

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

Saeid Hasheminejad<sup>1</sup>

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

## حفظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت بر اساس مؤلفه‌های گذرای فرکانس بالای تولید شده توسط خط

نوع مطالعه: پژوهشی

سعید هاشمی نژاد<sup>۱</sup>، استادیار

۱- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفت، 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 مشاهده 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 خط، 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. باز 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 حداقل حدود ۱۱ms بعد از وقوع خط، 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 خط‌های امپدانس بالا و نیز خط‌هایی که همزمان با حضور جریان هجومی اتفاق می‌افتد 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 پیشرفت، 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 بینند و همچنین باعث می‌شود که قابلیت اطمینان تعذیبی 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، Dashti, H., (2014) خطاها خارجی و پدیده‌ی فوق اشباع اشاره کرد (Sanaye-Pasand, M., 2014, Ashrafian, 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 وارد 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 برقدار 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

### (د) نواوری 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<sup>۳</sup> وجود دارد که برای هر کاربرد باید به درستی انتخاب شود. تبدیل موجک پیوسته‌ی مربوط بهتابع  $(t)x$ ، به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود.

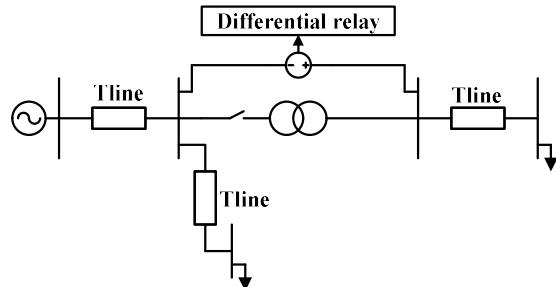
$$WT_x^y(\tau, S) = \frac{1}{\sqrt{S}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) y^*(\frac{\tau-t}{S}) dt \quad (1)$$

که در آن  $\tau$  و  $S$  به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس بوده و  $y$  همان موجک مادر انتخاب شده است. در این رابطه، منظور از  $y^*$ ، مزدوج مختصاطتابع مربوط به موجک مادر  $y$  می‌باشد.

در این مقاله، برای استخراج مشخصات فرکانس بالای جریان دیفرانسیل مربوط به ترانسفورماتور حفاظت شده، از تبدیل موجک استفاده شده است. نحوی 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 ۴۰۰.kV/۲۳۰.kV بوده که در شرایط بی‌باری 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 رله دیفرانسیل می‌شوند.

### ۱-۳- 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 بدیگر برابر هستند و جریان دیفرانسیل تقریباً صفر است. اما در صورت بروز خطاهای 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

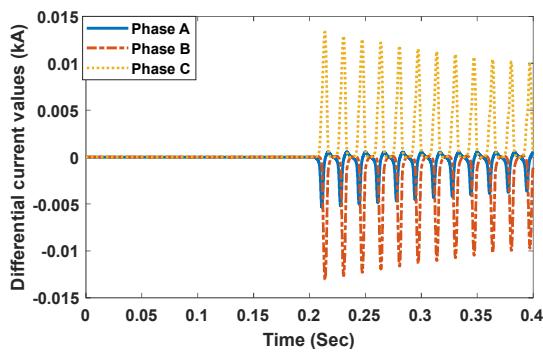
ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی، پس از مشاهده‌ی افزایش در نمونه‌های جریان دیفرانسیل، یک چهارم سیکل از این جریان ثبت می‌شود. سپس تبدیل موجک به نمونه‌های ثبت شده اعمال شده و سپس مؤلفه‌های فرکانس بالای موجود در آن استخراج می‌شود. جزئیات خروجی تبدیل موجک به صورت شکل موجی است که وجود تغییرات لحظه‌ای در مقدار این موج نشان دهنده ای 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 با 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 گذراي بزرگ‌دامنه‌تری را نسبت به جریان هجومی تولید می‌کند. نحوی استفاده از خروجی تبدیل موجک و نیز روش شناسایی خطای داخلی کاملاً جدید و مختص این مقاله است. الگوریتم پیشنهادی برخلاف 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.

