
Transformer differential protection using fault-generated high-frequency transient components

Saeid Hasheminejad¹

1- Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
s.hasheminejad@kgut.ac.ir

Abstract:

Power transformers are the most important components of a power system, so their protection is a critical issue. This paper proposes a novel and efficient algorithm based on the high-frequency components of the differential current signal to discriminate between the magnetizing inrush currents and the internal faults. After detecting the over-current in the differential current signals, samples of a quarter of a cycle of the signal are recorded. Then, discrete wavelet transform (DWT) is applied to the recorded signals, and the details of the wavelet transform output are extracted. Because of the existence of the high-frequency transients in the internal fault current signals, the wavelet transform outputs of the internal fault signals have more fluctuations than that of the inrush current signals. By calculating the standard deviation of the wavelet transform output, the fluctuations can be quantified. Therefore, the standard deviation of the wavelet transform output can be used as a criterion to discriminate between the internal faults and the magnetizing inrush currents. The proposed algorithm has a very low computational burden, and it uses only a quarter of a cycle of the differential current signals. This guarantees the high speed of the proposed algorithm. The proposed algorithm is tested by different conditions of the internal faults and the inrush situations, and it successfully identifies the true situation with high accuracy in all conditions. The simulation results show the superior specifications of the proposed algorithm.

Keywords: differential protection, wavelet transform, high-frequency components, standard deviation of the WT output

Submit date: 2022/04/11
Accepted date: 2022/10/03

Corresponding author's Name: Saeid Hasheminejad
Corresponding author's address: s.hasheminejad@kgut.ac.ir

حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت بر اساس مؤلفه‌های گذرای فرکانس بالای تولید شده توسط خطا

نوع مطالعه: پژوهشی

سعید هاشمی نژاد^۱، استادیار

۱- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، کرمان، ایران

Saeidhasheminejad@yahoo.com, S.hasheminejad@kgut.ac.ir

چکیده: ترانسفورماتورها از مهمترین تجهیزات شبکه‌ی قدرت هستند که حفاظت از آن‌ها اهمیت بسیار بالایی دارد. در این مقاله، یک الگوریتم جدید و کارآمد بر اساس محتوای فرکانس بالای جریان دیفرانسیل، برای تشخیص سیگنال‌های جریان مربوط به خطای داخلی از سیگنال‌های جریان هجومی پیشنهاد شده است. در الگوریتم پیشنهادی، پس از مشاهده‌ی افزایش در دامنه‌ی جریان دیفرانسیل، نمونه‌های یک چهارم سیکل از جریان دیفرانسیل ثبت می‌شود. سپس تبدیل موجک بر نمونه‌های ثبت شده اعمال می‌شود. در مرحله‌ی بعد، جزئیات تبدیل موجک مربوط به همان یک چهارم سیکل از جریان دیفرانسیل، استخراج می‌شود. در سیگنال‌های جریان ناشی از خطا، مؤلفه‌های فرکانس بالای زیادی وجود دارد. در نتیجه، نوسانات موجود در خروجی تبدیل موجک برای سیگنال‌های جریان خطای داخلی بسیار بیشتر از سیگنال‌های مربوط به جریان هجومی است. با به دست آوردن انحراف معیار خروجی تبدیل موجک، می‌توان این نوسانات را کمی‌سازی کرد. بنابراین، مقدار انحراف معیار خروجی تبدیل موجک، به عنوان ابزاری برای شناسایی خطای داخلی از شرایط جریان هجومی استفاده می‌شود. بار محاسباتی بسیار پایین الگوریتم پیشنهادی و نیاز به فقط یک چهارم سیکل از نمونه‌های سیگنال جریان ورودی، تضمین کننده‌ی سرعت بالای این الگوریتم است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که حداکثر حدود ۱۱ms بعد از وقوع خطا، الگوریتم پیشنهادی قادر است که وقوع خطای داخلی را شناسایی کند. به علاوه، نتایج نشان می‌دهد که اشباع CTها روی الگوریتم پیشنهادی تأثیری ندارد و خطاهای امپدانس بالا و نیز خطاهایی که همزمان با حضور جریان هجومی اتفاق می‌افتند هم با الگوریتم پیشنهادی تشخیص داده می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: حفاظت دیفرانسیل، تبدیل موجک، مؤلفه‌های فرکانس بالا، انحراف معیار خروجی تبدیل موجک

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۰۷/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول : سعید هاشمی نژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کرمان، انتهای بلوار هفت باغ، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

الف) اهمیت و اهداف

ترانسفورماتورهای قدرت از مهمترین و گرانترین تجهیزات یک شبکه‌ی قدرت هستند. بنابراین، حفاظت آنها در قبال خطاهای اتصال کوتاه، یکی از مهمترین مسائلی است که باید به آن پرداخته شود. دقت و سرعت از مهمترین پارامترهایی هستند که در حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت باید در نظر گرفته شوند. یک حفاظت سریع و دقیق باعث می‌شود که تجهیزات شبکه‌ی قدرت کمترین آسیب را در قبال خطاهای اتصال کوتاه ببینند و همچنین باعث می‌شود که قابلیت اطمینان تغذیه‌ی بارهای شبکه بالا برود.

ب) کلیات موضوع

در ارائه‌ی الگوریتم حفاظتی باید بعضی از شرایط عملکرد شبکه که دقت سیستم حفاظتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند هم در نظر گرفته شوند (Esponda, H., et. Al., 2019). بعضی از اغتشاشات هستند که عملکرد ترانسفورماتورهای قدرت را مختل می‌کنند. از این جمله، می‌توان به جریان هجومی مغناطیس‌شوندگی، خطاهای داخلی، خطاهای خارجی و پدیده‌ی فوق اشباع اشاره کرد (Dashti, H., 2017, Sanaye-Pasand, M., 2014, Ashrafiyan, A., 2017). الگوریتم حفاظتی به کار رفته برای ترانسفورماتور، باید این تجهیز را در مقابل اغتشاشات مختلف به صورتی مناسب، با بیشترین قابلیت اعتماد و با بیشترین سرعت محافظت کند (Tajdinian, M., Samet, H., 2021).

