



DOR:

20.1001.1.23223146.1400.8.2.6.7

نشریه علمی-فنی در مهندسی برق

دوره ۸ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

صفحات ۱۱۷ الی ۱۳۷

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# تشخیص و طبقه‌بندی خطاهای فرامرزی، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی

سجاد باقری<sup>۱</sup>، فاطمه صفری<sup>۲</sup> و نسیم شهبازی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول - استادیار - گروه مهندسی برق - واحد اراک - دانشگاه آزاد اسلامی - اراک - ایران

s-bagheri@iau-arak.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد - گروه مهندسی برق - واحد اراک - دانشگاه آزاد اسلامی - اراک - ایران

safari.ieee@gmail.com

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری - گروه مهندسی برق - واحد اراک - دانشگاه آزاد اسلامی - اراک - ایران

n-shahbazi97@iau-arak.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵

## چکیده

### واژه‌های کلیدی

حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورها، خطاهای فرا-مرزی، خطاهای داخلی، خطاهای خارجی، جریان هجومی، تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی.

این مقاله، به بررسی و عملکرد حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت در حضور انواع خطاهای داخلی، خطاهای خارجی و خطاهای فرا-مرزی<sup>۱</sup> در حضور اشباع ترانسفورماتورهای جریان که از نوآوری اصلی این تحقیق بشمار می‌رود، پرداخته است. تشخیص و طبقه‌بندی خطاهای فرا-مرزی از سایر پیشامدها، از مهمترین چالش‌هایی است که امروزه مهندسان حفاظت با آن روبرو هستند. لذا در این تحقیق، از تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی<sup>۱</sup> به منظور تشخیص و طبقه‌بندی دقیق این پیشامدها براساس استخراج شاخص‌های ضرایب انرژی ویژگی‌های برتر در سطوح مختلف انرژی استفاده شده است. ابتدا، خطاهای فرا-مرزی، خطاهای داخلی و خارجی و همچنین پدیده جریان هجومی بر روی سیستم مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار EMTP شبیه‌سازی و جریان دیفرانسیل در پیشامدهای مختلف نمونه برداری شده است. سپس، شاخص‌های میانگین مجموع ضرایب انرژی هر سطح توسط تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی توسط نرم‌افزار MATLAB محاسبه شده و براساس مقادیر شاخص‌ها، تمایز و کلاسه بندی پیشامدها صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها تأیید می‌کنند که الگوریتم حفاظتی پیشنهادی قابلیت تشخیص و طبقه‌بندی خطاهای فرا-مرزی از دیگر پیشامدها را در شرایط مختلف کاری ترانسفورماتورها داشته و سبب بهبود عملکرد حفاظت دیفرانسیل و افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت خواهد شد.



Sahand University  
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1400.8.2.6.7](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1400.8.2.6.7)

Journal of Nonlinear  
Systems in Electrical  
Engineering

Vol.8, No.2

Autumn and Winter 2021

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# Detection and Classification of Cross-Country Faults, Internal and External Electrical Faults and Inrush Current in Power Transformers Using Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform

Sajad Bagheri<sup>1</sup>, Fatemeh Safari<sup>2</sup>, and Nassim Shahbazi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>**Corresponding Author**, Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran, [s-bagheri@iau-arak.ac.ir](mailto:s-bagheri@iau-arak.ac.ir)

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, [safari.ieee@gmail.com](mailto:safari.ieee@gmail.com) Arak, Iran,

<sup>3</sup>Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran, [n-shahbazi97@iau-arak.ac.ir](mailto:n-shahbazi97@iau-arak.ac.ir)

## ABSTRACT

### Keywords

Differential Protection of Transformers,  
Cross Country Faults,  
Internal Faults,  
External Faults,  
Inrush current,  
Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform.

This paper investigates the performance of differential protection of power transformers at the presence of internal faults, external faults, and cross-country faults at the presence of current transformers saturation, which is one of the main innovations of this study. Today, detection and discrimination of cross-country faults from other disturbances are the most important challenges facing protection engineers. Therefore, in this study, maximal overlap discrete wavelet transform has been used in order to accurately detect and classify these disturbances based on the extraction of energy coefficient indices of superior features. First, the cross-country faults, internal faults and external electrical faults, and inrush current phenomenon on the system under study in the EMTP software are simulated and differential current is sampled in different disturbances. Then, the mean indices of the sum of energy coefficient of each level are calculated by MODWT using the MATLAB software, and based on the values of indices, discrimination and classification of events are done. The results obtained from the simulations confirm that the proposed protection algorithm can detect and classify cross-country faults from other disturbances. Moreover, this method will improve the differential protection performance in different operating conditions and increase the reliability of power systems.

## ۱- مقدمه

ترانسفورماتور قدرت از اصلی‌ترین تجهیزات سیستم قدرت و گران‌ترین تجهیز در شبکه محسوب می‌گردد. معیوب شدن این تجهیز وقفه‌های طولانی مدتی را به همراه دارد و ترمیم آن نیز پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد. به همین علت، امروزه استفاده از تکنیک‌های پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات از جمله روش‌های تست و تشخیص تخلیه جزئی جهت بررسی وضعیت عایقی ترانسفورماتورها از نیازهای مهم و ضروری صنعت برق به شمار می‌رود [۱]. حفاظت رایج برای ترانسفورماتورهای قدرت، حفاظت دیفرانسیل درصدی است که در شرایط مختلف، ممکن است عملکرد مطلوبی نداشته باشد. از جمله این شرایط می‌توان به عملکرد ترانسفورماتورها در هنگام سوئیچینگ و ایجاد جریان هجومی و تشخیص و تمایز آن از خطای داخلی و خارجی به همراه اشباع ترانسفورماتورهای جریان اشاره نمود که موجب عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی خواهد شد [۲ و ۳]. امروزه تشخیص و تمایز خطاهای فرا-مرزی از دیگر پیشامدها از مهمترین چالش‌هایی است که مهندسان حفاظت با آن روبرو هستند. خطای فرا-مرزی خطایی است که در دو محل مختلف در مدارهای مشابه و به طور همزمان یا بعد از یک تأخیر کوتاه رخ می‌دهد. در میان حالات مختلف خطاهای فرا-مرزی، خطای الکتریکی خارجی که سبب ایجاد خطای الکتریکی و مکانیکی داخلی ترانسفورماتورها می‌شود، از مهمترین مسائل حفاظتی بشمار می‌رود. زیرا در هنگام رخداد خطای خارجی، سیستم حفاظتی بلاک شده و عملکردی نخواهد داشت. ولی در هنگام خطای داخلی بلافاصله حفاظت دیفرانسیل باید از حالت بلاک خارج شود و دستور قطع را به بریکر صادر نماید [۴-۶].

در [۴]، از الگوریتم حفاظتی مبتنی بر استخراج سیگنال‌های انرژی ضرایب موجک تفاضل ناحیه‌ای و براساس موجک مادر دابچی استفاده شده است. در این روش با شمارش ضرایب انرژی تفاضلی موجک، به تشخیص پیشامدهای مختلف در ترانسفورماتور پرداخته است. همچنین، روش‌های مختلفی جهت شناسایی الگوهای جریان دیفرانسیل نمونه برداری شده در هنگام پیشامدهای مختلف ارائه شده‌اند که می‌توان به روش‌های هوشمند اشاره نمود. این روش‌ها شامل استفاده از تبدیل موجک حداکثر همپوشانی و شبکه عصبی<sup>۱</sup> [۷]، روش مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان<sup>۲</sup> [۸ و ۹]، تبدیل کلارک<sup>۳</sup> و تبدیل S-هایپربولیک اصلاح شده [۱۰-۱۱]، جنگل تصادفی<sup>۵</sup> [۱۲]، درخت تصمیم<sup>۶</sup> [۱۳-۱۵]، روش آماری<sup>۷</sup> [۱۶]، ماشین یادگیری عمیق<sup>۸</sup> [۱۷] می‌باشد که دارای توانایی یادگیری و تعمیم‌پذیری بالایی هستند.

در [۸]، از الگوریتم‌های حفاظتی مختلف مبتنی بر تبدیل موجک حداکثر همپوشانی و شبکه‌ی عصبی به منظور تشخیص و تمایز خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ از سایر پیشامدها استفاده شده است. در [۸]، هیچگونه مطالعه‌ای در خصوص بررسی و تشخیص خطاهای فرا-مرزی از سایر پیشامدهای موجود در ترانسفورماتورها صورت نگرفته است.

<sup>1</sup> Neural Network (ANN)

<sup>2</sup> Support Vector Machine (SVM)

<sup>3</sup> Clarke Transform

<sup>4</sup> Modified hyperbolic S-transform

<sup>5</sup> Random Forest

<sup>6</sup> Decision Tree

<sup>7</sup> Statistical

<sup>8</sup> Deep Learning Machine

در [۱۰]، روش مبتنی بر تبدیل کلارک و تبدیل S-هایپربولیک اصلاح شده برای تفکیک خطاهای داخلی و خطاهای حلقه به حلقه از دیگر شرایط ارائه شده است. در [۱۰]، شرایط فوق تحریک و فوق اشباع و خطای خارجی و جریان هجومی نیز در نظر گرفته شده است. این روش دارای پیچیدگی‌های زیادی است و همچنین در خصوص خطاهای فرا-مرزی بحثی به میان نیامده است.

