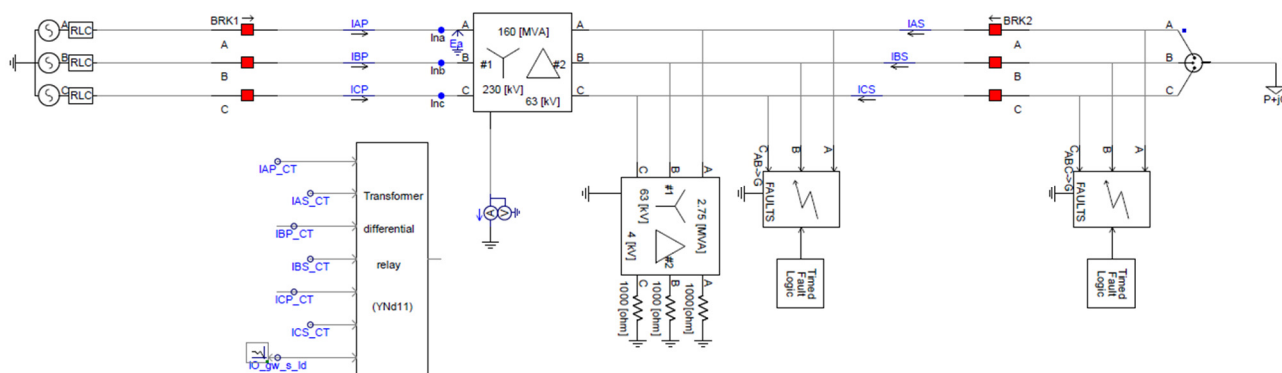
$$0.0045 < \max(F1) \leq 0.0240 \quad (28)$$

$$\max(F1) \leq 0.0045 \quad (29)$$

هر قسمت برای تفکیک شرایط مختلف از ویژگی‌های دیگر با محدوده‌های متنوعی استفاده شده است. با توجه به دامنه انرژی سطح اول، محدوده هر ویژگی در هر قسمت متفاوت است. محدوده‌های تعیین شده برای ویژگی‌ها در هر قسمت با توجه به آزمایش شرایط مختلف در حالت‌های بسیار زیاد تعیین شده است.

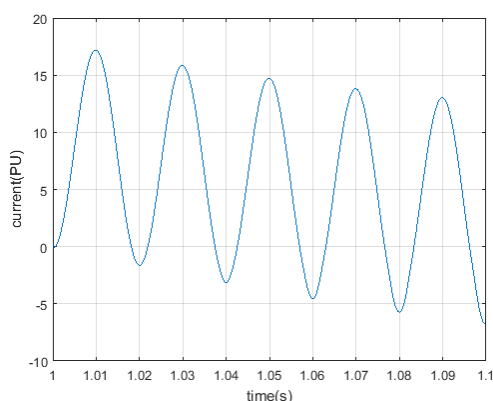
تشخیص برخی از رخدادها مانند شرایط فوق اشباع تنها نیاز به چند قید دارند و در قسمت دوم الگوریتم پیشنهادی قابل تشخیص می‌باشد اما شرایط دیگر شامل خطای داخلی و حلقه، خطای خارجی، جریان هجومی و اضافه تحریک در چند قسمت تشخیص داده خواهند شد. دلیل این مورد را می‌توان تغییرات دامنه جریان دیفرانسیل در هنگام رخداد این شرایط دانست. تغییرات دامنه شرایط مختلف تحت‌تأثیر تغییرات زاویه ولتاژ، تغییرات شار پسماند، تغییرات مقاومت خطا و اشباع ترانسفورماتورهای جریان می‌باشد.