وقتی که یک خطای داخلی در ترانسفورماتور قدرت اتفاق می‌افتد، رله‌ی حفاظتی باید بتواند که ترانسفورماتور تحت خطا را از بقیه‌ی شبکه‌ی قدرت جدا کند تا اینکه خسارت وارده به ترانسفورماتور از سوی خطای اتصال کوتاه را مسدود کند. مهمترین الگوریتم حفاظتی که برای ترانسفورماتورهای قدرت استفاده می‌شود، حفاظت دیفرانسیل است (Samet, H., et. Al., 2022). وقتی که یک خطای داخلی در ترانسفورماتور اتفاق می‌افتد، یک جریان دیفرانسیل توسط رله دیده می‌شود که دامنه‌ی آن بسیار بیشتر از دامنه‌ی جریان دیفرانسیل در شرایط عادی ترانسفورماتور است. دامنه‌ی جریان دیفرانسیل پارامتری است که می‌توان از آن برای شناسایی خطاهای داخلی ترانسفورماتور استفاده کرد. مشکل اینجاست که شرایط دیگری نیز وجود دارند که خطا نیستند ولی دامنه‌ی جریان دیفرانسیل را افزایش می‌دهند. وقتی که ترانسفورماتوری برقرار می‌شود، جریان هجومی مغناطیس‌شوندگی داخل سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور ایجاد می‌شود و دامنه‌ی جریان دیفرانسیل ورودی به رله را افزایش می‌دهد. جریان هجومی یک جریان گذراست که بعد از چند سیکل کاهش یافته و به ترانسفورماتور آسیبی نمی‌رساند. بنابراین، رله لازم نیست که برای این شرایط، فرمان قطع را

به بریکرها ارسال کند. این جریان هجومی در شرایطی که یک ترانسفورماتور به طور موازی با ترانسفورماتوری که در مدار قرار دارد برقرار شود (Bera, P. K., et. Al., 2021) یا وقتی که یک ترانسفورماتور از یک خطای خارجی بازایی می‌شود (Shah, A. et. Al., 2020) نیز اتفاق می‌افتد.

ج) مروری بر مقالات

با در نظر گرفتن موارد ذکر شده، نتیجه می‌شود که الگوریتم حفاظتی مورد استفاده باید بتواند خطای داخلی را از دیگر شرایطی که در اینجا به عنوان جریان هجومی ترانسفورماتور تشریح شدند تشخیص دهد. جریان هجومی حاوی مقادیر قابل توجهی از مؤلفه‌ی هارمونیک دوم است که در الگوریتم‌های حفاظتی دیفرانسیل قدیمی از آن استفاده شده است (Tripathy, M., et. Al., 2005, Phadke, A., 1983, G., Thorp, J. S., 1983). الگوریتم‌های بر پایه هارمونیک دوم جریان دیفرانسیل، امروزه قابلیت خود را تا حدودی از دست داده‌اند. چرا که هنگام وقوع خطای داخلی، اشباع CT^۱ هم ممکن است اتفاق بیفتد که موجب تولید هارمونیک دوم در جریان دیفرانسیل می‌شود. به علاوه، هسته‌های ترانسفورماتورهای جدید به گونه‌ای ساخته می‌شوند که در شرایط برقرار کردن ترانسفورماتور هارمونیک دوم کمتری تولید می‌شود (Zheng, T., 2018). در بعضی از مراجع مثل (Murugan, S., 2017, K., et. Al., 2017)، از جریان دیفرانسیل یک سری از ویژگی‌ها استخراج می‌شود. با استفاده از این ویژگی‌ها مشخص می‌شود که شرایط افزایش جریان دیفرانسیل، مربوط به یک خطای داخلی بوده و یا مربوط به جریان هجومی است. در بعضی از مراجع، از الگوریتم‌های هوش مصنوعی مثل شبکه‌های عصبی (Afrasiabi, S., et. Al., 2020) و الگوریتم ژنتیک (Thote, P. B., et. Al., 2017) برای شناسایی سیگنال جریان خطای داخلی از سیگنال مربوط به جریان هجومی استفاده شده است. تبدیل موجک^۲ روشی است که به صورت گسترده در الگوریتم‌های حفاظتی ترانسفورماتورها استفاده شده است (Costa, F. B., 2018, Medeiros, R. P., 2018, Medeiros, R. P., 2018, Costa, F. B., 2018, Naseri, F., et. Al., 2018). از فیلتر کالمن برای تخمین جریان اولیه‌ی ترانسفورماتور استفاده شده است. اگر جریان تخمینی با جریان اندازه‌گیری شده در اولیه‌ی ترانسفورماتور تفاوت قابل توجهی داشته باشد، شرایط خطا شناسایی می‌شود.

در سال‌های اخیر، برای افزایش سرعت رله‌های دیفرانسیل، مؤلفه‌های فرکانس بالای موجود در جریان دیفرانسیل برای شناسایی خطای داخلی از جریان هجومی ترانسفورماتور استفاده شده است (Simoes, L. D., et. Al., 2021).

د) نوآوری مقاله

در این مقاله، یک الگوریتم جدید و بسیار سریع بر اساس مؤلفه‌های فرکانس بالای موجود در جریان دیفرانسیل، برای حفاظت از

در رابطه‌ی مربوط به تبدیل موجک، یک موجک مادر^۳ وجود دارد که برای هر کاربرد باید به درستی انتخاب شود. تبدیل موجک پیوسته‌ی مربوط به تابع $x(t)$ ، به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود.

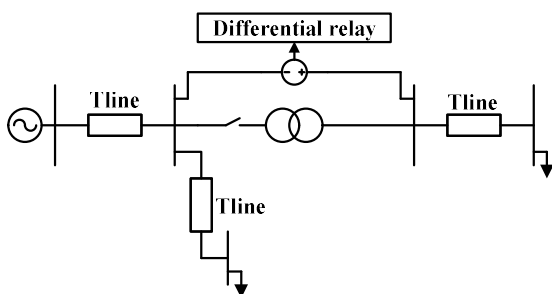
$$WT_x^\psi(\tau, S) = \frac{1}{\sqrt{S}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{\tau-t}{S} \right) dt \quad (1)$$

که در آن τ و S به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس بوده و ψ همان موجک مادر انتخاب شده است. در این رابطه، منظور از ψ^* ، مزدوج مختلط تابع مربوط به موجک مادر ψ می‌باشد.