در [۱۱]، از تبدیل S-هایپربولیک و شاخص‌های آماری جهت تشخیص و تمایز انواع پیشامدها از جمله خطاهای فرا-مرزی و جریان هجومی در ترانسفورماتور استفاده شده است. در [۱۱]، خطاهای الکتریکی خارجی و خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ ناشی از تغییر شکل شعاعی و جابجایی محوری بعنوان خطاهای فرا-مرزی در نظر گرفته شده است. این مرجع به خوبی توانسته انواع خطاهای فرا-مرزی را با دقت بالا تشخیص و تمایز دهد. تمرکز این مطالعه بر روی مدل‌سازی خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور بوده است و در خصوص خطاهای داخلی همزمان با پدیده‌ی جریان هجومی بحثی به میان نیامده است.

در [۱۲]، روش‌های مختلف کلاسه‌بندی خطاهای فرا-مرزی و جریان هجومی در ترانسفورماتورها مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، از تبدیل زمان-زمان<sup>۱</sup> جهت استخراج ویژگی‌های برتر سیگنال جریان دیفرانسیل نمونه‌برداری شده و از طبقه‌بندی کننده‌های درخت تصادفی<sup>۲</sup>، جنگل تصادفی و نزدیکترین همسایگی<sup>۳</sup> جهت کلاسه‌بندی پیشامدها استفاده شده است. در این مطالعه، به بررسی خطاهای فرا-مرزی شامل خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ و خطاهای الکتریکی خارجی پرداخته شده است؛ اما بحثی از خطاهای داخلی به همراه پدیده‌ی جریان هجومی و همچنین نحوه محاسبات شاخص‌های ضرایب انرژی توسط تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی در سطوح مختلف نشده است.

در [۱۸]، طرح حفاظت دیفرانسیل خط انتقال مبتنی بر تبدیل موجک تطبیقی با در نظر گرفتن خطای فرا-مرزی و اشباع ترانسفورماتور جریان پیشنهاد شده است. این روش تنها برای حفاظت خطوط انتقال در هنگام خطاهای فرا-مرزی ارائه شده است.

در [۱۹]، از روش ضریب همبستگی به منظور تشخیص و تمایز جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی در ترانسفورماتورها با استفاده از تبدیل موجک گسسته پرداخته شده است و هیچگونه مطالعه‌ای در خصوص خطاهای فرا-مرزی صورت نگرفته است.

در این مقاله، به بررسی اثر خطاهای مختلف از جمله خطاهای فرا-مرزی، خطاهای داخلی و خارجی و پدیده جریان هجومی بر عملکرد حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت پرداخته شده است. به این صورت که ابتدا، جریان‌های دیفرانسیل در پیشامدهای مختلف در نرم افزار EMTP نمونه برداری و استخراج می‌شود. سپس، ویژگی‌های برتر جریان‌های نمونه برداری شده توسط تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی با تابع موجک مادر دابچی ۴ (db4) در چهار سطح مختلف استخراج و شاخص‌های انرژی ضرایب میانگین مجموع هر سطح در نرم افزار MATLAB محاسبه می‌گردد. در نهایت، براساس مقادیر شاخص‌های ضرایب محاسبه شده در هر سطح که از نوآوری اصلی این مقاله نسبت به تحقیقات گذشته محسوب می‌شود، تشخیص و تمایز میان پدیده‌های مختلف صورت خواهد گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی دارای عملکرد مطلوبی در تشخیص و تمایز حالات مختلف عملکردی در حضور خطاهای فرا-مرزی خواهد داشت.

<sup>1</sup> Time-Time Transform

<sup>2</sup> Random Tree

<sup>3</sup> Nearest Neighbors-K

## ۲- خطای فرا-مرزی و تأثیر آن بر حفاظت دیفرانسیل

خطای فرا-مرزی از جمله خطاهایی هستند که تشخیص و شناسایی آن‌ها برای مهندسان حفاظت بسیار مشکل است. خطای فرا-مرزی به عنوان خطای زمین تعریف می‌شود که در دو محل مختلف در یک یا چند مدار مختلف و احتمالاً در فازهای مختلف باهم و یا بعد از یک تأخیر زمانی کوتاه رخ می‌دهد [۴]. همچنین، خطاهای خارجی که سبب ایجاد خطاهای داخلی می‌شوند نیز می‌توانند جزو خطاهای فرا-مرزی محسوب شوند که سبب عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورها خواهد شد [۵]. در [۴-۶]، دو روش برای مواجهه با خطاهای فرا-مرزی و جلوگیری از عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل پیشنهاد شده است که هر کدام دارای معایبی است.

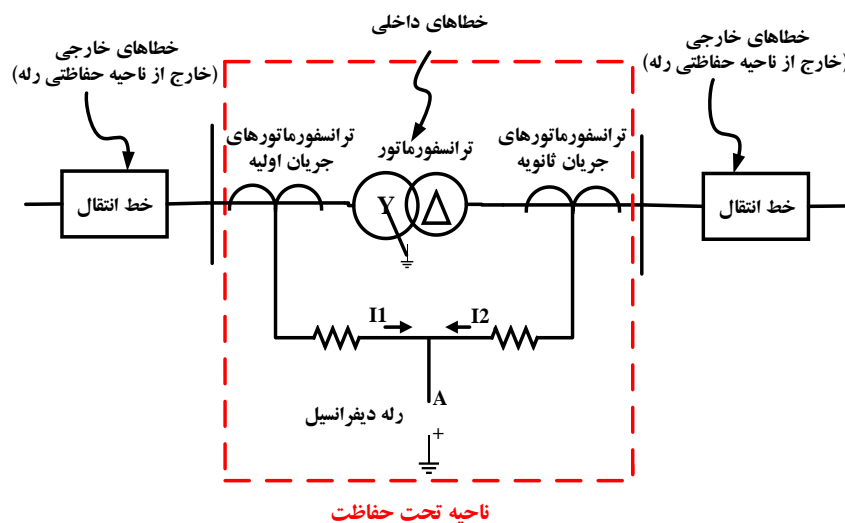
روش اول نادیده گرفتن احتمال وجود خطای فرا-مرزی است. یعنی حفاظت دیفرانسیل در مواجهه با این خطاها بلاک شود و این روند تا زمانی ادامه یابد که المان دیفرانسیل اصلاح شود. مشکل این روش این است که اگر خطای خارجی به خطای داخلی تبدیل شود، سیستم حفاظتی به مدت طولانی موفق به قطع مدار نخواهد شد.

روش دوم تشخیص پیوسته الگوی شکل موج جریان دیفرانسیل به منظور بررسی اینکه آیا ترانسفورماتور جریان هنوز در حالت اشباع است یا خیر. در این حالت، اگر همچنان ترانسفورماتور جریان در حالت اشباع باشد، خطای فرا-مرزی ناموجود در نظر گرفته خواهد شد؛ در غیر این صورت مشخص می‌شود که خطای خارجی به یک خطای داخلی تبدیل شده و سیستم حفاظت از وضعیت بلاک خارج می‌گردد.

لذا بدلیل نواقص و مشکلاتی که در تشخیص و حفاظت صحیح ترانسفورماتورها در حضور اینگونه خطاها وجود دارد، الگوریتم حفاظتی جدیدی جهت بهبود عملکرد حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت در این مقاله پیشنهاد شده است که در قسمت‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد.

در شکل (۱)، طرح شماتیک خطاهای فرا-مرزی رخ داده در ترانسفورماتورها نشان داده شده است.

همزمانی خطاها و یا با یک تأخیر زمانی کوچک = خطای فرامرزی



شکل ۱. شماتیک خطای فرا-مرزی رخ داده در ترانسفورماتورها

### ۳- الگوریتم پیشنهادی

روش ارائه شده در این مقاله شامل دو مرحله می‌باشد. مرحله اول به عنوان مرحله تشخیص، مرحله دوم، مرحله استخراج ویژگی‌ها با استفاده از تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی به منظور تمایز پیشامدها تعریف می‌گردد، که به شرح آن می‌پردازیم.