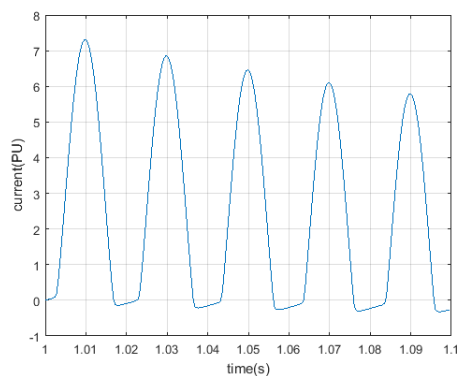


شرایط مختلف با وجود اشباع ترانسفورماتورهای جریان در جدول (۲) ارائه شده‌است. این روش در این شرایط هم عملکرد خوبی دارد.

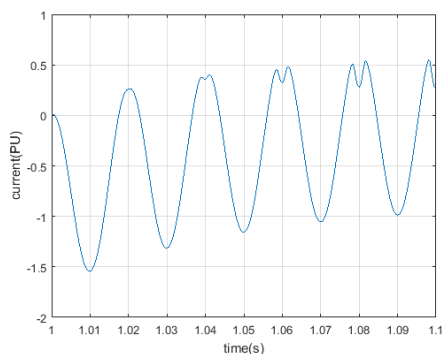
شکل ۲: پیاده‌سازی سیستم قدرت مورد مطالعه در نرم افزار PSCAD/EMTDC



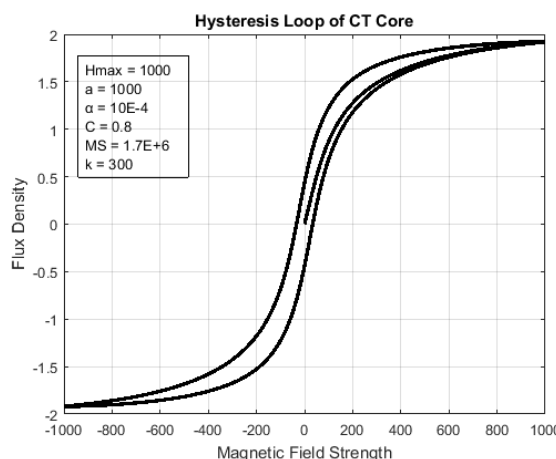
الف - جریان دیفرانسیل فاز a در شرایط خطای داخلی سه فاز



ب- جریان دیفرانسیل فاز a در شرایط جریان هجومی



ج- جریان دیفرانسیل فاز a در شرایط خطای خارجی سه فاز



شکل ۳: حلقه هیستریزیس هسته ترانسفورماتور جریان

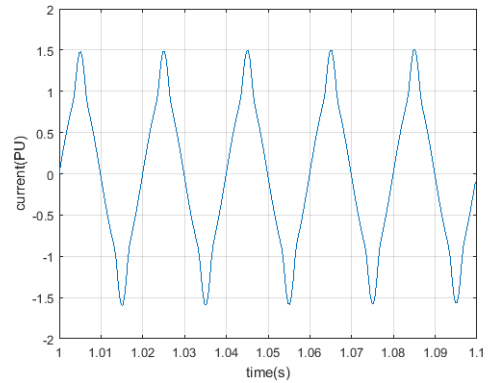
شکل‌های (الف - ه) به ترتیب سیگنال‌های جریان دیفرانسیل در شرایط خطای داخلی، جریان هجومی خطای خارجی، اضافه تحریک و فوق اشباع را نشان می‌دهد.

منحنی کانتور MHST که اطلاعات جامعی برحسب فرکانس و زمان از سیگنال مورد نظر ارائه می‌دهد در شکل‌های (الف - ه) نشان داده شده‌است. این منحنی براساس ماتریس MHST به دست خواهد آمد. همان‌طور که در شکل (الف - ه) مشخص شده‌است، منحنی به ۹ سطح مختلف تقسیم شده‌است، بزرگ‌ترین مقدار نشان‌دهنده اولین سطح کانتور و کوچک‌ترین مقدار نشان‌دهنده نهمین سطح کانتور می‌باشد. دامنه سطوح برای هر شرایط باتوجه به مقدار بیشینه ماتریس MHST آن شرایط تعیین خواهد شد. اختلاف بین دو سطح متوالی با- توجه به تعداد سطوح موردنظر تعیین خواهد شد و این اختلاف سطح هر دو سطح متوالی ثابت می‌باشد. در معادله (۱۰) و (۱۶) که نیاز به محاسبه سطح انرژی لایه اول و دوم است، از مقدار دامنه سطح اول و دوم در این منحنی استفاده خواهد شد.