در این مقاله، برای استخراج مشخصات فرکانس بالای جریان دیفرانسیل مربوط به ترانسفورماتور حفاظت شده، از تبدیل موجک استفاده شده است. نحوه‌ی استخراج مشخصات ذکر شده، در بخش‌های بعدی به طور مفصل توضیح داده می‌شود.

۳- الگوریتم پیشنهادی

برای طراحی الگوریتم پیشنهادی این مقاله، شبکه‌ی قدرت نشان داده شده در شکل (۱) در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است.



شکل (۱): شبکه شبیه‌سازی شده

ترانسفورماتور شبیه‌سازی شده $230\text{ kV}/400\text{ kV}$ بوده که در شرایط بی باری و بارداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از جریان دو سمت ترانسفورماتور نمونه‌برداری شده و این جریان‌ها به منظور حفاظت از ترانسفورماتور در قبال خطاهای داخلی، وارد رله‌ی دیفرانسیل می‌شوند.

۳-۱- مطالعات اولیه

در این مقاله، از تفاضل دو جریان ورودی به رله، جریان دیفرانسیل ساخته می‌شود. در شرایط عملکردی عادی ترانسفورماتور، پس از حذف اثر نسبت تبدیل ترانسفورماتور، جریان‌ها تقریباً با یکدیگر برابر هستند و جریان دیفرانسیل تقریباً صفر است. اما در صورت بروز خطای داخلی در ترانسفورماتور، این جریان مقداری غیر صفر را پیدا می‌کند. به عنوان مثال، شکل (۲) جریان دیفرانسیل ناشی از یک خطای داخلی در ترانسفورماتور را نشان می‌دهد. خطای شبیه‌سازی شده، یک خطای Ag است یعنی فاز A تحت خطا است. مقاومت خطا

ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی، پس از مشاهده‌ی افزایش در نمونه‌های جریان دیفرانسیل، یک چهارم سیکل از این جریان ثبت می‌شود. سپس تبدیل موجک به نمونه‌های ثبت شده اعمال شده و سپس مؤلفه‌های فرکانس بالای موجود در آن استخراج می‌شود. جزئیات خروجی تبدیل موجک به صورت شکل موجی است که وجود تغییرات لحظه‌ای در مقدار این موج نشان دهنده‌ی وجود مؤلفه‌های فرکانس بالاست. در این مقاله، از همین تغییرات لحظه‌ای برای شناسایی خطای داخلی از شرایط جریان هجومی ترانسفورماتور استفاده می‌شود. هدف این مقاله، ارائه یک الگوریتم سریع و دقیق بوده که بار محاسباتی کمی نیز داشته باشد. بنابراین، چنین الگوریتمی قابلیت پیاده‌سازی بهتری را بر روی رله‌ها دارد. کمی سازی خروجی تبدیل موجک با استفاده از محاسبه انحراف معیار آن، نوآوری این مقاله است. در واقع استفاده از ترکیب تبدیل موجک به عنوان روشی دقیق برای استخراج سیگنال‌های فرکانس بالا و محاسبه انحراف معیار خروجی آن، به روشی بسیار ساده و دقیق برای شناسایی خطاهای داخلی ترانسفورماتور از جریان هجومی منجر می‌شود. این معیار، از مطالعه دقیق گذراهای ناشی از خطاهای داخلی ترانسفورماتورها و پدیده‌ی جریان هجومی حاصل شده است. به این ترتیب که یک خطای داخلی سیگنال‌های گذرای بزرگ‌دامنه‌تری را نسبت به جریان هجومی تولید می‌کند. نحوه‌ی استفاده از خروجی تبدیل موجک و نیز روش شناسایی خطای داخلی کاملاً جدید و مختص این مقاله است. الگوریتم پیشنهادی بر خلاف روش ارائه شده در (Simoes, L. D., et. Al., 2021) نیاز به داده‌های اضافی برای آموزش الگوریتم ندارد و با محاسباتی کمتر، خطاهای داخلی را از شرایط جریان هجومی تشخیص می‌دهد. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی ساده‌تر بوده و قابلیت بهتری برای پیاده‌سازی بر روی رله‌ها در شرایط واقعی را خواهد داشت.

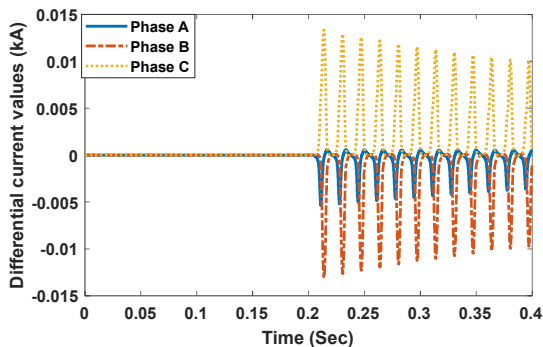
(ه) ساختار مقاله

در بخش ۲ مقاله، تبدیل موجک و رابطه‌ی ریاضی مربوطه معرفی خواهد شد. در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی تشریح می‌شود. بخش ۴ مربوط به شبیه‌سازی و نتایج بوده و نتیجه‌گیری کلی مقاله در بخش ۵ام ارائه شده است.

۲- تبدیل موجک

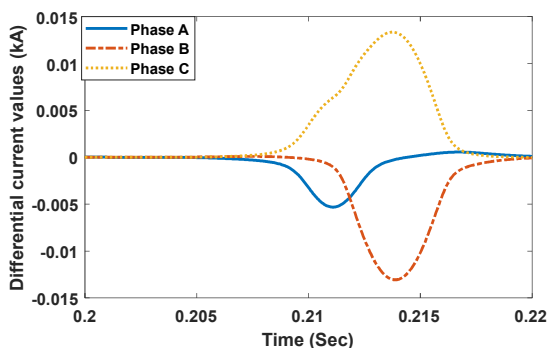
تبدیل موجک یک تابع ریاضی است که با استفاده از آن، سیگنال‌های گسسته و پیوسته را می‌توان به اجزاء فرکانسی تشکیل دهنده‌ی آن تقسیم کرد. در واقع، تبدیل موجک این قابلیت را دارد که هر دو اطلاعات زمانی و فرکانسی سیگنال شبکه‌ی قدرت را استخراج کند. به همین دلیل است که این روش به طور گسترده‌ای، برای تحلیل سیگنال‌های گذرا، در الگوریتم‌های مربوط به آنالیز کیفیت توان شبکه‌ی قدرت (Gao, et. Al.) و حفاظت سیستم‌های قدرت (Medeiros, et. Al.) استفاده شده است.