#### ۳-۱- مرحله تشخیص

در این مرحله، اگر جریان دیفرانسیل از مقدار جریان آستانه بیشتر شود، نشاندهنده‌ی یک نوع خطای داخلی است. در غیر اینصورت، به عنوان یک خطای خارجی یا خطای فرا-مرزی تشخیص داده خواهد شد. بدین منظور یک جریان آستانه ( $i_{thr}$ ) به صورت رابطه (۱) و براساس استاندارد IEEE Std C37.91-2008 در نظر گرفته خواهد شد. مقدار جریان آستانه ( $i_{thr}$ ) به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد [۷]:

$$i_{thr} = k \cdot \frac{(i_{sect} + i_{primct})}{2} + I_0 \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $i_{thr}$  دامنه جریان آستانه،  $I_0$  حداقل جریان عملکردی و یا جریان تنظیمی که درصدی از جریان نامی می‌باشد که مقدار آن بین ۲۰ تا ۴۰ درصد بوده،  $k$  شیب مشخصه عملکردی رله دیفرانسیل درصدی که بر اساس استاندارد IEEE برابر ۱/۱ تا ۰/۴ بوده،  $i_{primct}$  جریان اولیه و  $i_{sect}$  جریان ثانویه عبوری از CTها می‌باشند.

#### ۳-۲- مرحله استخراج ویژگی و تمایز پیشامدها

استخراج ویژگی‌های برتر از سیگنال‌های نمونه برداری شده در شرایط مختلف کاری، مهم ترین مرحله در روش‌های الگوشناسی می‌باشد. در این تحقیق، از تبدیل موجک حداکثر همپوشانی جهت استخراج ویژگی‌های برتر سیگنال‌های جریان دیفرانسیل نمونه برداری شده استفاده شده است. بررسی انرژی مؤلفه‌های حاصل از تبدیل موجک روی سیگنال جریان دیفرانسیل نمونه برداری شده مشخص می‌نماید که می‌توان از اطلاعات موجود در انرژی این ضرایب در سطوح مختلف، به عنوان ابزاری مناسب برای تشخیص خطاها از یکدیگر استفاده نمود [۶ و ۲۰].

تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی از این نظر که فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر به سیگنال ورودی در هر سطح اعمال می‌شوند، مشابه تبدیل موجک گسسته معمولی می‌باشد. داده‌های اولیه معمولاً دچار مشکلاتی از قبیل نویز و تغییرات شدید در بازه دینامیکی و نمونه برداری هستند و استفاده از آن‌ها به همین صورت موجب تضعیف طراحی‌های مراحل بعد خواهد شد. لذا در این مقاله و جهت مقابله با این مشکل، از تبدیل موجک حداکثر همپوشانی استفاده شده است. یکی از ویژگی‌های مهم این روش این است که تبدیل MODWT یک نوع تبدیل غیر قابل تغییر می‌باشد. زیرا، یک شیفت در سیگنال اصلی و شرایط پیش‌بینی نشده از قبیل نویز و هارمونیک‌های موجود در شبکه، الگوی ضرایب تبدیل موجک را تغییر نمی‌دهد.

همچنین، تبدیل MODWT با توجه به روابط (۲) الی (۷) و ماهیت محاسباتی آن، قابلیت یادگیری، تعمیم‌پذیری و دقت بالایی در نواحی فرکانسی مختلف دارد. از دیگر ویژگی‌های تبدیل MODWT نسبت به تبدیل S می‌توان به تجزیه و تحلیل دقیق سیگنال‌های جریان دیفرانسیل نمونه برداری شده در بازه‌های فرکانسی مختلف و استخراج ویژگی‌های برتر (Coefficient matrix) اشاره نمود.

از طرفی، تبدیل زمان-زمان از محاسبه‌ی معکوس تبدیل فوریه از محور فرکانس تبدیل S به دست می‌آید. لذا استفاده از دو تبدیل، پیچیده شدن محاسبات و افزایش مدت زمان تشخیص خطاها و کاهش دقت را به همراه خواهد داشت. همچنین، تبدیل زمان-زمان سیگنال یک بعدی را به سیگنال دوبعدی که تابعی از زمان است، تبدیل می‌کند؛ که نسبت به سایر روش‌های زمان - فرکانس (از جمله تبدیل MODWT) از قدرت تفکیک فرکانسی پایین‌تری برخوردار خواهد بود.

ضرایب تبدیل موجک حداکثر همپوشانی در هر سطح  $z$  از کانولوشن سیگنال‌های اصلی نمونه‌برداری کرده و با استفاده از فیلترهای پاسخ ضربه بی‌نهایت، به صورت روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند [۸].

$$S_j^{2z}(k) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n)S_{j-1}^z(2k-n) \quad (2)$$

$$S_j^{2z+1}(k) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n)S_{j-1}^z(2k-n) \quad (3)$$

در روابط فوق،  $S_0^0$  سیگنال اصلی است. جاییکه  $m \in \mathbb{N}$  در مقیاس  $z$ ،  $m \leq 2^{j-1} - 1$  باشد،  $z = 2m$  تعداد نمونه‌ها است. مؤلفه گره<sup>۱</sup> صفر یعنی  $S_j^0(k)$ ، تجزیه ضرایب بسته موجک را در پایین‌ترین باند فرکانسی در مقیاس  $z$  نشان می‌دهد. همچنین،  $S_j^z(k)$ ، تجزیه ضرایب بسته موجک را در باند فرکانسی بالاتر نشان می‌دهد.

مطابق روابط (۴) الی (۷)، ضرایب تبدیل موجک حداکثر همپوشانی در نمونه‌برداری متناوب با ویژگی زمان-متغیر محاسبه می‌شوند. این تکنیک برای ویژگی‌های نامتغیر با زمان نیز مناسب می‌باشد. روش MODWT، سیگنال ورودی را در سطوح مختلف و از طریق فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر تجزیه می‌نماید و باندهای خروجی فرکانسی یکپارچه‌ای را ارائه می‌دهد. مطابق [۸]، ضرایب تجزیه<sup>۱</sup> و بازسازی<sup>۲</sup> بسته تبدیل موجک حداکثر همپوشانی در هر سطح  $z$  به صورت زیر داده شده است.

$$S_j^{2z}(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n)S_{j-1}^z(k-n) \quad (4)$$

$$S_j^{2z+1}(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n)S_{j-1}^z(k-n) \quad (5)$$

$$\alpha_{j-1}^{2z}(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n)S_j^{2z}(n-k) \quad (6)$$

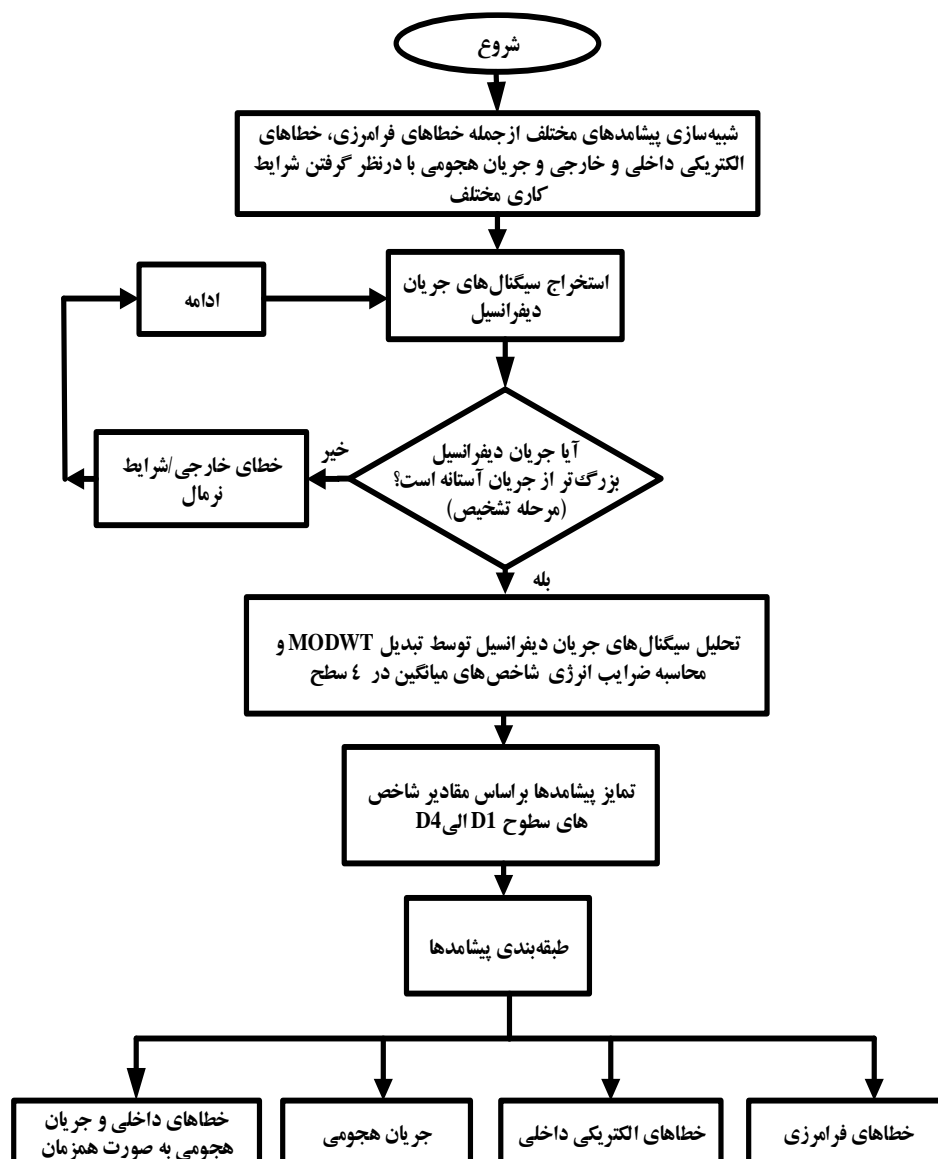
<sup>1</sup> Decomposition Coefficient

<sup>2</sup> Re-construction Coefficient

در این مرحله، از تبدیل موجک حداکثر همپوشانی برای محاسبه سطوح انرژی ضرایب جزئیات سیگنال‌های نمونه‌برداری شده استفاده می‌شود. یکی از انواع تابع موجک به نام دابچی ۴ به دلیل نتایج مناسب در تشخیص پیشامدها در تحقیقات گذشته [۸-۶ و ۴]، جهت اعمال به داده‌های اصلی و تجزیه‌ی آن‌ها به منظور گرفتن بردار ویژگی‌ها تا چهار سطح استفاده می‌شود.