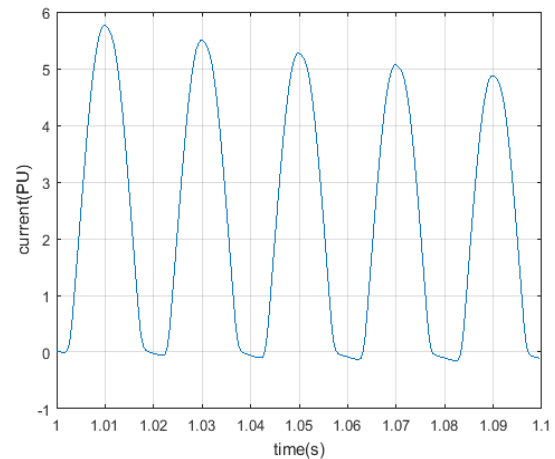
جدول (۱) نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی در تشخیص و کلاس‌بندی شرایط مختلف است. کارایی روش پیشنهادی در

تشخیص و کلاس‌بندی شرایط مختلف از تبدیل موجک استفاده شده است، با وجود عملکرد مناسب در شرایط خطای داخلی، خطای خارجی و جریان هجومی، شرایط فوق اشباع و اضافه تحریک به‌عنوان دو حالت گذرای دیگر بررسی نشده‌است. دقت تشخیص خطای داخلی، خطای خارجی و جریان هجومی در [۲۳] (HST)، به‌ترتیب برابر با $98/24\%$ ، $97/22\%$ و $98/81\%$ است و در شرایطی که نویز 20 db در نظر گرفته می‌شود، دقت تشخیص خطای داخلی، خطای خارجی و جریان هجومی به‌ترتیب برابر با $97/80\%$ ، $97/22\%$ و $97/61\%$ است. این مقاله با وجود بررسی حالت‌های مختلف در شرایط نویز، اما شرایط فوق اشباع و اضافه تحریک در نظر نگرفته‌است. در [۹] که از یک روش هوشمند ترکیبی استفاده کرده‌است، دقت تشخیص خطای داخلی، خطای خارجی و اضافه تحریک به‌ترتیب برابر با 100% ، $98/81\%$ و $97/36\%$ است. این مقاله علاوه‌بر این‌که شرایط نویز را در نظر نگرفته‌است حالت‌های خطای خارجی و فوق اشباع نیز بررسی نکرده‌است. در [۲۴] که از HST همراه با شبکه عصبی احتمالاتی^۸ استفاده شده‌است، دقت تشخیص خطای داخلی، خطای خارجی، جریان هجومی و اضافه تحریک، به‌ترتیب برابر با $99/12\%$ ، $98/33\%$ ، $98/81\%$ و $98/68\%$ است و در شرایطی که نویز 20 db در نظر گرفته می‌شود، دقت تشخیص خطای داخلی، خطای خارجی، جریان هجومی و اضافه تحریک به‌ترتیب برابر با $98/68\%$ ، $97/22\%$ و $96/05\%$ است. این مرجع با وجود دقت مناسب و در نظر گرفتن شرایط و حالت‌های گذرای بیشتر اما شرایط فوق اشباع را بررسی نکرده‌است.