#### ۵) ساختار مقاله

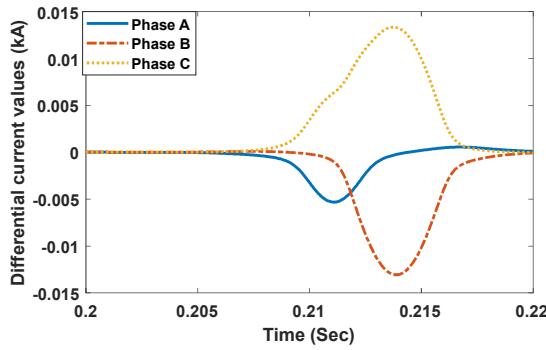
در بخش ۲ مقاله، تبدیل موجک و رابطه‌ی ریاضی مربوطه معرفی خواهد شد. در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی تشریح می‌شود. بخش ۴ مربوط به شبیه‌سازی و نتایج بوده و نتیجه‌گیری کلی مقاله در بخش ۵ ارائه شده است.

## 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 شبکه قدرت (Gao, et. Al.) و حفاظت سیستم‌های قدرت (Medeiros, et. Al.) استفاده شده 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، برقدار شده است. برای تحلیل سیگنال‌های گذای موجود در جریان هجومی، بزرگنمایی این جریان‌ها در اطراف لحظه‌ی برقدار شدن ترانسفورماتور، در شکل (۵) نشان داده شده است.

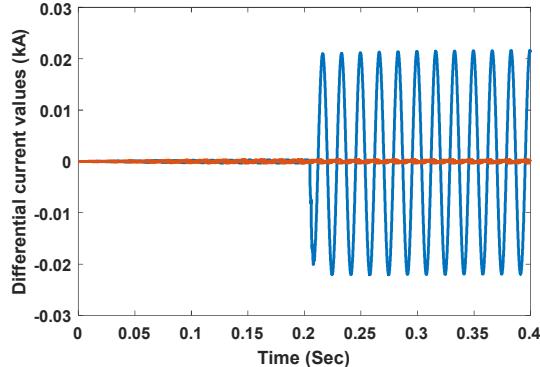


شکل (۵): بزرگنمایی در نزدیکی لحظه‌ی شروع جریان هجومی با مقایسه شکل‌های (۳) و (۴) دیده می‌شود که سیگنال جریان هجومی در لحظه‌ی برقدار شدن ترانسفورماتور، مؤلفه‌های گذای بسیار کمتری در مقایسه با سیگنال خطای داخلی دارد. در این مقاله، از همین واقعیت برای شناسایی خطای داخلی از شرایط جریان هجومی استفاده می‌شود.

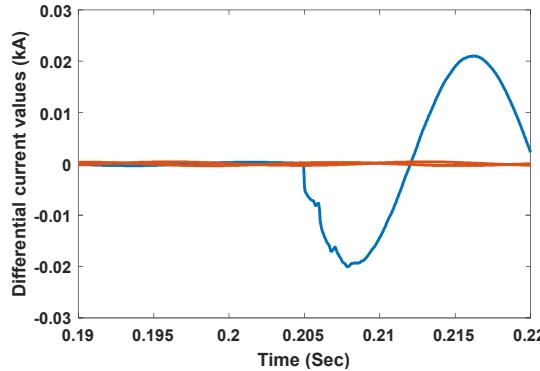
### ۳-۲-۱-۲-۲ اعمال تبدیل موجک بر جریان‌های دیفرانسیل

برای استخراج مؤلفه‌های گذای 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.

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



شکل (۲): 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 خطای نشان می‌دهد.



شکل (۳): بزرگنمایی سیگنال جریان دیفرانسیل در اطراف لحظه‌ی خطای

همانطور که در شکل دیده می‌شود، در اثر وقوع خطای، مؤلفه‌های گذرا به صورت پرش‌هایی روی موج جریان دیفرانسیل فاز A وجود دارند. چنین امواج گذایی روی فازهایی که تحت خطای 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.