بدین گونه که ابتدا سیگنال‌های جریان دیفرانسیل نمونه‌برداری شده در هر پیشامد توسط EMTP به محیط نرم افزار MATLAB انتقال داده می‌شود. سپس با استفاده از دابچی ۴، سطوح انرژی سیگنال‌های جزئیات در بهترین ناحیه فرکانسی جهت شناسایی ماهیت گذرای جریان‌های خطای داخلی، خارجی، فرا-مرزی و جریان هجومی محاسبه می‌شود. در نهایت، بهترین ویژگی‌های استخراج شده توسط چهار سطح انرژی ضرایب جزئیات (d1-d4) به عنوان بردار ویژگی‌ها، به منظور تشخیص و تمایز پیشامدهای مختلف استفاده می‌گردد.

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی به منظور تشخیص و تفکیک پیشامدها در شکل (۲) نشان داده شده است.

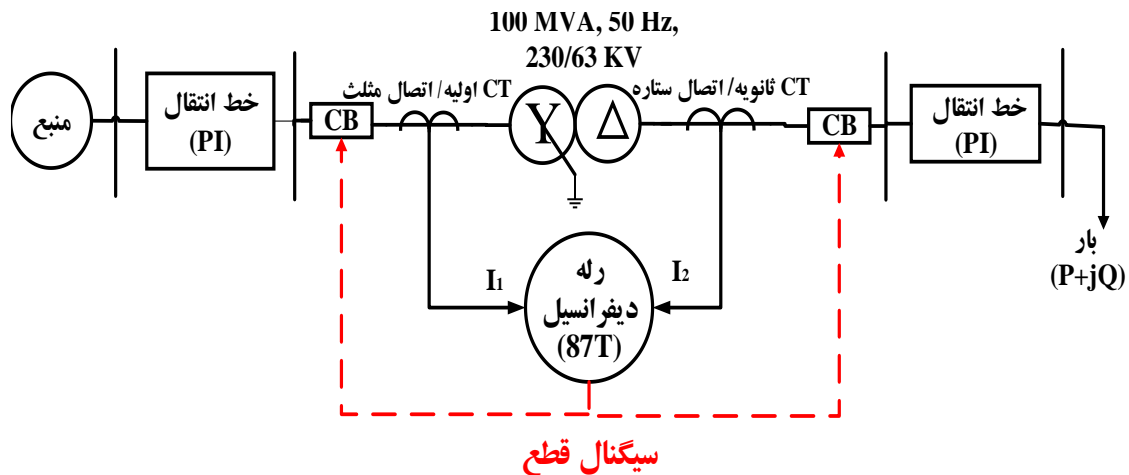


شکل ۲. فلوچارت الگوریتم حفاظتی ارائه شده



#### ۴- سیستم مورد مطالعه

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، شماتیک سیستم قدرت نشان داده شده در شکل (۳) در نرم افزار EMTP مدل سازی می شود. ترانسفورماتور شبیه سازی شده یک ترانسفورماتور سه فاز، ۲۳۰/۶۳ کیلوولت با توان نامی ۱۰۰ مگا ولت آمپر می باشد. همچنین گروه برداری اتصال ترانسفورماتور به صورت YNd11 با فرکانس ۵۰ هرتز مدل سازی شده است [۴].  
 در جدول (۱)، مشخصات سیستم قدرت مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۳. سیستم قدرت تحت مطالعه

جدول ۱. مشخصات سیستم مورد مطالعه

نسبت تبدیل ترانسفورماتور	۲۳۰/۶۳ کیلو ولت
سطح ولتاژ شبکه	۲۳۰ کیلو ولت
فرکانس شبکه	۵۰ هرتز
گروه برداری ترانسفورماتور	YND11
امپدانس سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور	$۲/۰۴+j۱۲/۵۴$
امپدانس سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور	$۱/۴۴+j۳۸/۰۴$
مدت زمان شبیه سازی	۶۰ میلی ثانیه (۳۰۰ نمونه)
پله های زمانی در نرم افزار EMTP	۰/۲ میلی ثانیه

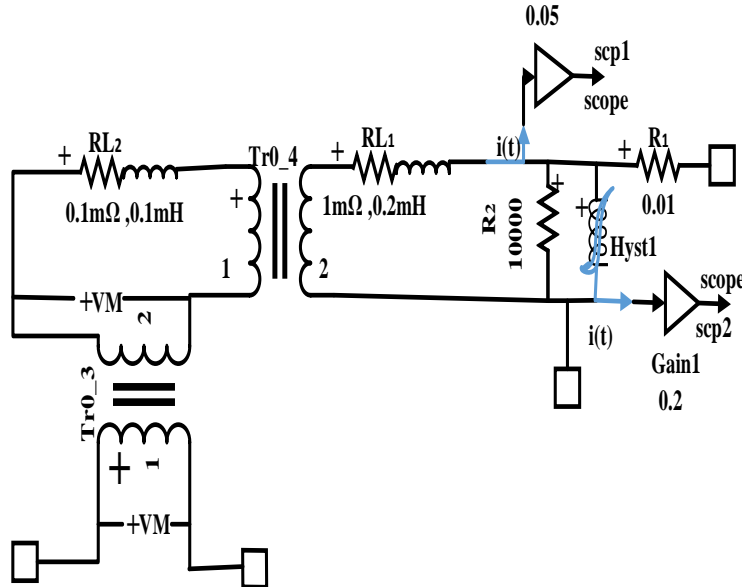
#### ۴-۱- نحوه ی مدل سازی ترانسفورماتورهای جریان

به منظور بررسی رفتار واقعی ترانسفورماتورهای جریان در شرایط مختلف از جمله خطاهای فرا-مرزی، داخلی، خارجی و در لحظه کلید زنی ترانسفورماتور، نیاز به مدل دقیق CTها می باشد. در این مقاله، از زیرشاخه های هیستریسیس<sup>۱</sup> و اشباع<sup>۲</sup> موجود در نرم

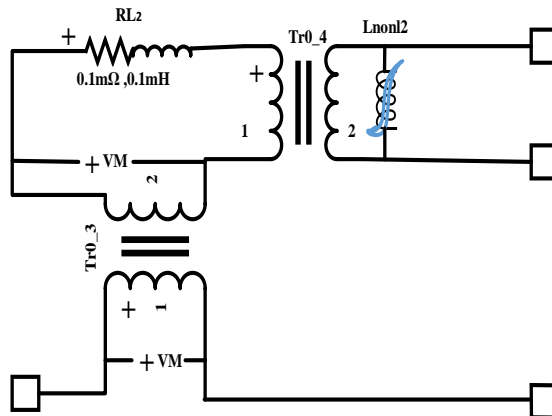
<sup>1</sup> Hysteresis

<sup>2</sup> Saturation

افزار EMTP استفاده شده است. یک ترانسفورماتور غیر ایده‌آل کوپل شده با یک راکتور هیستریزس غیرخطی جهت مدل‌سازی CTها استفاده می‌شود. نحوه مدل‌سازی ترانسفورماتورهای جریان اولیه و ثانویه در نرم افزار EMTP در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است [۴]. جهت صحت سنجی مدل اشباع به کار رفته در ترانسفورماتور از مرجع [۴] استفاده شده است.