فرایند تصمیم‌گیری و تشخیص خطای داخلی در روش پیشنهادی برای بدترین شرایط (خطاهای داخلی با جریان دیفرانسیل کم) $17/5\text{ ms}$ است. مقایسه زمانی روش پیشنهادی با دیگر روش در جدول (۶) انجام شده‌است. مراجع [۹، ۲۳] اطلاعاتی درباره زمان تصمیم‌گیری روش پیشنهادی ارائه نکرده‌است. مراجع [۲۴، ۳۸] از نظر سرعت تشخیص عملکرد مناسبی دارند. مرجع [۴۰]، کاتالوگ مربوط به رله دیفرانسیل استاندارد Areva ساخت کشور فرانسه است. براساس مرجع [۴۰]، زمان تصمیم‌گیری حفاظت دیفرانسیل استاندارد بین 30 تا 40 میلی‌ثانیه است. روش پیشنهادی در بدترین شرایط خطای داخلی، در کمتر از یک سیکل، رله دیفرانسیل می‌تواند عمل کند. بنابراین الگوریتم روش پیشنهادی از نظر دقت و سرعت عملکرد مناسبی خواهد داشت.



د- جریان دیفرانسیل فاز a در شرایط اضافه تحریک

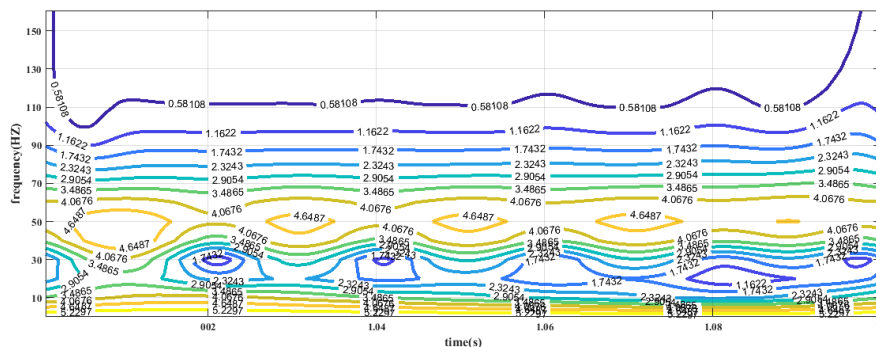


ه- جریان دیفرانسیل فاز a در شرایط فوق اشباع

شکل ۴: جریان دیفرانسیل فاز a در شرایط مختلف

برای این‌که تاثیر نویز بر روی الگوریتم پیشنهادی مشاهده شود، سطح نویز 20 db به سیگنال جریان دیفرانسیل اضافه شده و با MHST برای استخراج ویژگی اجرا شده‌است. این بالاترین سطح نویز افزودنی است که می‌تواند شرایط واقعی سیگنال را در سیستم قدرت منعکس کند. همان‌طور که از جدول (۳) مشخص است، تاثیر نویز فقط بر روی دو شرایط اضافه تحریک و خطای داخلی به‌صورت ناچیز می‌باشد. سه شرایط خطای خارجی، جریان هجومی و فوق اشباع تحت تاثیر نویز قرار نمی‌گیرد.

مقایسه نتایج روش‌های مختلف در شرایط بدون نویز و همراه با نویز به‌ترتیب در جدول‌های (۴) و (۵) نشان داده شده‌است. در [۳۹] که برای



الف- کانتر MHST خطای داخلی سه‌فاز

جدول ۵: مقایسه دقت کلاس بندی و تشخیص روش های مختلف با وجود نویز

روش پیشنهادی	HST + PNN [۲۴]	KNN + GA [۹]	HST [۲۳]	WT [۳۹]	شرایط
۹۸/۲۴٪	۹۸/۶۸٪	-	۹۷/۸۰٪	-	خطای داخلی و حلقه
۹۶/۴۳٪	۹۷/۶۱٪	-	۹۷/۶۱٪	-	جریان هجومی
۹۸/۳۳٪	۹۷/۲۳٪	-	۹۷/۲۳٪	-	خطای خارجی
۹۶/۰۵٪	۹۶/۰۵٪	-	-	-	اضافه تحریک
۱۰۰٪	-	-	-	-	فوق اشباع
۹۷/۸۷٪	۹۷/۷۱٪	-	۹۷/۵۶٪	-	کل شرایط