جريان 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 جريان 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 خطاب، امپدانس خطاب و زایده‌ی وقوع خطاب، تعداد زیادی جريان خطاب 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 خطاب داخلی و جريان هجومی به دست آمده است را نشان می‌دهد.

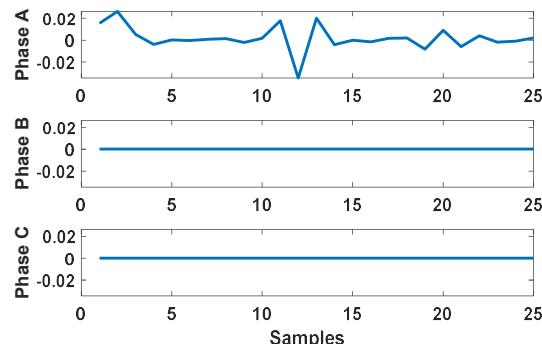
جدول (۱): محدوده مقادیر انحراف معیار برای وقایع مختلف

معیار	حداکثر مقدار انحراف معیار	حداقل مقدار انحراف معیار	انفاق
$2.54 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-5}$		جريان هجومی
$.0.236$	$7.96 \times 10^{-4}$		خطاب تکفاز به زمین
$.0.007$	$4.45 \times 10^{-4}$		خطاب دو فاز
$.0.12$	$9.77 \times 10^{-4}$		خطاب دو فاز به زمین
$.0.147$	$0.001$		خطاب سه فاز

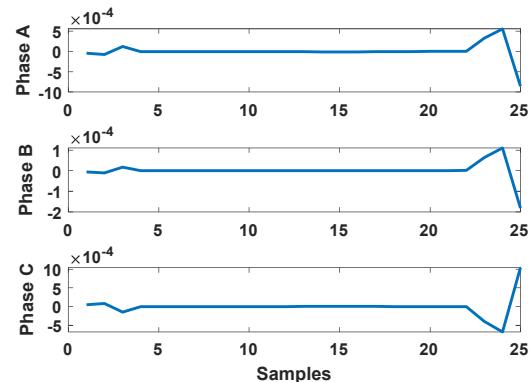
در توضیح جدول (۱) می‌توان گفت که به عنوان مثال، برای هر مورد از جريان هجومی، سه مقدار انحراف معیار برای هر یک از سه فاز به دست می‌آید. بیشترین مقدار انحراف معیار از میان سه فاز، به عنوان انحراف معیار آن مورد از جريان هجومی در نظر گرفته می‌شود. همین کار برای انواع سیگنال‌های خطاب داخلی نیز انجام شده است.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

### ۳-۴- طراحی الگوریتم

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



شکل (۶): خروجی تبدیل موجک برای خطاب



شکل (۷): خروجی تبدیل موجک برای جريان هجومی

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

### ۳-۵- 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 رابطه (۲)، انحراف معیار<sup>۴</sup> خروجی تبدیل موجک برای هر سه فاز محاسبه می‌شود.

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

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

در الگوریتم پیشنهادی، پس از اینکه تبدیل موجک بر سیگنال‌های جريان دیفرانسیل اعمال شد و مقدار انحراف معیار برای خروجی‌های تبدیل موجک به دست آمد، برای هر خطاب 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. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل (۸) نشان داده شده است.