۵ اهم بوده و خطا در لحظه‌ای که زاویه ولتاژ فاز A، 120° درجه بوده، اتفاق افتاده است.



شکل (۴): امواج سه فاز جریان دیفرانسیل برای جریان هجومی

برای تولید سیگنال جریان هجومی، ترانسفورماتور بدون بار در نظر گرفته شده و در لحظه‌ی 0.2 ثانیه، برقرار شده است. برای تحلیل سیگنال‌های گذرای موجود در جریان هجومی، بزرگنمایی این جریان‌ها در اطراف لحظه‌ی برقرار شدن ترانسفورماتور، در شکل (۵) نشان داده شده است.

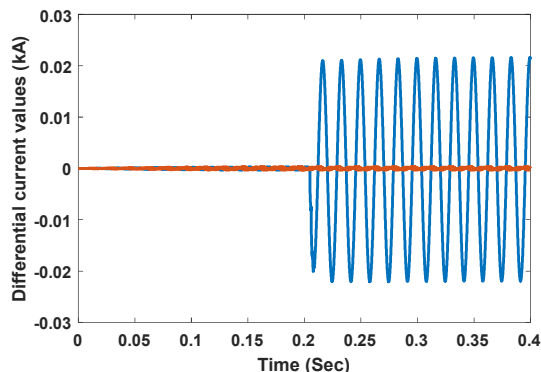


شکل (۵): بزرگنمایی در نزدیکی لحظه‌ی شروع جریان هجومی

با مقایسه شکل‌های (۳) و (۵) دیده می‌شود که سیگنال جریان هجومی در لحظه‌ی برقرار شدن ترانسفورماتور، مؤلفه‌های گذرای بسیار کمتری در مقایسه با سیگنال خطای داخلی دارد. در این مقاله، از همین واقعیت برای شناسایی خطای داخلی از شرایط جریان هجومی استفاده می‌شود.

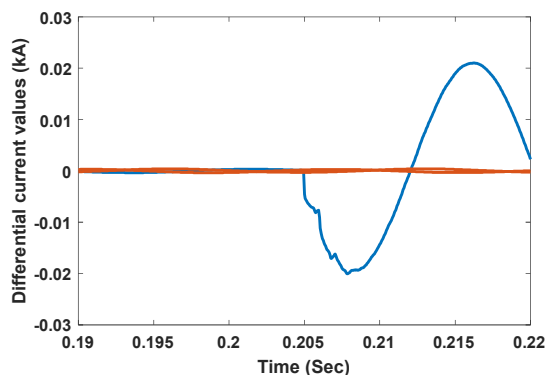
۲-۳- اعمال تبدیل موجک بر جریان‌های دیفرانسیل

برای استخراج مؤلفه‌های گذرای فرکانس بالا، در این مقاله، از تبدیل موجک استفاده شده است. به این منظور، پس از مشاهده اضافه جریان در سیگنال جریان دیفرانسیل، یک چهارم سیکل (۵ میلی ثانیه) از این سیگنال ثبت می‌شود. سپس تبدیل موجک مطابق رابطه (۱) به سیگنال‌های جریان دیفرانسیل در هر سه فاز اعمال می‌شود. شکل (۶) خروجی تبدیل موجک را برای سیگنال‌های سه فاز مربوط به خطای داخلی و شکل (۷) خروجی این تبدیل، برای سیگنال‌های سه فاز مربوط به جریان هجومی را نشان می‌دهد.



شکل (۶): جریان‌های دیفرانسیل سه فاز ناشی از خطای Ag

همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود، به دلیل وجود خطای داخلی در فاز A، دامنه‌ی جریان دیفرانسیل در این فاز افزایش یافته است. شکل (۳) بزرگنمایی شکل (۲) در اطراف لحظه‌ی خطا را نشان می‌دهد.



شکل (۷): بزرگنمایی سیگنال جریان دیفرانسیل در اطراف لحظه‌ی خطا

همانطور که در شکل دیده می‌شود، در اثر وقوع خطا، مؤلفه‌های گذرا به صورت پرش‌هایی روی موج جریان دیفرانسیل فاز A وجود دارند. چنین امواج گذرای روی فازهایی که تحت خطا نیستند وجود ندارند. حال باید دید که آیا این امواج گذرا، در سیگنال‌های مربوط به جریان هجومی هم وجود دارند یا خیر. به این منظور، نمونه‌ای از جریان هجومی هم شبیه‌سازی شده و در شکل (۴) نشان داده شده است.

جریان هجومی سه مقدار انحراف معیار برای سه فاز وجود خواهد داشت. لازم به ذکر است که در این مقاله، بیشترین مقدار انحراف معیار از بین سه مقدار به دست آمده، برای تصمیم‌گیری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بخش، با تغییر پارامترهای شبکه و ترانسفورماتور، تعداد زیادی جریان هجومی شبیه‌سازی شده است و پس از طی شدن مراحل توضیح داده شده، مقادیر انحراف معیار برای سه فاز به دست آمده است. از سوی دیگر، با تغییر نوع خطا، امپدانس خطا و زاویه‌ی وقوع خطا، تعداد زیادی جریان خطای داخلی نیز شبیه‌سازی شده و انحراف معیار برای فازهای مختلف به دست آمده است. جدول (۱) مقادیر مختلفی از انحراف معیار که برای هر یک از شرایط خطای داخلی و جریان هجومی به دست آمده است را نشان می‌دهد.