جدول ۶: مقایسه زمان تصمیم گیری روش های مختلف

رله استاندارد Areva [۴۰]	روش پیشنهادی	HST + PNN [۲۴]	KNN + GA [۹]	HST [۲۳]	WT [۳۹]	الگوریتم های پیشنهادی
زمان تصمیم گیری ۲۰ تا ۴۰ میلی ثانیه	۱۷/۵	عدم بررسی	عدم بررسی	عدم بررسی	۱۱	زمان تصمیم گیری (ms) بحسب

۵- نتیجه گیری

این مقاله یک روش جدید برای تشخیص خطای داخلی و حلقه از دیگر شرایط شامل: جریان هجومی، خطای خارجی، اضافه تحریک و فوق اشباع ارایه می کند. MHST به عنوان یک آنالیزکننده زمان - فرکانس سیگنال های جریان دیفرانسیل غیرایستا استفاده می شود و عملکرد بهتری نسبت به تبدیل S ارایه می کند. المان های ماتریس MHST اعداد مختلطی هستند که دامنه و فاز فرکانس های مختلف را در هر زمان مشخص می کند، لذا اطلاعات کاملی از شکل موج مورد نظر به دست خواهد آمد. بنابراین، با توجه به ماتریس MHST، یکسری ویژگی های معناداری استخراج خواهد شد.

انرژی سطح اول (F1) بعنوان مهم ترین ویژگی، الگوریتم پیشنهادی را به چهار قسمت مختلف تقسیم می کند. "دیگر ویژگی های استخراج شده شامل: شاخص واریانس، انحراف معیار فاز مولفه اصلی و هارمونیک دوم و سه معیار ویژه، در هر مرحله شرایط مختلف را از یک دیگر متمایز می کنند." همان طور که نشان داده شد، روش پیشنهادی در مراحل مختلف و در مجموع به خوبی قادر است شرایط مختلف را تشخیص داده و کلاس بندی کند. این روش هیچ نیازی به آموزش و تست ویژگی های استخراج شده مانند الگوریتم های مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی ندارد و عمل تشخیص با انجام چند مقایسه ساده انجام می گیرد.

یکی از شرایط چالش برانگیز، وقوع رخداد های همراه با اشباع CT است که می تواند منجر به عملکرد اشتباه رله شود. روش پیشنهادی در مقابل با این چالش، عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. هم چنین

جدول ۱: عملکرد کلی روش پیشنهادی

دقت٪	تشخیص نادرست	تشخیص صحیح	شرایط
۹۹/۱۲	۲	۲۲۶	خطای داخلی و حلقه
۹۸/۸۱	۱	۸۳	جریان هجومی
۹۸/۳۳	۳	۱۷۷	خطای خارجی
۹۸/۶۸	۱	۷۵	اضافه تحریک
۱۰۰	-	۴۲	فوق اشباع
۹۸/۸۵	۷	۶۰۳	کل شرایط

جدول ۲: عملکرد روش پیشنهادی در شرایط اشباع ترانسفورماتور های جریان

دقت٪	تشخیص نادرست	تشخیص صحیح	شرایط
۹۸/۸۹	۱	۸۹	خطای داخلی و حلقه
۱۰۰	-	۴۲	جریان هجومی
۹۸/۸۹	۱	۸۹	خطای خارجی
۹۹/۱۰	۲	۲۲۰	کل شرایط