شکل ۴. نحوه مدل‌سازی ترانسفورماتور جریان اولیه در EMTP

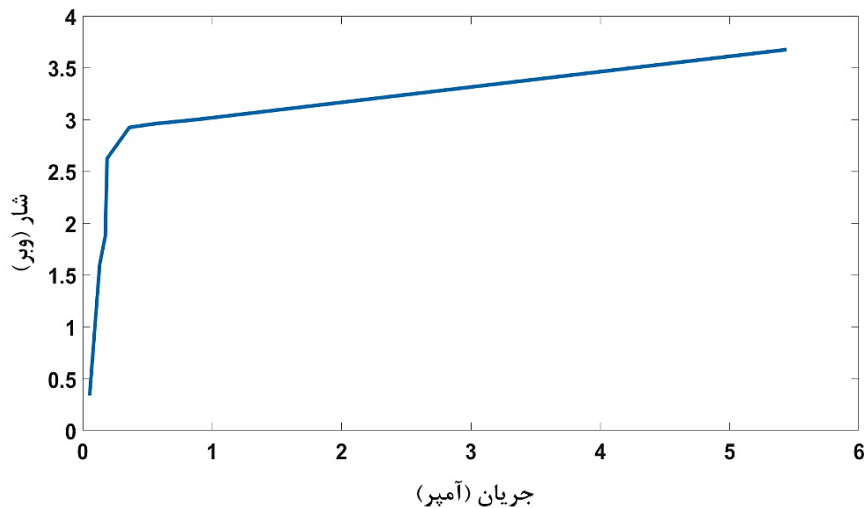


شکل ۵. نحوه مدل‌سازی ترانسفورماتور جریان ثانویه در EMTP

در جدول (۲)، مقادیر جریان و شار مغناطیسی ( $i_p$  و  $\phi$ ) و نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای جریان ارائه شده است. منحنی مشخصه‌ی اشباع ترانسفورماتور جریان در شکل (۶) بدست آمده است.

جدول ۲. مؤلفه‌های غیرخطی مشخصه مغناطیسی مربوط به ترانسفورماتورهای جریان اولیه و ثانویه [۴]

ترانسفورماتور جریان اولیه ۸۰۰/۵ آمپر		ترانسفورماتور جریان ثانویه ۱۲۰۰/۵ آمپر	
$i (A)$	$\varphi(wb)$	$i (A)$	$\varphi(wb)$
۰/۵۲۰	۰/۱۱۲	۰/۰۵۴	۰/۳۳۸
۰/۰۷۵	۰/۲۲۵	۰/۱۳۲	۱/۶۰۶
۰/۱۳۵	۰/۴۵۰	۰/۱۷۵	۱/۸۷۶
۰/۱۶۵	۱/۱۲۵	۰/۱۸۹	۲/۶۲۶
۰/۳۰۱	۱/۵۰۱	۰/۳۶۱	۲/۹۲۶
۰/۵۵۵	۱/۶۸۸	۰/۵۶۱	۲/۹۶۲
۰/۶۸۷	۱/۸۷۶	۰/۸۷۶	۳/۰۰۱
۱/۸۶۵	۲/۲۵۱	۵/۴۴۰	۳/۶۷۷



شکل ۶. منحنی مشخصه ی اشباع ترانسفورماتور جریان

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

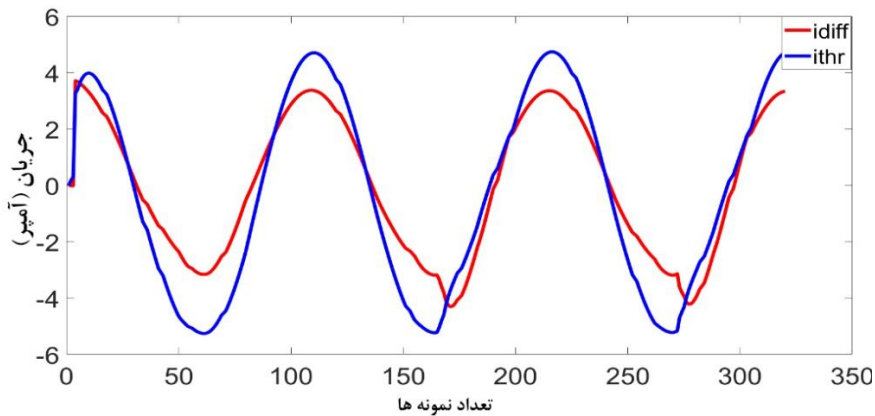
در این قسمت، چندین شرایط عملکردی مختلف ترانسفورماتور از جمله خطاهای فرا-مرزی، خطاهای داخلی، خارجی و پدیده جریان هجومی بر روی سیستم تحت مطالعه شبیه‌سازی می‌گردد. به منظور بررسی و صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی، ۷۹ نمونه مختلف بر روی سیستم مورد مطالعه شبیه‌سازی گردید که برخی از نمونه‌ها به صورت زیر ارائه و تشریح شده‌اند. زمان شبیه‌سازی برای تمامی حالات ۶۰ میلی ثانیه (۳۰۰ نمونه) و با پله‌های زمانی ۰/۲ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است.

### ۵-۱- خطاهای فرا-مرزی

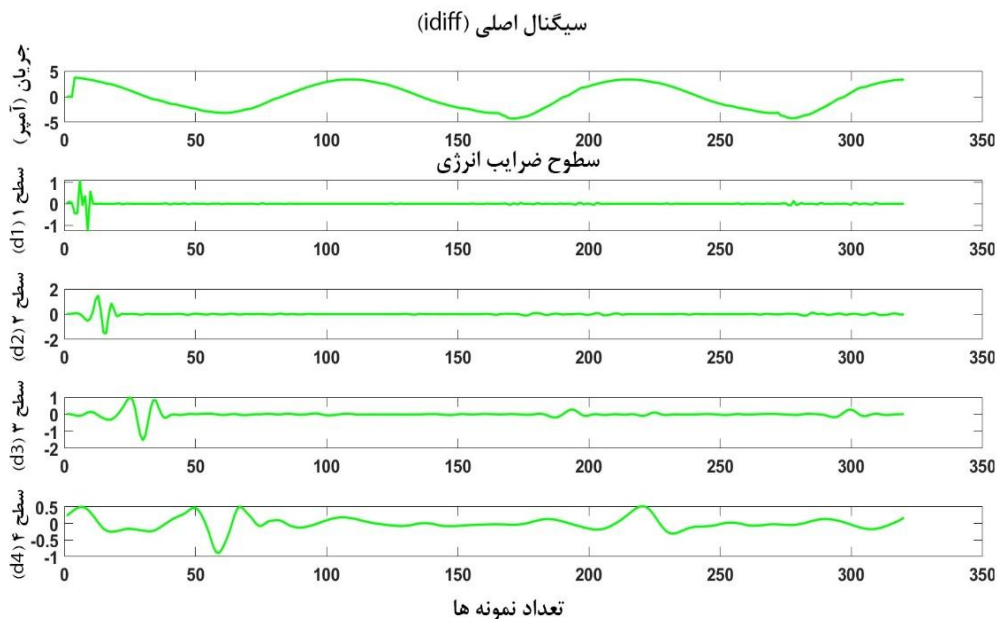
یکی از مهم‌ترین اهداف و نوآوری‌های این مقاله بررسی عملکرد الگوریتم حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی در حضور خطاهای فرا-مرزی می‌باشد. بدین منظور حالت‌های مختلفی از خطای فرا-مرزی (دو خطا به صورت همزمان و دو خطا با تأخیر زمانی) در سیستم مورد مطالعه بررسی گردید که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد.

### ۵-۱-۱- خطای فرا-مرزی نوع اول

خطای فرا-مرزی نوع اول شامل دو خطای داخلی و خارجی به صورت همزمان و در یک فاز مشابه در نظر گرفته شده است. بدین گونه، که خطای خارجی فاز A به زمین بر روی خط انتقال سمت ثانویه و خطای داخلی فاز A به زمین بر روی ترمینال اولیه ترانسفورماتور اعمال می‌گردد. هر دو خطا در زمان ۰/۲ میلی‌ثانیه اتفاق افتاده است. همانطور که در شکل (۷) نشان داده می‌شود در خطای فرا-مرزی نوع اول، دامنه‌ی جریان آستانه بیشتر از جریان دیفرانسیل می‌باشد. این بدین معناست که حفاظت دیفرانسیل قادر به تشخیص خطای فرا-مرزی نوع اول نبوده است و سیستم حفاظتی هیچگونه عملکردی نخواهد داشت. لذا، حفاظت دیفرانسیل دچار عملکرد اشتباه شده است. جهت بهبود عملکرد حفاظت دیفرانسیل و جلوگیری از آسیب به ترانسفورماتور، جریان دیفرانسیل نمونه برداری شده بعنوان ورودی تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی جهت محاسبه چهار سطح انرژی سیگنال‌های جزئیات در بهترین ناحیه فرکانسی مطابق شکل (۸) در نظر گرفته می‌شود. پس از اعمال و محاسبه ضرایب استخراج شده، شناسایی ماهیت گذرای جریان‌های خطای فرا-مرزی انجام گرفته و تشخیص و تمایز کلیه حالات مطابق جدول (۳) بررسی خواهد شد.