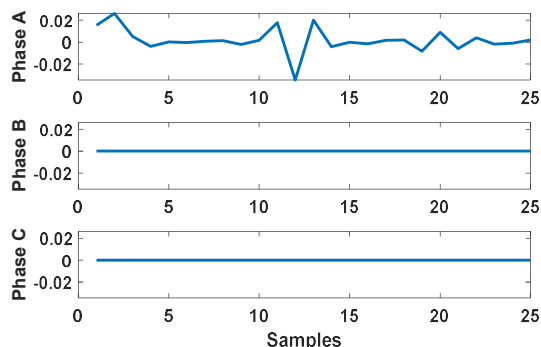
جدول (۱): محدوده مقادیر انحراف معیار برای وقایع مختلف

اتفاق	حداقل مقدار انحراف معیار	حداکثر مقدار انحراف معیار
جریان هجومی	$1/1 \times 10^{-5}$	$2/54 \times 10^{-4}$
خطای تکفاز به زمین	$7/96 \times 10^{-4}$	$0/0236$
خطای دو فاز	$4/45 \times 10^{-4}$	$0/007$
خطای دو فاز به زمین	$9/77 \times 10^{-4}$	$0/012$
خطای سه فاز	$0/001$	$0/0147$

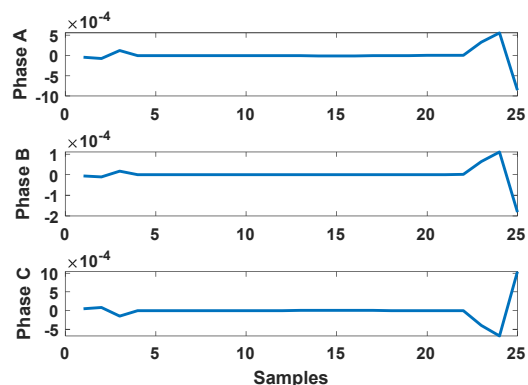
در توضیح جدول (۱) می‌توان گفت که به عنوان مثال، برای هر مورد از جریان هجومی، سه مقدار انحراف معیار برای هر یک از سه فاز به دست می‌آید. بیشترین مقدار انحراف معیار از میان سه فاز، به عنوان انحراف معیار آن مورد از جریان هجومی در نظر گرفته می‌شود. همین کار برای انواع سیگنال‌های خطای داخلی نیز انجام شده است. حال از میان تمام مقادیر انحراف معیار به دست آمده برای حالات مختلف، کمترین و بیشترین مقدار برای جریان هجومی و هر یک از انواع خطا در جدول (۱) آمده است.

۳-۴- طراحی الگوریتم

از تحلیل مقادیر مختلف به دست آمده برای انواع مختلف خطا و نیز سیگنال‌های جریان هجومی، می‌توان دید که مقدار انحراف معیار خروجی تبدیل موجک برای سیگنال‌های جریان خطا و سیگنال‌های جریان هجومی در بازه‌های کاملاً متفاوتی قرار می‌گیرند. بنابراین، از همین خاصیت می‌توان برای تشخیص خطای داخلی از شرایط جریان هجومی استفاده کرد. با بررسی مقادیر موجود در جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار 4×10^{-4} معیار آستانه‌ی مناسبی برای جداسازی خطاهای داخلی از شرایط جریان هجومی است. در صورتی که مقدار انحراف معیار به دست آمده بیشتر از مقدار آستانه‌ی 4×10^{-4} باشد، نتیجه می‌شود که سیگنال‌های سه فاز ورودی ناشی از خطای داخلی



شکل (۶): خروجی تبدیل موجک برای خطای Ag



شکل (۷): خروجی تبدیل موجک برای جریان هجومی

از شکل (۶) دیده می‌شود که فاز تحت خطا حاوی مقادیر قابل توجهی از مؤلفه‌های فرکانس بالا است که به صورت نوساناتی در خروجی تبدیل موجک خود را نشان می‌دهند. از مقایسه شکل‌های (۶) و (۷) هم دیده می‌شود که نوسانات در خروجی تبدیل موجک برای فاز تحت خطا بسیار بیشتر از نوسانات خروجی تبدیل موجک برای سیگنال‌های ناشی از جریان هجومی است.

۳-۳- کمی‌سازی نوسانات خروجی تبدیل موجک

برای اینکه رله بتواند خروجی‌های تبدیل موجک با نوسانات زیاد را از خروجی‌های با نوسانات کمتر تمایز دهد، لازم است که این نوسانات به نوعی کمی‌سازی شوند. به منظور کمی‌سازی نوسانات موجود در خروجی تبدیل موجک در این مقاله، مطابق رابطه‌ی (۲)، انحراف معیار^۴ خروجی تبدیل موجک برای هر سه فاز محاسبه می‌شود.

$$S.D = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، S.D انحراف معیار مقادیر مربوط به خروجی تبدیل موجک، x_i هر نمونه از خروجی تبدیل موجک، μ میانگین مقادیر این خروجی و N تعداد نمونه هاست.

در الگوریتم پیشنهادی، پس از اینکه تبدیل موجک بر سیگنال‌های جریان دیفرانسیل اعمال شد و مقدار انحراف معیار برای خروجی‌های تبدیل موجک به دست آمد، برای هر خطای داخلی و یا هر حالت

مورد استفاده از تبدیل موجک در این مقاله ضرایب سطح ۱ تبدیل موجک یعنی همان d_1 است.

هستند و اگر کوچکتر از مقدار آستانه باشد، سیگنال‌های سه فاز ورودی ناشی از شرایط جریان هجومی است. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی در شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول (۲): نتایج الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی خطای داخلی

نوع خطا	مقاومت خطا	زاویه وقوع خطا	مقدار انحراف معیار برای فاز A	مقدار انحراف معیار برای فاز B	مقدار انحراف معیار برای فاز C
Bg	۰.۵	۳۰ درجه	$7/17 \times 10^{-6}$	۰/۰۱۱۱	$9/12 \times 10^{-6}$
Cg	۵.۵	۴۵ درجه	$1/57 \times 10^{-5}$	$2/18 \times 10^{-5}$	۰/۰۲۱۷
AB	۱۰.۵	۶۰ درجه	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	$3/85 \times 10^{-7}$
ACg	۵.۵	۹۰ درجه	۰/۰۰۱۲	$1/۰۸ \times 10^{-6}$	$9/۰۶ \times 10^{-4}$
BCg	۰.۵	۱۲۰ درجه	$1/53 \times 10^{-6}$	$8/41 \times 10^{-4}$	۰/۰۰۱۱
ABCg	۱۰.۵	۱۵۰ درجه	۰/۰۰۱	$5/26 \times 10^{-4}$	۰/۰۰۱۵