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

C	معیار برای فاز A	معیار برای فاز B	معیار برای	مقدار انحراف	مقدار انحراف	مقدار انحراف	نوع خطای خطا	وقوع خطای خطا	زاویه زاویه	مقاومت	معیار برای فاز	معیار برای فاز	معیار برای فاز
$9/12 \times 10^{-6}$	$0/0111$	$7/17 \times 10^{-6}$		$0.0111$	$7/17 \times 10^{-6}$	$0.0111$	Bg	$30^\circ$	$30^\circ$	$0\Omega$			
$0/0217$	$2/18 \times 10^{-5}$	$1/57 \times 10^{-5}$		$0.0217$	$2/18 \times 10^{-5}$	$0.0217$	Cg	$45^\circ$	$45^\circ$	$5\Omega$			
$3/85 \times 10^{-7}$	$0/001$	$0/001$		$0.001$	$0/001$	$0.001$	AB	$0^\circ$	$0^\circ$	$10\Omega$			
$9/06 \times 10^{-4}$	$1/08 \times 10^{-6}$	$0/0012$		$0.06$	$1/08 \times 10^{-6}$	$0.0012$	ACg	$90^\circ$	$90^\circ$	$5\Omega$			
$0/0011$	$8/41 \times 10^{-4}$	$1/53 \times 10^{-6}$		$0.0011$	$8/41 \times 10^{-4}$	$0.0011$	BCg	$120^\circ$	$120^\circ$	$0\Omega$			
$0/0015$	$5/26 \times 10^{-4}$	$0/001$		$0.0015$	$5/26 \times 10^{-4}$	$0.0015$	ABCg	$150^\circ$	$150^\circ$	$10\Omega$			

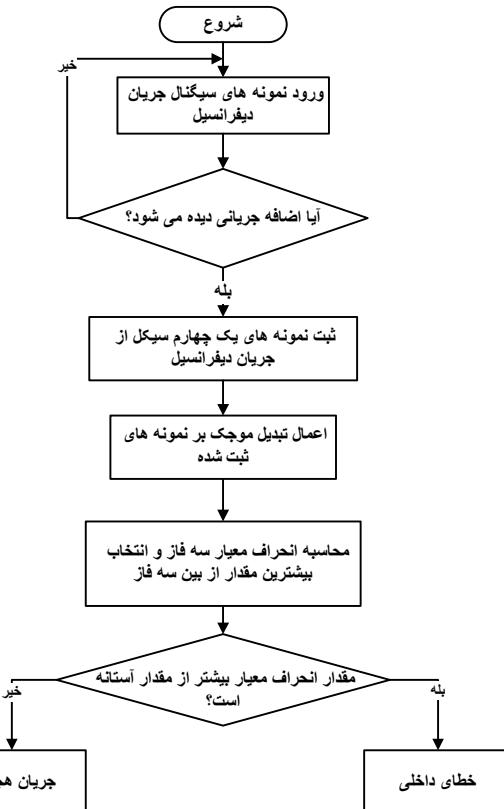
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به خوبی توانسته است که سیگنال‌های خطای داخلی را شناسایی کند. به عنوان مثال، ستون دوم، مربوط به خطای Bg با امپدانس خطای صفر و زاویه وقوع  $30^\circ$  درجه در نظر گرفته می‌شود. برای این مورد، انحراف معیار خروجی تبدیل موجک برای فاز A برابر با  $7/17 \times 10^{-6}$ ، برای فاز B برابر با  $0/0111$  و برای فاز C برابر با  $9/12 \times 10^{-6}$  می‌باشد. بزرگترین انحراف معیار برای فاز C برابر با  $0/0015$  است. با مقایسه این مقدار با مقدار آستانه  $4 \times 10^{-4}$  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

C	معیار برای فاز A	معیار برای فاز B	معیار برای	مقدار انحراف	مقدار انحراف	مقدار انحراف	امپدانس	زاویه	کلیدزنی	منبع
$5/82 \times 10^{-5}$	$1/06 \times 10^{-4}$			$5/19 \times 10^{-5}$	$5/19 \times 10^{-5}$	$5/19 \times 10^{-5}$	$8/5\Omega$	$0^\circ$	درجه	
$1/83 \times 10^{-5}$	$6/8 \times 10^{-5}$			$8/64 \times 10^{-5}$	$8/64 \times 10^{-5}$	$8/64 \times 10^{-5}$	$8/5\Omega$	$45^\circ$	درجه	
$9/02 \times 10^{-5}$	$1/39 \times 10^{-5}$			$7/63 \times 10^{-5}$	$7/63 \times 10^{-5}$	$7/63 \times 10^{-5}$	$8/5\Omega$	$90^\circ$	درجه	



شکل (۸): فلوچارت 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،  $400\text{kV}/230\text{kV}$ ، با اتصال  $\Delta/Y$  بوده که چگالی شار نقطه زانوی آن ۱ تسللا است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، سیگنال‌های تست در این شبکه تولید شده و به عنوان ورودی الگوریتم استفاده می‌شوند.