شکل ۷. جریان دیفرانسیل و جریان آستانه فاز A در حضور خطای فرا-مرزی نوع اول

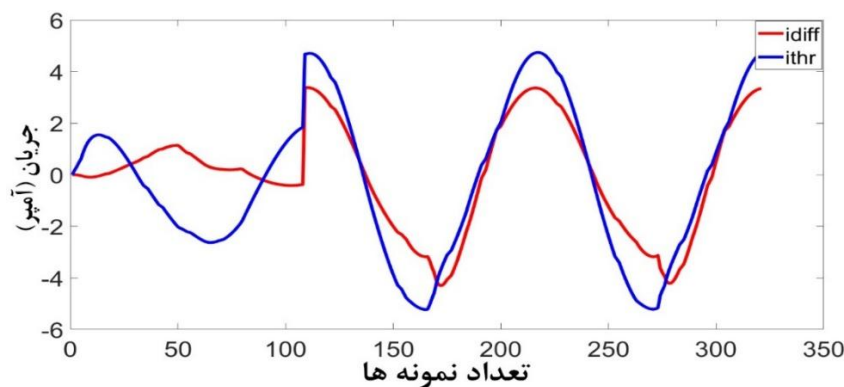


شکل ۸. تجزیه جریان دیفرانسیل برای خطای فرا-مرزی نوع اول در چهار سطح انرژی

## ۵-۱-۲- خطای فرا-مرزی نوع دوم

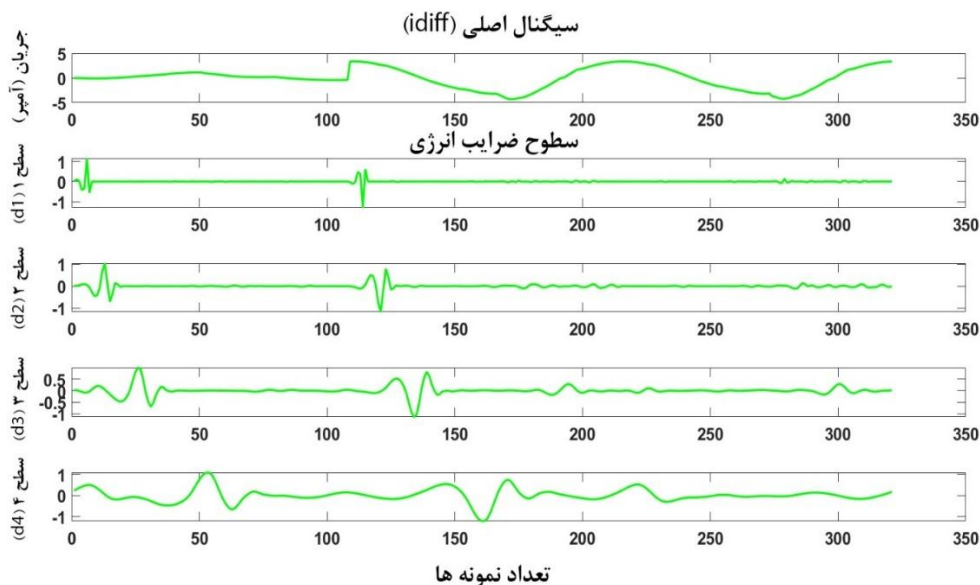
خطای فرا-مرزی نوع دوم به صورت خطای زمین ولی با یک تأخیر زمانی کوتاه مدت لحاظ می‌گردد. به اینصورت که خطای خارجی یکفاز به زمین بر روی خط انتقال سمت ثانویه ترانسفورماتور و در لحظه ۰/۲ میلی‌ثانیه رخ داده است و سپس یک خطای داخلی یکفاز به زمین بر روی ترمینال ثانویه در لحظه ۲۰ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد.

این نوع خطا جزو پر اهمیت‌ترین و سخت‌ترین نوع خطا از لحاظ تشخیص توسط الگوریتم‌های حفاظتی محسوب می‌گردد. زیرا، سیستم حفاظتی به مدت طولانی موفق به قطع مدار نخواهد شد. در شکل (۹) جریان دیفرانسیل و جریان آستانه نمونه‌برداری شده در هنگام رخداد این نوع خطا نشان داده شده است. همانطور که از نتایج پیداست، بدلیل اولویت رخداد خطای خارجی نسبت به خطای داخلی، همچنان جریان آستانه بیشتر از جریان دیفرانسیل نمونه‌برداری شده است و مجدداً حفاظت دیفرانسیل دچار عملکرد اشتباه در تشخیص خطا شده است.



شکل ۹. جریان دیفرانسیل و جریان آستانه فاز A در حضور خطای فرا-مرزی نوع دوم (با اشباع ترانسفورماتورهای جریان)

مطابق شکل (۱۰)، جریان دیفرانسیل نمونه‌برداری شده بعنوان ورودی تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی جهت محاسبه ضرایب جزئیات سطح اول تا چهارم اعمال و تشخیص و تمایز کلیه حالات مطابق جدول (۳) صورت می‌گیرد.

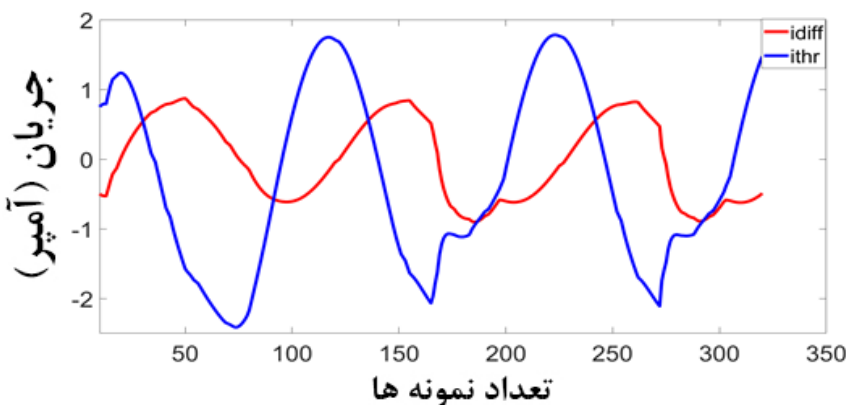


شکل ۱۰. تجزیه جریان دیفرانسیل برای خطای فرا-مرزی نوع دوم در چهار سطح انرژی

## ۲-۵- نتایج حاصل از خطاهای خارجی

پدیده اشباع ترانسفورماتورهای جریان یکی از مشکلات اساسی در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت می‌باشد که در هنگام خطای خارجی با سطح دامنه بالا رخ می‌دهد. در این حالت ممکن است رله‌های دیفرانسیل به مقدار ناچیزی عملکرد مناسبی در هنگام اشباع CTها نداشته باشند [۲۳و۲]. با این حال، اشباع CTها تا زمانی که هر دو آن‌ها (اولیه و ثانویه) کاملاً شرایط یکسانی داشته باشند، نمی‌تواند سبب خطا در عملکرد رله نمایند. در واقع مشکل اصلی مربوط به شرایطی است که تنها یکی از ترانسفورماتورهای جریان به اشباع می‌رود.

ویژگی‌های مغناطیسی غیر مشابه، عدم تطابق در بار یا نسبت جریان و شار باقی مانده دلایل اصلی این وضعیت هستند. در این حالت دستور قطع ناخواسته توسط رله دیفرانسیل صادر می‌گردد. در این مقاله، حالت‌های مختلفی از خطاهای خارجی در دو سمت ترانسفورماتور به صورت فاز به فاز، فاز به زمین و سه فاز مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان نمونه، نتایج حاصل از خطای خارجی به ازای خطای فاز A به زمین در سمت ثانویه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این خطا در لحظه ۰/۲ میلی ثانیه اتفاق افتاده است.

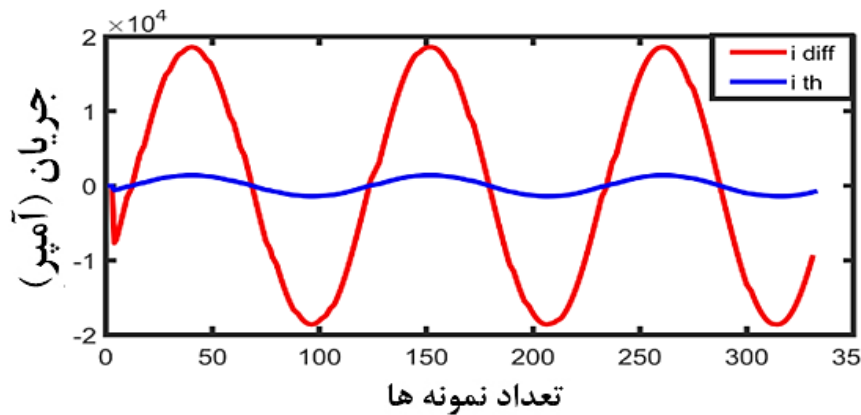


شکل ۱۱. جریان دیفرانسیل و جریان آستانه به ازای خطای فاز A به زمین در وسط خط انتقال (با اشباع ترانسفورماتورهای جریان)

با توجه به مرحله تشخیص، چون قبل و بعد از خطا، جریان دیفرانسیل کمتر از جریان آستانه است، سیگنال جریان دیفرانسیل نمونه‌برداری شده، به تبدیل ویولت جهت استخراج چهار سطح ویژگی‌ها اعمال نخواهد شد.