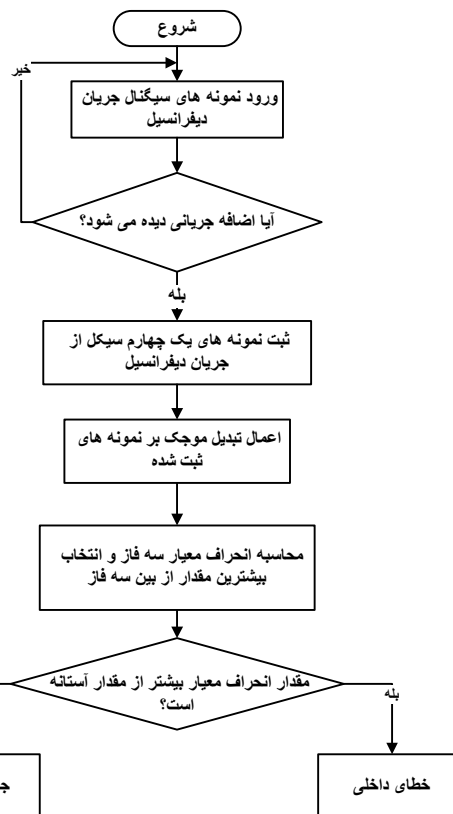
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به خوبی توانسته است که سیگنال‌های خطای داخلی را شناسایی کند. به عنوان مثال، ستون دوم، مربوط به خطای Bg با امپدانس خطای صفر و زاویه وقوع ۳۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. برای این مورد، انحراف معیار خروجی تبدیل موجک برای فاز A برابر با $7/17 \times 10^{-6}$ ، برای فاز B برابر با $9/12 \times 10^{-6}$ و برای فاز C برابر با $3/85 \times 10^{-7}$ می‌باشد. بزرگترین مقدار انحراف معیار برابر با $9/12 \times 10^{-6}$ است. با مقایسه این مقدار با مقدار آستانه 4×10^{-4} و اینکه مقدار انحراف معیار بیشتر از مقدار آستانه تعیین شده است، وجود خطای داخلی نتیجه می‌شود.

۴-۲- شناسایی جریان هجومی

الگوریتم پیشنهادی باید این قابلیت را داشته باشد که سیگنال‌های جریان دیفرانسیل سه فاز مربوط به جریان هجومی را نیز به درستی تشخیص دهد. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شناسایی جریان‌های هجومی، با تغییر مشخصات مربوط به جریان‌های هجومی، تعداد زیادی از این سیگنال‌ها تولید شده و برای تست الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد بسیار مطلوب الگوریتم پیشنهادی در شناسایی جریان‌های هجومی را نشان می‌دهد. جدول (۳) برخی از این نتایج را نشان می‌دهد.

جدول (۳): نتایج الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی جریان هجومی

امپدانس منبع	زاویه کلیدزنی	مقدار انحراف معیار برای فاز A	مقدار انحراف معیار برای فاز B	مقدار انحراف معیار برای فاز C
۸/۵۵	۲۰ درجه	$5/19 \times 10^{-5}$	$1/۰۶ \times 10^{-4}$	$5/82 \times 10^{-5}$
۸/۵۵	۴۵ درجه	$8/64 \times 10^{-5}$	$6/8 \times 10^{-5}$	$1/83 \times 10^{-5}$
۸/۵۵	۹۰ درجه	$7/63 \times 10^{-5}$	$1/39 \times 10^{-5}$	$9/۰2 \times 10^{-5}$



شکل (۸): فلوجارت الگوریتم پیشنهادی

۴- شبیه‌سازی و نتایج

برای تحلیل درستی الگوریتم پیشنهادی، شبکه‌ی نشان داده شده در شکل (۱) در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. ترانسفورماتور نشان داده شده در شکل (۱)، ۵۰۰ مگاوات آمپر، $400kV/230kV$ ، با اتصال Y/Δ بوده که چگالی شار نقطه زانوی آن ۱ تسلا است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، سیگنال‌های تست در این شبکه تولید شده و به عنوان ورودی الگوریتم استفاده می‌شوند.

۴-۱- شناسایی خطاهای داخلی

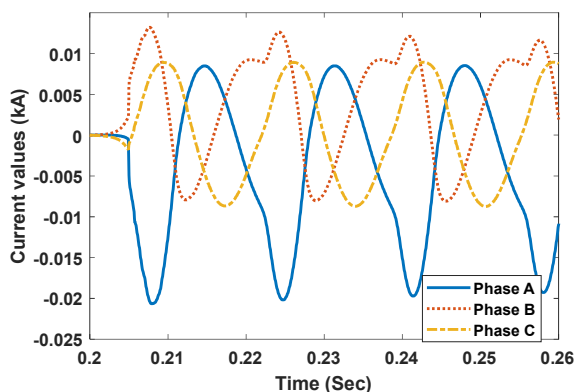
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، انواع مختلفی از خطای داخلی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده و به عنوان سیگنال تست برای الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۲) نتایج الگوریتم پیشنهادی را برای تعدادی از سیگنال‌های ناشی از خطای داخلی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای استخراج مؤلفه‌های فرکانس بالای موجود روی سیگنال‌ها از تبدیل موجک با موجک مادر دابلیچز ۴ استفاده شده است. ضمناً خروجی

مقدار انحراف معیار مربوط به فاز A بیشترین مقدار را دارد (۰/۰۰۶۸) که بیشتر از مقدار آستانه‌ی تعیین شده برای شناسایی خطای داخلی است. بنابراین، در این شرایط، خطای داخلی به درستی تشخیص داده می‌شود.

۴-۴- شناسایی خطای داخلی با وجود اشباع CTها

الگوریتم‌های قدیمی، برای شناسایی خطای داخلی ترانسفورماتور از جریان هجومی مغناطیس شونددگی، از مؤلفه‌ی هارمونیک دوم استفاده می‌کردند. این الگوریتم‌ها و هر الگوریتم دیگری که از محتوای هارمونیک سیگنال برای شناسایی خطای داخلی از جریان هجومی استفاده می‌کند، از به اشباع رفتن CTهای دو سمت ترانسفورماتور تأثیر می‌پذیرد. از آنجا که جریان هجومی شامل مقادیر قابل توجهی هارمونیک دوم است، از وجود این هارمونیک‌ها در سیگنال سه فاز برای شناسایی جریان هجومی از خطای داخلی استفاده می‌شد. اما در برخی خطاهای داخلی هم به دلیل اشباع CTها ممکن است مقدار هارمونیک دوم بالا برود و جریان مربوط به خطای داخلی به اشتباه به عنوان جریان هجومی شناسایی شود.