#### ۱- شناسایی خطاهای داخلی

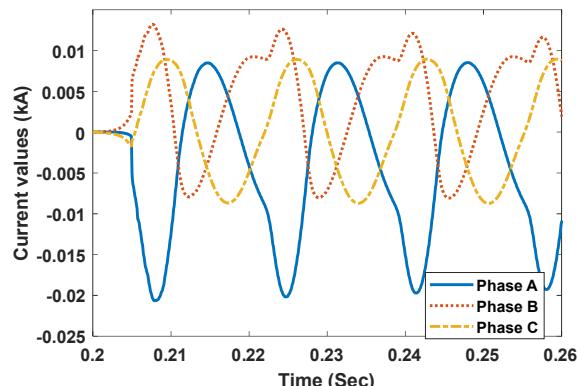
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، انواع مختلفی از خطاهای داخلی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده و به عنوان سیگنال تست برای الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۲) نتایج الگوریتم پیشنهادی را برای تعدادی از سیگنال‌های ناشی از خطاهای داخلی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای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

مقدار انحراف معیار مربوط به فاز A بیشترین مقدار را دارد ( $0/0068$ ) که بیشتر از مقدار آستانه تعیین شده برای شناسایی خطای داخلی است. بنابراین، در این شرایط، خطای داخلی به درستی تشخیص داده شود.

#### ۴-۴- شناسایی خطای داخلی با وجود اشباع CT‌ها

الگوریتم‌های قدیمی، برای شناسایی خطای داخلی ترانسفورماتور از جریان هجومی مغناطیس شوندگی، از مؤلفه‌ی هارمونیک دوم استفاده می‌کردند. این الگوریتم‌ها و هر الگوریتم دیگری که از محتوای هارمونیکی سیگنال برای شناسایی خطای داخلی از جریان هجومی استفاده می‌کند، از به اشباع رفتن CT‌ها دو سمت ترانسفورماتور تأثیر می‌بздیرد. 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 می‌شود. اما در برخی خطاهای داخلی هم به دلیل اشباع CT‌ها ممکن است مقدار هارمونیک دوم بالا برود و جریان مربوط به خطای داخلی به اشتباہ 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 خطاهای 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.

$8/36 \times 10^{-5}$	$9/47 \times 10^{-5}$	$1/11 \times 10^{-5}$	۱۳۵ درجه	$8/5\Omega$
$5/71 \times 10^{-5}$	$1/05 \times 10^{-4}$	$5/36 \times 10^{-5}$	۰ درجه	$17\Omega$
$1/95 \times 10^{-5}$	$6/65 \times 10^{-5}$	$8/54 \times 10^{-5}$	۴۵ درجه	$17\Omega$
$8/19 \times 10^{-5}$	$1/45 \times 10^{-5}$	$7/47 \times 10^{-5}$	۹۰ درجه	$17\Omega$
$8/69 \times 10^{-5}$	$9/81 \times 10^{-5}$	$1/12 \times 10^{-5}$	۱۳۵ درجه	$17\Omega$

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  $8/5\Omega$  و زاویه کلیدزنی  $90^\circ$  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  $9/02 \times 10^{-5}$  است. بیشترین مقدار از میان سه مقدار  $9/02 \times 10^{-5}$  است که کمتر از مقدار آستانه  $(4 \times 10^{-5})$  می‌باشد. بنابراین، نتیجه می‌شود که سیگنال تست مربوط به جریان هجومی مغناطیس شوندگی بوده است.