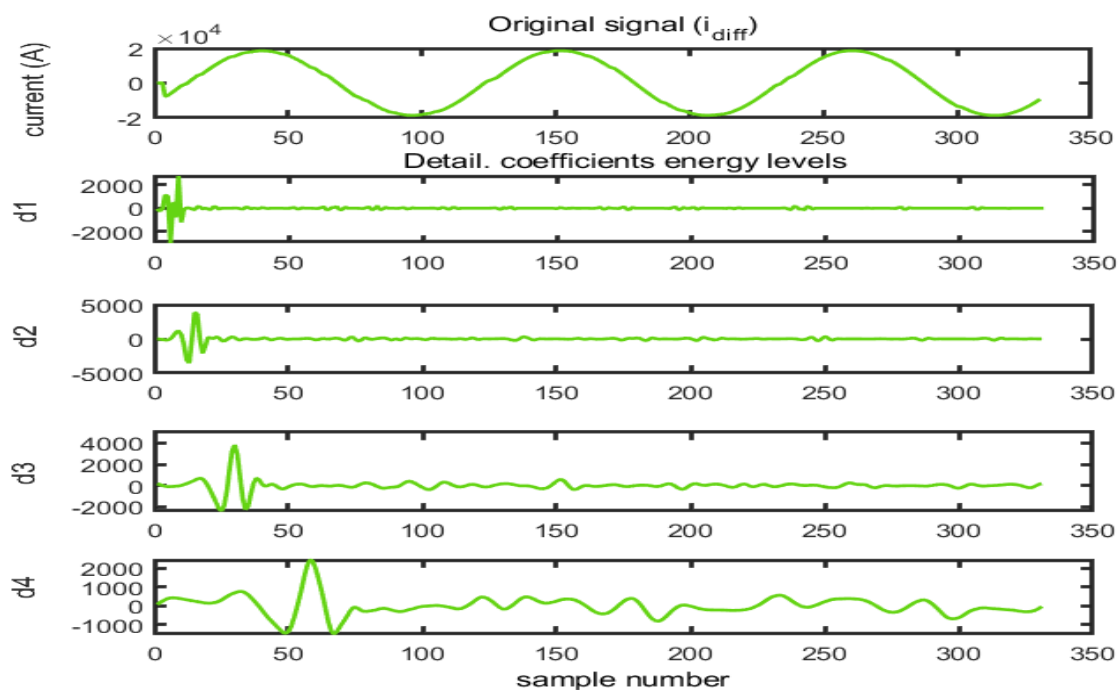
## ۳-۵- نتایج حاصل از خطای الکتریکی داخلی

در این قسمت، خطاهای داخلی مختلفی بر روی سیستم تحت مطالعه اعمال و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان نمونه، نتایج خطای داخلی به ازای خطای فاز B به زمین در سمت ترمینال اولیه و در لحظه ۰/۲ میلی ثانیه مطابق شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. جریان دیفرانسیل و جریان آستانه در حضور خطای ترمینال اولیه فاز B به زمین

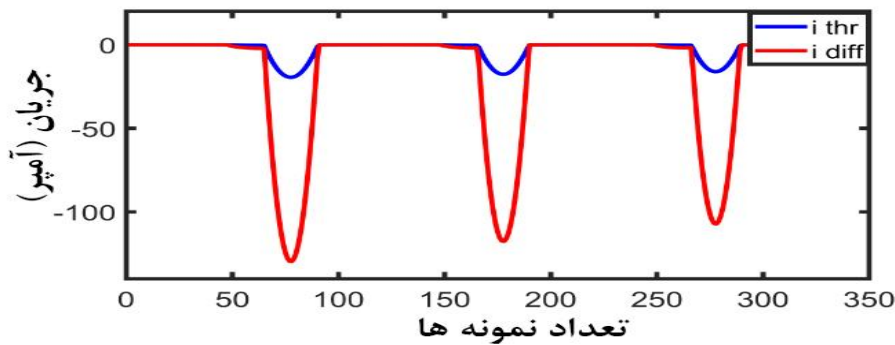
با توجه به مرحله تشخیص، چون جریان دیفرانسیل بیشتر از جریان آستانه می‌باشد، به عنوان خطای داخلی شناسایی می‌شود. به منظور بهبود عملکرد رله و تشخیص دقیق این نوع خطا از سایر پیشامدها، ضرایب جزئیات سطح اول تا چهارم توسط دابچی ۴ مطابق شکل (۱۳) تجزیه و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۱۳. تجزیه جریان دیفرانسیل برای خطای داخلی فاز B به زمین در چهار سطح انرژی

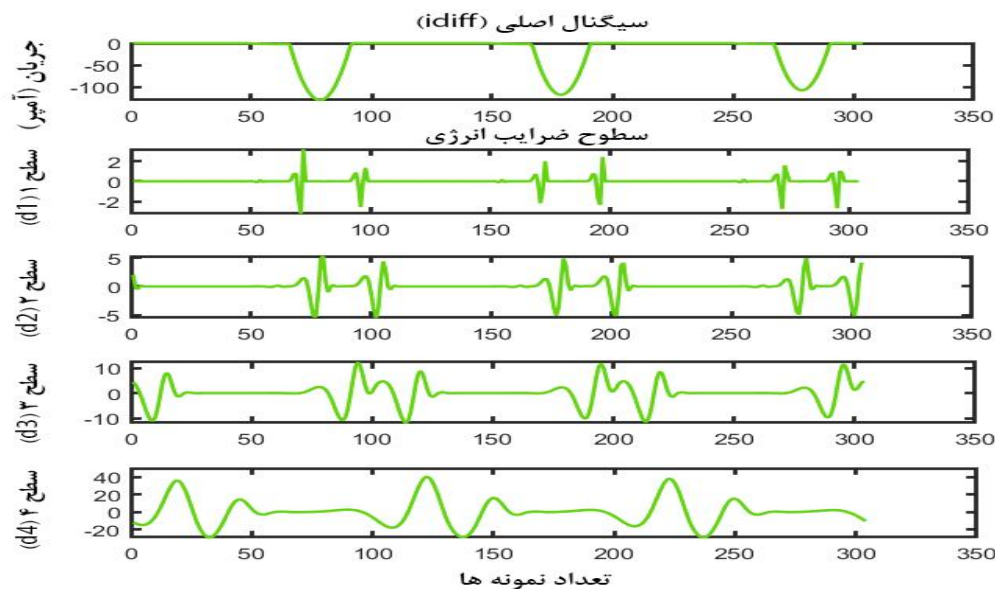
#### ۵-۴- نتایج حاصل از جریان هجومی

نتایج بررسی پدیده جریان هجومی بر روی سیستم مورد مطالعه در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این حالت، سیگنال جریان دیفرانسیل نمونه‌برداری شده فاز A در هنگام برق‌دار شدن ترانسفورماتور در لحظه ۰/۲ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. زاویه فاز A برابر ۹۰ درجه در لحظه برق‌دار کردن است، و ترانسفورماتور ۶۰٪ بار نامی را تغذیه می‌کند.



شکل ۱۴. جریان دیفرانسیل و جریان آستانه فاز A برای یک جریان هجومی

با توجه به مرحله تشخیص، چون جریان دیفرانسیل بیشتر از جریان آستانه شده است، حفاظت دیفرانسیل عملکرد اشتباهی خواهد داشت. به همین علت برای تشخیص صحیح جریان هجومی از سایر پدیده‌ها، مجدداً ضرایب جزئیات سطح اول تا چهارم توسط دابچی ۴ مطابق شکل (۱۵) تجزیه و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