جدول ۳: عملکرد روش پیشنهادی با وجود نویز

نویز 20db				عدم نویز
دقت٪	دقت٪	تشخیص نادرست	تشخیص صحیح	شرایط
۹۹/۱۲	۹۸/۲۴	۴	۲۲۴	خطای داخلی و حلقه
۹۸/۸۱	۹۶/۴۳	۳	۸۱	جریان هجومی
۹۸/۳۳	۹۸/۳۳	۳	۱۷۷	خطای خارجی
۹۸/۶۸	۹۶/۰۵	۳	۷۳	اضافه تحریک
۱۰۰	۱۰۰	-	۴۲	فوق اشباع
۹۸/۸۵	۹۷/۸۷	۱۳	۵۹۷	کل شرایط

جدول ۴: مقایسه دقت کلاس بندی و تشخیص روش های مختلف بدون وجود نویز

روش پیشنهادی	HST + PNN [۲۴]	KNN + GA [۹]	HST [۲۳]	WT [۳۹]	شرایط
۹۹/۱۲٪	۹۹/۱۲٪	۱۰۰٪	۹۸/۲۴٪	۱۰۰٪	خطای داخلی و حلقه
۹۸/۸۱٪	۹۸/۸۱٪	۹۸/۸۱٪	۹۸/۸۱٪	۱۰۰٪	جریان هجومی
۹۸/۳۳٪	۹۸/۳۳٪	-	۹۷/۲۲٪	۱۰۰٪	خطای خارجی
۹۸/۶۸٪	۹۸/۶۸٪	۹۷/۳۶٪	-	-	اضافه تحریک
۱۰۰٪	-	-	-	-	فوق اشباع
۹۸/۸۵٪	۹۸/۷۷٪	۹۹/۲۲٪	۹۷/۹۷٪	۱۰۰٪	کل شرایط

- protection in substations with an inner bridge connection," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 27, no. 3, pp. 1178-1185, 2012.
- [14] K. L. Butler-Purry and M. Bagriyanik, "Characterization of transients in transformers using discrete wavelet transforms," IEEE Transaction Power System, vol. 18, no. 2, pp. 648-654, 2003.
- [15] A. Aktabi, M. A. Rahman and A. M. Razali, "An experimental implementation of the dq-axis wavelet packet transform hybrid technique for three-phase power transformer protection," IEEE Transaction Industry. Applications., vol. 50, no. 4, pp. 2919-2927, 2014.
- [16] A. M. Shah, and B. R. Bhalja, "Discrimination between internal faults and other disturbances in transformer using the support vector machine-based protection scheme" IEEE Transaction Power Delivery., vol. 28, no.3, pp. 1508-1515, 2013.
- [۱۷] سجاد باقری، زهرا مروج و گنورق قره‌پتیان، « 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، شماره ۱، دوره ۴۸، صفحه ۲۱-۳۲، بهار ۱۳۹۷
- [18] M. Rasoulpoor and M. Banejad, "A correlation based method for discrimination between inrush and short circuit currents in differential protection of power transformer using discrete wavelet transform: Theory, simulation and experimental validation," International Journal of Electric Power and Energy Systems, vol. 51, pp. 168-177, 2013.
- [19] S. Jazebi, B. Vahidi, S. H. Hosseinian and J. Faiz, "Magnetizing inrush current identification using wavelet based Gaussian mixture models," Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 17, no. 6, pp. 991-1010, 2009.
- [20] R. Kumar, B. Singh, D. T. Shahani, A. Chandra and K. Al-Haddad, "Recognition of power-quality disturbances using S-transform-based ANN classifier and rule-based decision tree," IEEE Transaction Industry Application, vol. 51, no. 1, pp. 2919-2927, 2015.
- [21] M. Biswal and P. K. Dash, "Measurement and classification of simultaneous power signal patterns with an S-transform variant and Fuzzy decision tree," IEEE Transaction Industry Application , vol. 9, no. 4, pp. 1819-1827, 2013.
- [22] Z. Moravej , A. A. Abdoos and M. Sanaye-Pasand, "Power transformer protection using improved S-transform", Electric Power Components and Systems, vol. 39, no. 11, pp. 1151-1174, 2011.
- [23] A. Ashrafiyan, M. Rostami and G. B. Gharehpetian, "Hyperbolic S-transform-based method for classification of external faults, incipient faults, inrush currents and internal faults in power transformers," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, no. 10, pp. 940-950, 2012.
- [24] Z. Moravej, A. A. Abdoos and M. Sanaye-Pasand, "Power transformer protection scheme based on time-frequency analysis," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 23, no.4, pp. 473-493, 2013.
- [25] A. Ashrafiyan, B. Vahidi and M. Mirsalim, "Time-time-transform application to fault diagnosis of power transformers" IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, no. 6, pp. 1156-1167, 2014.
- [26] H. Dashti and M. Sanaye-Pasand, "Power transformer protection using a multiregion adaptive differential relay," IEEE Transaction Power Delivery, vol. 29, no. 2, pp. 777-785, 2014.
- [27] W. Zhang, Q. Tan, S. Miao, L. Zhou and P. Liu, "Self-adaptive transformer differential protection", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 7, no. 1, 2013.
- [28] X. Lin and P. Liu, "The Ultra-Saturation Phenomenon of Loaded Transformer Energization and Its Impacts on Differential Protection", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1265-1272, 2005.
- [29] B. Noshad, M. Razaz, S. G. Seifossadat, "A new algorithm based on Clarke's transform and discrete wavelet transform for the differential protection of three-phase power transformers considering the ultra-saturation phenomenon", Electric Power Systems Research, vol. 110, pp. 9-24, May 2014.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم فوق قادر به تمایز صحیح خطای داخلی از دیگر شرایط حتی در شرایط نویزی است. در نتیجه روش ارائه‌شده، برخلاف روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک که بعضاً حساس به نویز هستند، نیاز به الگوریتم‌های حذف نویز ندارند. زمان تصمیم‌گیری روش پیشنهادی در کمتر از یک سیکل پس از خطا است که نشان‌دهنده سرعت عملکرد مناسب این روش است.