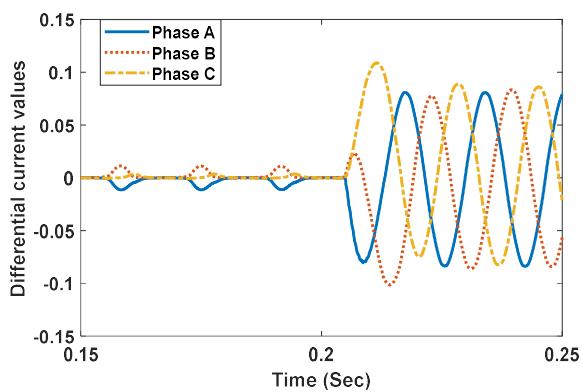
#### ۴-۳- شناسایی خطاهای امپدانس بالا

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

C	B	A	مقادیر انحراف	مقادیر انحراف	مقادیر انحراف	مقادیر انحراف	نوع خطأ
			معيار برای فاز خطأ	معيار برای فاز خطأ	معيار برای فاز خطأ	زاویه وقوع	
$1/26 \times 10^{-6}$	$1/42 \times 10^{-5}$	$7/96 \times 10^{-4}$	۳۰ درجه	$100\Omega$	Ag		
$0/0129$	$9/29 \times 10^{-6}$	$1/98 \times 10^{-5}$	۱۲۰ درجه	$200\Omega$	Cg		
$0/0014$	$0/0014$	$8/75 \times 10^{-7}$	۰ درجه	$50\Omega$	BC		
$0/0085$	$1/33 \times 10^{-5}$	$0/0059$	۴۵ درجه	$100\Omega$	ACg		
$0/0067$	$0/0114$	$1/63 \times 10^{-5}$	۹۰ درجه	$100\Omega$	BCg		
$0/0049$	$0/0018$	$0/0068$	۱۲۰ درجه	$200\Omega$	ABCg		

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 خطأ، مقادیر انحراف معیار برای فازهای A, B و C به ترتیب برابر است با  $0/0068$ ,  $0/0018$  و  $0/0049$ . از این بین،



**شکل (۱۰):** موقع خطا داخلی در حضور جریان هجومی

در شکل (۱۰)، مدت زمان کل شبیه‌سازی  $4/0$  ثانیه بوده است. اندکی پس از لحظه‌ی  $1/0$  ثانیه، ترانسفورماتور بر قدر شده و جریان هجومی در آن تولید می‌شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود، پس از لحظه‌ی  $2/0$  ثانیه، یک خطای داخلی سه فاز در ترانسفورماتور اتفاق می‌افتد. الگوریتم پیشنهادی به خوبی قادر است که موقع خطا داخلی را در این شرایط تشخیص دهد. برای نمونه، جدول (۶) نتایج الگوریتم پیشنهادی برای چند خطای داخلی در شرایط حضور جریان هجومی مغناطیس‌شوندگی را نشان داده است.

#### جدول (۶): شناسایی خطای داخلی در حضور جریان هجومی

نوع خط	زاویه برقرار شدن	مقاومت خط	زاویه وقوع خط	انحراف براي فاز A	مقدار انحراف براي فاز B	مقدار معيار براي فاز C	مقدار معيار براي فاز B	مقدار معيار براي فاز A	مقدار معيار براي فاز C
AB	درجہ ۰	$5\Omega$	درجہ ۹۰	۰/۰۰۲۱	$0/0021 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱
ABC	درجہ ۵۰	$\cdot \Omega$	درجہ ۱۲۰	۰/۰۰۱۸	$7/96 \times 10^{-4}$	$0/0016 \times 10^{-5}$	۰/۰۰۱۶	$7/96 \times 10^{-4}$	۰/۰۰۱۶
BC	درجہ ۹۰	$10\Omega$	درجہ ۴۵	$1/66 \times 10^{-6}$	۰/۰۰۲۳	$0/0023 \times 10^{-5}$	۰/۰۰۲۳	$0/0023 \times 10^{-5}$	۰/۰۰۲۳
ACg	درجہ ۹۰	$5\Omega$	درجہ ۱۳۵	۰/۰۰۲۲	$3/47 \times 10^{-5}$	$0/0022 \times 10^{-4}$	۰/۰۰۲۲	$3/47 \times 10^{-5}$	۰/۰۰۲۲
ABCg	درجہ ۱۳۵	$\cdot \Omega$	درجہ ۹۰	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۱۶	$6/91 \times 10^{-4}$	۰/۰۰۱۶	$6/91 \times 10^{-4}$	۰/۰۰۱۶