الگوریتم پیشنهادی از مؤلفه‌های فرکانس بالای موجود در جریان دیفرانسیل استفاده می‌کند. بنابراین، اشباع CT تأثیری را در عملکرد این الگوریتم‌ها ندارد. برای بررسی این موضوع، انواع مختلف خطای داخلی در شرایط اشباع CTها تولید شده و برای تست الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. شکل موج سه فاز جریان دیفرانسیل برای یک خطای سه فاز، در شرایطی که CTها به اشباع رفته است، در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): خطای سه فاز در شرایط اشباع CTها

جدول (۵) نتایج الگوریتم پیشنهادی برای بعضی از سیگنال‌های تست استفاده شده را نشان می‌دهد. این سیگنال‌ها همگی مربوط به خطاهایی هستند که در شرایط اشباع CTها به وقوع پیوسته‌اند.

۸/۵۵۲	۱۳۵درجه	$1/11 \times 10^{-5}$	$9/47 \times 10^{-5}$	$8/36 \times 10^{-5}$
۱۷۵	۰درجه	$5/36 \times 10^{-5}$	$1/05 \times 10^{-4}$	$5/71 \times 10^{-5}$
۱۷۵	۴۵درجه	$8/54 \times 10^{-5}$	$6/65 \times 10^{-5}$	$1/95 \times 10^{-5}$
۱۷۵	۹۰درجه	$7/47 \times 10^{-5}$	$1/45 \times 10^{-5}$	$8/19 \times 10^{-5}$
۱۷۵	۱۳۵درجه	$1/12 \times 10^{-5}$	$9/81 \times 10^{-5}$	$8/69 \times 10^{-5}$

به طور کلی می‌توان دید که مقادیر انحراف معیار برای جریان‌های هجومی به طور قابل توجهی کمتر از مقادیر مشابه برای فازهای تحت خطا هستند. به این ترتیب، شرایط جریان هجومی کاملاً از شرایط خطای داخلی قابل تشخیص است. به عنوان نمونه، نتایج سطر چهارم از جدول (۳) در نظر گرفته می‌شود. در این سطر، یک جریان هجومی با امپدانس منبع ۸/۵ اهم و زاویه کلیدزنی ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. برای این سیگنال، مقادیر انحراف معیار برای فازهای A، B و C به ترتیب برابر با $7/63 \times 10^{-5}$ ، $1/39 \times 10^{-5}$ و $9/02 \times 10^{-5}$ به دست آمده است. بیشترین مقدار از میان سه مقدار $9/02 \times 10^{-5}$ است که کمتر از مقدار آستانه (4×10^{-4}) می‌باشد. بنابراین، نتیجه می‌شود که سیگنال تست مربوط به جریان هجومی مغناطیس شونددگی بوده است.

۳-۴- شناسایی خطاهای امپدانس بالا

در این بخش، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شناسایی خطاهای داخلی امپدانس بالا، مطالعه شده است. به این منظور، انواع مختلفی از خطاهای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده و به عنوان سیگنال تست استفاده شده است. جدول (۴) نتیجه الگوریتم پیشنهادی در قبال برخی از تست‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

جدول (۴): عملکرد الگوریتم پیشنهادی در قبال خطاهای امپدانس بالا

نوع خطا	مقاومت خطا	زاویه وقوع خطا	مقدار انحراف معیار برای فاز A	مقدار انحراف معیار برای فاز B	مقدار انحراف معیار برای فاز C
Ag	۱۰۰Ω	۳۰ درجه	$7/96 \times 10^{-4}$	$1/42 \times 10^{-5}$	$1/26 \times 10^{-6}$
Cg	۲۰۰Ω	۱۲۰ درجه	$1/98 \times 10^{-5}$	$9/29 \times 10^{-6}$	۰/۰۱۲۹
BC	۵۰Ω	۰درجه	$8/75 \times 10^{-7}$	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۴
ACg	۱۰۰Ω	۴۵درجه	۰/۰۰۵۹	$1/33 \times 10^{-5}$	۰/۰۰۸۵
BCg	۱۰۰Ω	۹۰درجه	$1/62 \times 10^{-5}$	۰/۰۱۱۴	۰/۰۰۶۷
ABCg	۲۰۰Ω	۱۲۰درجه	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۴۹

نتایج موجود در جدول (۴) نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی عملکرد بسیار قابل قبولی را در شناسایی خطاهای امپدانس بالا دارد. به عنوان مثال، می‌توان خطای سه فاز در آخرین سطر جدول (۴) را بررسی کرد. برای این خطا، مقادیر انحراف معیار برای فازهای A، B و C به ترتیب برابر است با $0/0068$ ، $0/0018$ و $0/0049$ از این بین،