پیوست

جدول ۷: مشخصات ترانسفورماتورهای جریان

CT	اولیه	ثانویه
نسبت تبدیل	600:1	2000:1
$R_s (\Omega)$	4.3	7.77
$L_s (H)$	1E-4	1E-5
$A (m^2)$	32.94E-4	10.36E-4
L (m)	0.848	0.548

مراجع

- [1] J. L. Blackburn and T. J. Domin, "Protective Relaying: Principles and Applications", Third Edition. Taylor & Francis, 2006.
- [2] R. P. Medeiros, F. B. Costa and K. M. Silva, "Power Transformer Differential Protection Using the Boundary Discrete Wavelet Transform," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 5, pp. 2083-2095, 2016.
- [3] S. K. Murugan, S. P. Simon, P. S. R. Nayak, K. Sundareswaran and N. P. Padhy, "Power transformer protection using chirplet transform," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 10, no. 10, pp. 2520-2530, 2016.
- [4] M. Y. Asrami , M. T. Gorjilolaie, S. M. Razavi and S. A. Gholamian, "A novel intelligent protection system for power transformers considering possible electrical faults, inrush current, CT saturation and over-excitation", Electrical Power and Energy Systems, vol. 64, pp. 1129-1140, 2015.
- [5] S. Horowitz and A. Phadke, *Power System Relaying*. Taunton, Somerset: Research studies press, 1992.
- [6] "Ieee guide for protecting power transformers," IEEE Std C37.91-2008 (Revision of IEEE Std C37.91-2000), pp. 1-139, 2008.
- [7] H. Zhang, P. Liu and O. P. Malik, "A new scheme for inrush identification in transformer protection," Electric Power System Research, vol. 63, no. 2, pp. 81-86, 2002.
- [8] D. Guillen, H. Esponda, E. Vazquez and G. Idarraga-Ospina, "Algorithm for transformer differential protection based on wavelet correlation modes", IET Gen. Transm. Distrib., vol. 10, no. 12, pp. 2871-2879, 2016.
- [9] P. B. Thote, M. B. Daigavane, P. M. Daigavane and S. P. Gawande, "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.
- [10] T. Zheng, T. Huang, Y. Ma, Z. Zhang and L. Liu, "Histogram-Based Method to Avoid Maloperation of Transformer Differential Protection Due to Current-Transformer Saturation Under External Faults", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 610-619, 2018.
- [11] A. Rahmati and M. Sanaye-Pasand, "Protection of power transformer using multi criteria decision-making," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 68, pp. 294-303, 2015.
- [12] S. Hasheminejad and S. Esmaili, "Transient actions analysis of power transformers based on S-transform and hidden Markov model", Int. Trans. Electr. Energy Syst, vol. 24, pp. 826-841, 2014.
- [13] T. Zheng, J. Gu, S. F. Huang, F. Guo and V. Terzija, "A new algorithm to avoid maloperation of transformer differential