جدول (۶) نشان دهنده عملکرد بسیار خوب الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی خطای داخلی حتی در شرایط حضور جریان هجومی در سینگل جریان دیفرانسیل است. به عنوان نمونه، نتایج الگوریتم در شناسایی خطای ABCg در آخرین سطر جدول (۶) توضیح داده شود. برای این خطأ، انحراف معیار خروجی تبدیل موجک برای فازهای A، B و C به ترتیب برابر است با  $0.0023$ ،  $0.00016$  و  $0.0004$ . بیشترین مقدار انحراف استاندارد مربوط به فاز A یعنی  $0.0023$  است. این مقدار از مقدار  $4 \times 10^{-4}$  که به عنوان مقدار آستانه در نظر گرفته شده، بزرگتر است. بنابراین این خطای داخلی به درستی، توسط الگوریتم پیشنهادی شناسایی شده است.

جدول (۵): نتایج الگوریتم برای خطاهای همراه با اشباع CTها

نوع خطأ	مقاومت خطأ	زاوية وقوع خطأ	مقدار انحراف معيار براي فاز	مقدار انحراف معيار براي فاز	مقدار انحراف معيار براي فاز	C	B	A	نوع خطأ
AC	$\cdot\Omega$	٤٠ درجة	$+/-.061$	$+/-.061$	$+/-.061$	$+/-.0061$	$+/-.73 \times 10^{-5}$		
ABg	$10\Omega$	٦٧ درجة	$+/+.116$	$+/+.1$	$+/+.1$	$+/-.88 \times 10^{-5}$			
BCg	$20\Omega$	١١٠ درجة	$+/-.016$	$+/-.25 \times 10^{-4}$	$+/-.0047$				
ABC	$30\Omega$	١٤٠ درجة	$+/-.038$	$+/-.0084$	$+/-.0122$				
ABCg	$40\Omega$	٩٠ درجة	$+/-.122$	$+/-.146$	$+/-.0022$				

جدول (۵) تشن می دهد که الگوریتم پیشنهادی هیچ تأثیری را از به اشباع رفتن CT ها نپذیرفته است. این موضوع برتری قابل توجه الگوریتم پیشنهادی را نسبت به الگوریتم های قدیمی تشن می دهد. به عنوان مثال، می توان خطای AC در سطر دوم جدول (۵) را در نظر گرفت. برای این خطای، مقادیر انحراف معیار برای فاز های A، B و C به ترتیب  $۰/۰۰۶۱$ ،  $۰/۰۰۶۱$  و  $۰/۰۰۷۳$  بوده است. بیشترین مقدار انحراف معیار از بین سه مقدار به دست آمده  $۰/۰۰۶۱$  بوده است که بزرگتر از مقدار آستانه در نظر گرفته شده برای شناسایی خطای داخلی است. بنابراین، وجود خطای داخلی به درستی تشخیص داده شده است.

## ۴-۵- شناسایی خطای داخلی همزمان با حضور جریان هجومی

در رله‌های دیفرانسیل، تابعی برای جلوگیری از عملکرد رله هنگام برقدار کردن ترانسفورماتور و وقوع جریان هجومی باید وجود داشته باشد. در صورتی که افزایش جریان دیفرانسیل، ناشی از جریان هجومی مغناطیس‌شوندگی ترانسفورماتور باشد، این تابع فعال شده و از عملکرد رله جلوگیری می‌کند. در این بخش، فرض بر این است که پس از برقدار شدن ترانسفورماتور، خطایی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به وجود آید. در این صورت، ترانسفورماتور باید شرایط جدید را تشخیص داده و تابع مربوط به جریان هجومی را غیرفعال نماید.