۴-۶- فرکانس نمونه برداری الگوریتم پیشنهادی

استفاده از فرکانس نمونه برداری بالا موجب می شود که خروجی تبدیل موجک وضوح مناسبتری داشته باشد. اما از طرفی، با زیادتر شدن فرکانس نمونه برداری، بار محاسباتی الگوریتم نیز بالا می رود. فرکانس نمونه برداری مورد استفاده در این مقاله ۲۰ kHz بوده است. با استفاده از این مقدار برای فرکانس نمونه برداری، هر دو پارامتر وضوح خروجی تبدیل موجک و بار محاسباتی الگوریتم، مقادیر قابل قبولی را خواهد داشت. در واقع می توان گفت که با توجه به تئوری نایکوئیست، با بالاتر رفتن فرکانس نمونه برداری، بازه ی فرکانسی بیشتری از مؤلفه های فرکانس بالا در دسترس خواهد بود. این موضوع باعث بالاتر رفتن دقت الگوریتم پیشنهادی می شود. از طرفی، وجود نمونه های بیشتر از سیگنال ورودی باعث بیشتر شدن بار محاسبات در هر دو قسمت گرفتن تبدیل موجک و محاسبه انحراف معیار خروجی تبدیل موجک خواهد شد. بنابراین سرعت تصمیم گیری الگوریتم پایین خواهد آمد و ساختار سیستم حفاظتی نیز پیچیده تر خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، با بهره گیری از سیگنال گذرای فرکانس بالای تولید شده توسط خطا، یک الگوریتم بسیار کارآمد با بار محاسباتی بسیار کم پیشنهاد شده است. برای پیشنهاد الگوریتمی برای پیاده سازی بر روی رله ی حفاظتی، حجم پایین محاسباتی، سرعت بالا و دقت بالای الگوریتم، نکات بسیار مهمی هستند که باید در نظر گرفته شوند. در الگوریتم پیشنهادی، ثبت نمونه های فقط یک چهارم سیکل از سیگنال های جریان دیفرانسیل کافی است. سپس، تبدیل موجک به نمونه های ثبت شده اعمال می شود و انحراف معیار خروجی تبدیل موجک برای هر یک از سه فاز محاسبه می گردد. از روی مقادیر انحراف معیار به دست آمده، خطای داخلی از شرایط جریان هجومی تشخیص داده می شود. همانطور که نتایج شبیه سازی هم نشان داد، الگوریتم پیشنهادی دقت بسیار بالایی دارد و خطاهای داخلی را در شرایط مختلف به درستی شناسایی می کند. نتایج شبیه سازی نشان داده است که الگوریتم پیشنهادی خطاهای داخلی را در صورت به اشباع رفتن CT های دو سمت ترانسفورماتور نیز شناسایی می کند. از سوی دیگر، الگوریتم پیشنهادی بار محاسباتی بسیار پایینی دارد. بنابراین، علاوه بر اینکه به راحتی بر روی رله های شبکه قابل پیاده سازی است، سرعت شناسایی خطای داخلی توسط این الگوریتم هم بسیار بالاست. نیاز به داشتن نمونه های یک چهارم سیکل از سیگنال جریان دیفرانسیل تضمین کننده ی سرعت بالای الگوریتم پیشنهادی است. نتایج شبیه سازی نشان داده است که زمان لازم برای نتیجه گیری الگوریتم پیشنهادی حدود ۱۱ms بوده است. لازم به ذکر است که فرکانس

نمونه برداری لازم برای رله هنگام استفاده از الگوریتم پیشنهادی ۲۰ kHz است.

مراجع

- Esponda, H., Vazquez, E., Andrade, M. A., Johnson, B. K. (2019). A setting-free differential protection for power transformers based on second central moment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 750-759.
- Dashti, H., Sanaye-Pasand, M. (2014). Power transformer protection using a multi-region adaptive differential relay. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 777-785.
- Ashrafian, A., Mirsalim, M., Masoum, M. A. S. (2017). Application of a recursive phasor estimation method for adaptive fault component based differential protection of power transformers. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 3, pp. 1381-1392.
- Tajdinian, M., Samet, H. (2021). Application of probabilistic distance measures for inrush and internal fault currents discrimination in power transformer differential protection. *Electric Power Systems Research*, vol. 193, 107012.
- Samet, H., Shadaei, M., Tajdinian, M. (2022). Statistical discrimination index founded on rate of change of phase angle for immunization of transformer differential protection against inrush current. *International journal of electrical power and energy systems*, vol. 134, 107381.
- Bera, P. K., Isik, C., Kumar, V. (2021). Discrimination of internal faults and other transients in an inter-connected system with power transformers and phase angle regulators. *IEEE systems journal*, vol. 15, no. 3, pp. 3450-3461.
- Shah, A. M., Bhalja, B. R., Agarwal, P., Makwana, Y. M., Malik, O. P. (2020). Quartile based differential protection of power transformers. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 35, no. 5, pp. 2447-2458.
- Tripathy, M., Maheshwari, R. P., Verma, H. K. (2005). Advances in transform protection: A review. *Electric Power Components and Systems*, vol. 33, no. 11, pp. 1203-1209.
- Phadke, A. G., Thorp, J. S. (1983). A new computer-based flux-restrained current differential relay for power transformer protection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 11, pp. 3624-3629.
- Zheng, T., Huang, T., Ma, Y., Zhang, Y. Z., Liu, L. (2018). Histogram-based method to avoid mal-operation of transformer differential protection due to current-transformer saturation under external faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 610-619.
- Murugan, S. K., Simon, S. P., Sundareswaran, K., Nayak, P. S. R., Padhy, N. P. (2017). An empirical Fourier transform-based power transformer differential protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 209-218.
- Afrasiabi, S., Afrasiabi, M., Parang, B., Mohammadi, M. (2020). Integration of accelerated deep neural network into power transformer differential protection. *IEEE transactions on industrial Informative*, vol. 162, pp. 865-876.
- Thote, P. B., Daigavane, M. B., Daigavane, P. M., Gawande, S. P. (2017). An intelligent hybrid approach using KNN-GA to enhance the performance of digital protection transformer scheme. *Canadian journal of electrical and computer engineering*, vol. 403, pp. 151-161.
- Medeiros, R. P., Costa, F. B. (2018). A wavelet-based transformer differential protection with differential current transformer saturation and cross-country fault detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 789-799.

- Medeiros, R. P., Costa, F. B. (2018). A wavelet-based transformer differential protection: internal fault detection during inrush conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 2965-2977.
- Naseri, F., Kazemi, Z., Arefi, M. M., Farjah, E. (2018). Fast discrimination of transformer magnetizing current from internal faults: An extended Kalman Filter-Based Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 1, pp. 110-118.
- Simoes, L. D., Costa, H. J. D., Aires, M. O., Medeiros, R. P., Costa, F. B., Bretas, A. S. (2021). A power transformer differential protection based on support vector machine and wavelet transform. *Electric power systems Research*, vol. 197, 107297.
- Gao, Y., Li, Y., Zhu, Y., Wu, G., Gu, D. (2022). Power quality disturbance classification under noisy conditions using adaptive wavelet threshold and DBN-ELM hybrid model. *Electric power systems research*, vol. 204, 107672.
- Medeiros, R. P., Costa, F. B., Silva, K. M. (2022). A clarke-wavelet-based time-domain power transformer differential protection. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 37, no. 1, pp. 317-328.

زیر نویس‌ها

1. Current transformer
2. Wavelet transform
3. Mother wavelet
4. Standard deviation