- [36] C. R. Pinnegar and L. Mansiha, "Time Local Spectral Analysis for Nonstationary Time Series: The S Transform for Noisy Signals", *Fluctuation and Noise Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 357-364, 2003.
- [37] بهرام نوشاد، مرتضی رزاز و سید قدرت اله سیف السادات، «تعیین یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان برای آنالیز حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی در طی خطاهای الکتریکی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، شماره ۲، دوره ۴۱، صفحه ۷۷-۸۷، پاییز ۱۳۹۰
- [38] D. C. Jiles, J. B. Thoeke and M. Devine, "Numerical determination of hysteresis parameters using the theory of ferromagnetic hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, no. 1, pp. 27-35, 1992.
- [39] R. P. Medeiros, F. B. Costa, "A Wavelet-Based transformer differential protection with differential current transformer saturation and cross country fault detection", *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 789-799, 2018.
- [40] Transformer Differential Protection Relay, AREVA, KBCH 120, 130, 140, service manual, KBCH/EN M/G11, 2001, <http://www.aveva-td.com/contactcentre>.
- [30] A. Moukadem, D. Q. Abdeslam and A. Dieterlen, "Time-Frequency Domain for Segmentation and Classification of Non-Stationary Signals, Wiley-ISTE, ISBN978-1-84821-613-6, 2014.
- [31] R. G. Stockwell, L. Mansinha and R. Lowe, "Localization of the complex spectrum: the S transform", *IEEE Transaction Signal Processing*, vol.44, pp.998-1001, 1996.
- [32] M. J. Reddy, R. K. Raghupathy, K. Venkatesh and D. Mohanta, "Power quality analysis using discrete orthogonal s-transform", *Digital Signal Processing*, vol. 23, no. 2, pp. 616-626, 2013.
- [33] P. D. McFadden, J. G. Cook and L. M. Forster, "Decomposition of gear vibration signals by the generalized S transform", *Mechanical and System Signal Processing*, vol. 13, no.5, pp. 691-707, 1999.
- [34] C. R. Pinnegar, L. Mansinha, "The S-transform with windows of arbitrary and varying shape," *Geophysics*, vol. 68, no. 1, pp. 381-385, January 2003.
- [35] C. R. Pinnegar, L. Mansinha, "The bi-Gaussian S-transform," *Siam Journal Science Computing*, vol. 24, no. 5, pp. 1678-1692, 2003.

زیر نویس‌ها

- ¹ Hidden Markov
- ² Wavelet Transform
- ³ Modified hyperbolic stockwell transform
- ⁴ Short Time Fourier Transform
- ⁵ Gaussian Window
- ⁶ Msnitude Contour
- ⁷ Frequency contour
- ⁸ Probabilistic neural network