در این بخش، عملکرد الگوریتم پیشنهادی هنگام وقوع خطای داخلی در شرایط حضور جریان هجومی مغناطیس شوندگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۰) شکل موج‌های سه فاز مربوط به وقوع یک خطای داخلی سه فاز در حضور جریان هجومی را نشان می‌دهد.

نمونهبرداری لازم برای رله هنگام استفاده از الگوریتم پیشنهادی  $20\text{kHz}$  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., Shadai, 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.
- Afarsiabi, S., Afarsiabi, 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.

## ۴-۶- فرکانس نمونه برداری الگوریتم پیشنهادی

استفاده از فرکانس نمونهبرداری بالا موجب می‌شود که خروجی تبدیل موجک وضوح مناسبتری داشته باشد. اما از طرفی، با زیادتر شدن فرکانس نمونهبرداری، بار محاسباتی الگوریتم نیز بالا می‌رود. فرکانس نمونهبرداری مورد استفاده در این مقاله  $20\text{kHz}$  بوده است. با استفاده از این مقدار برای فرکانس نمونهبرداری، هر دو پارامتر وضوح خروجی تبدیل موجک و بار محاسباتی الگوریتم، مقادیر قابل قبولی را خواهد داشت. در واقع می‌توان گفت که با توجه به تغییر نایکوئیست، با بالاتر رفتن فرکانس نمونهبرداری، بازه‌ی فرکانسی بیشتری از مؤلفه‌های فرکانس بالا در دسترس خواهد بود. این موضوع باعث بالاتر رفتن دقت الگوریتم پیشنهادی می‌شود. از طرفی، وجود نمونه‌های 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 تصمیم‌گیری الگوریتم پایین خواهد آمد و ساختار سیستم حفاظتی نیز پیچیده‌تر خواهد شد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با بهره‌گیری از سیگنال گذراي فرکانس بالا تولید شده توسط خطأ، یک الگوریتم سیار کارآمد با بار محاسباتی بسیار کم پیشنهاد شده است. برای پیشنهاد الگوریتمی برای پیاده‌سازی بر روی رله‌ی حفاظتی، حجم پایین محاسباتی، سرعت بالا و دقت بالا الگوریتم، نکات بسیار مهمی هستند که باید در نظر گرفته شوند. در الگوریتم پیشنهادی، ثبت نمونه‌های فقط یک چهارم سیکل از سیگنال‌های جریان دیفرانسیل کافی است. سپس، تبدیل موجک به نمونه‌های ثبت شده اعمال می‌شود و انحراف معیار خروجی تبدیل موجک برای هر یک از سه فاز محاسبه می‌گردد. از روی مقادیر انحراف معیار به دست آمده، خطای داخلی از شرایط جریان هجومی تشخیص داده می‌شود. همانطور که نتایج شبیه‌سازی هم نشان داد، الگوریتم پیشنهادی دقت بسیار بالایی دارد و خطاهای داخلی را در شرایط مختلف به درستی شناسایی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که الگوریتم پیشنهادی خطاهای داخلی را در صورت به اشباع رفتن CT‌های دو سمت ترانسفورماتور نیز شناسایی می‌کند. از سوی دیگر، الگوریتم پیشنهادی بار محاسباتی بسیار پایینی دارد. بنابراین، علاوه بر اینکه به راحتی بر روی رله‌های شبکه قابل پیاده‌سازی است، سرعت شناسایی خطای داخلی توسط این الگوریتم هم بسیار بالاست. نیاز به داشتن نمونه‌های یک چهارم سیکل از سیگنال جریان دیفرانسیل- تضمین کننده‌ی سرعت بالایی الگوریتم پیشنهادی است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که زمان لازم برای نتیجه‌گیری الگوریتم پیشنهادی حدود  $11\text{ms}$  بوده است. لازم به ذکر است که فرکانس

- 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.

---

### زیرنویس‌ها

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