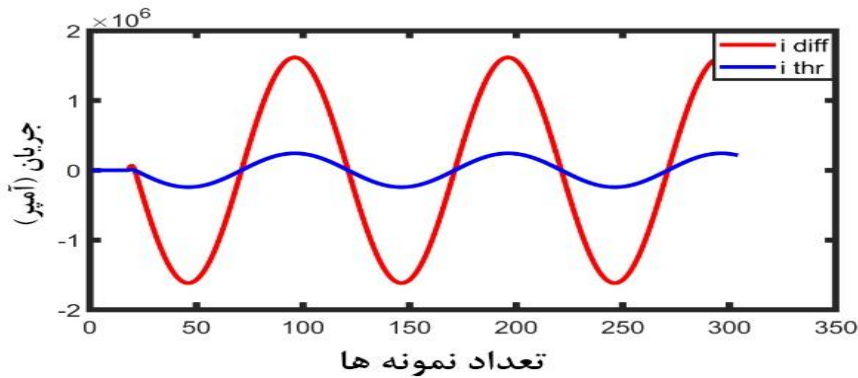


شکل ۱۵. تجزیه جریان دیفرانسیل برای جریان هجومی فاز A در چهار سطح انرژی

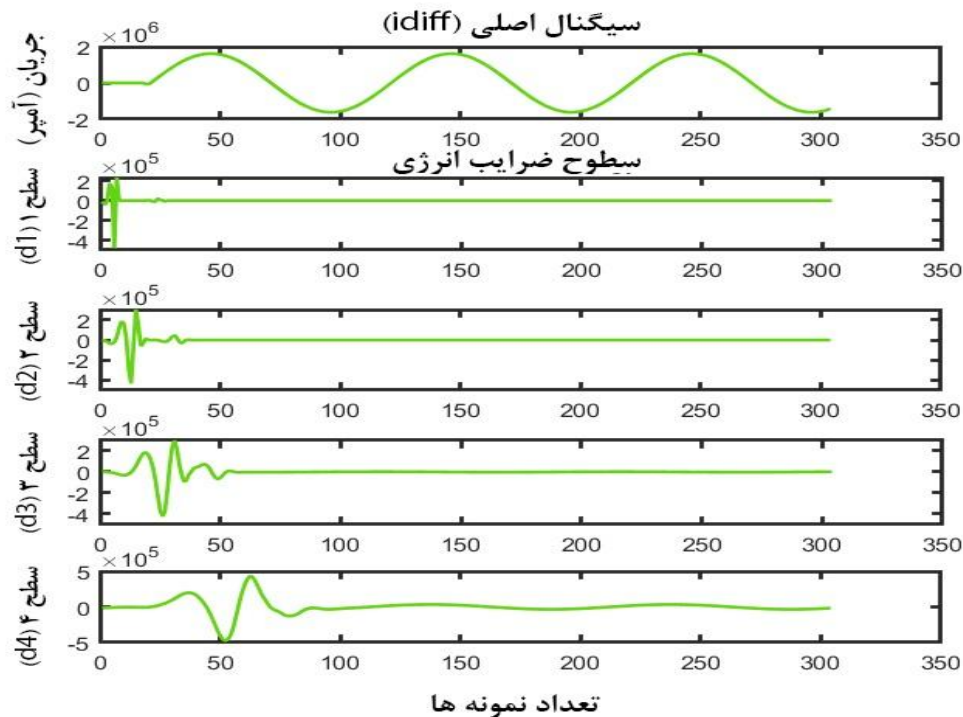
## ۵-۵- نتایج حاصل از خطای داخلی و جریان هجومی به صورت همزمان

در این قسمت، عملکرد حفاظت دیفرانسیل با وجود خطای داخلی و جریان هجومی به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۶)، سیگنال جریان دیفرانسیل نمونه‌برداری شده فاز A در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور و خطای داخلی دو فاز A-B به هم در سمت ترمینال اولیه نشان داده شده است. شکل (۱۷) نیز تجزیه سیگنال نمونه برداری شده تا سطح چهارم جهت استخراج ضرایب ویژگی‌ها نشان داده شده است.





شکل ۱۶. جریان دیفرانسیل و جریان آستانه فاز A در هنگام جریان هجومی و خطای داخلی دو فاز A-B در سمت ترمینال اولیه



شکل ۱۷. تجزیه جریان دیفرانسیل برای خطای داخلی و جریان هجومی به صورت همزمان در چهار سطح انرژی

## ۵-۶- مرحله‌ی حاصل از تمایز پیشامدها

ویژگی‌های متفاوت تولید شده توسط تبدیل ویولت و خروجی آن‌ها، به منظور تمایز انواع پیشامدها که شامل خطاهای فرا-مرزی، خطاهای داخلی و خارجی و جریان هجومی است، مطابق جدول (۳) محاسبه شده است. به عبارت دیگر، با توجه به تعداد سیگنال‌های شبیه‌سازی شده برای هر یک از پیشامدها در مرحله شبیه‌سازی، ۱۲ نمونه ویژگی برای خطاهای فرا-مرزی، ۳۶ نمونه برای خطاهای داخلی در ترمینال، ۲۴ نمونه برای خطاهای داخلی و جریان هجومی به صورت همزمان و ۷ نمونه ویژگی برای جریان هجومی مورد استفاده قرار گرفته است.

از نتایج موجود در جدول (۳) می‌توان دریافت که مقادیر ضرایب موجود در سطح ۳ کمترین همپوشانی را با سایر پیشامدها جهت تمایز خطاهای فرا-مرزی دارند. همچنین، می‌توان دریافت که مقادیر ضرایب موجود در سطح ۲ کمترین همپوشانی را با سایر پیشامدها جهت تمایز خطاهای داخلی و جریان‌های هجومی به صورت مجزا دارند. در نهایت، براساس نتایج ضرایب موجود در سطح ۱ می‌توان

پی برد که کمترین همپوشانی برای تشخیص همزمان خطاهای داخلی و جریان هجومی با سایر پیشامدها وجود دارد.

**جدول (۳). نمونه‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار EMTP به همراه شاخص‌های میانگین سطوح تبدیل MODWT**

پیشامد	نوع پیشامد	زاویه فاز در هنگام خطا (درجه)	مقدار مقاومت خطا (اهم)	شاخص‌های میانگین مجموع محاسبه شده هر سطح در تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی			
				سطح ۱ D1	سطح ۲ D2	سطح ۳ D3	سطح ۴ D4
خطای فرا-مرزی نوع اول	A-G	۱۲۰	۰	-۱/۰۹۵۶	-۸/۹۴۷۵	-۱/۶۷۹۹	۰/۵۳۱
	B-G	۱۲۰	۱	۱/۱۳۲۱	-۳/۱۰۴۲	-۱/۰۹۵۶	۰/۳۸۱
	C-G	۱۲۰	۱۰	۲/۴۶۵۱	۱/۰۵۹۱	-۲/۳۰۰۸	۰/۰۹۱۷
	A-B	۱۲۰	۵	۲/۶۹۷۸	۱/۵۴۱۴	-۱/۱۸۹۶	۰/۱۰۰۲
	B-C	۱۲۰	۵	۳/۱۴۶۹	۱/۹۶۸۴	-۱/۷۵۳۹	۰/۱۴۷۳
	C-A	۱۲۰	۵	۱/۹۶۴۷	۱/۳۲۶۹	-۱/۰۰۴۹	۰/۰۴۳۱
	ABC	۱۲۰	۱۰				
خطای فرا-مرزی نوع دوم	A-G	۱۲۰	۱۰	-۳/۶۴۰۱	۶/۵۵۲۱	-۳/۰۹۴۱	۰/۰۹۱۳
	B-G	۱۲۰	۱	-۱/۰۹۲۰	۱/۷۶۵۴	-۱/۱۴۶۶	۰/۱۴۰۷
	C-G	۱۲۰	۰	-۴/۸۲۳۱	-۵/۶۴۲۱	-۱/۰۹۶۱	۰/۰۵۰۸
	A-B	۱۲۰	۵	-۲/۴۵۳۹	-۷/۳۶۹۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۴۱۳
	B-C	۱۲۰	۵	-۲/۷۹۱۲	-۶/۸۵۲۰	۰/۰۰۷۸	۰/۰۳۲۱
	C-A	۱۲۰	۵	-۲/۹۹۶۴	-۵/۱۴۸۱	۰/۰۱۹۳	۰/۲۲۷۴
	ABC	۱۲۰	۷				
خطاهای داخلی سمت ترمینال اولیه	A-G	۱۲۰	۵	-۵/۹۰۵۴	-۵/۱۲۵۱	۸۴۷۰/۳	۰/۵۸۶۲
		۱۲۰	۱	-۸/۵۷۹۸	-۲/۸۶۴۴	-۲/۹۸۳۱	۲۴/۰۴۵۴
		۱۲۰	۰	۴/۹۵۷۴	-۶/۹۶۷۹	۶/۳۱۲۱	-۲۳/۶۴۲۶
	B-C	۱۲۰	۱	-۲/۶۵۳۰	-۱/۰۵۵۴	۲/۲۰۲۱	۰/۸۵۶۲
		۱۲۰	۰	-۶/۹۲۰۹	-۲/۰۶۷۶	۳/۱۶۳۴	۲۴/۴۷۵۷
		۱۲۰	۱۰	۶/۲۲۸۸	-۱/۰۹۲۹	۱/۲۷۴۶	-۲۸/۲۲۴۲
	C-G	۱۲۰	۰	-۲/۴۹۹۹	۱/۷۲۹۵	۱/۹۳۰۷	۰/۰۹۰۱
		۱۲۰	۵	۲/۳۳۵۶	-۲/۴۰۴۳	۴/۶۷۱۱	۲۸/۰۸۱۷
		۱۲۰	۱۰	-۱/۰۸۵۲	۱/۱۰۸۸	۳/۲۲۶۷	-۲۴/۰۱۷۵
	ABC	۱۲۰	۱	۲/۰۸۵۶	-۲/۱۳۳۰	۳/۶۰۲۴	-۱/۴۹۹۸
		۱۲۰	۰	۳/۰۳۳۶	-۴/۴۵۵۶	۱/۸۰۵۸	-۱/۷۴۵۱
		۱۲۰	۱	۱/۹۹۰۸	۸/۲۰۰۳	-۱/۵۱۶۸	-۲۴/۲۶۹۲
خطاهای داخلی سمت ترمینال ثانویه	B-G	۱۲۰	۱	۸/۶۶۸۱	-۱/۳۲۱۰	-۱/۶۱۱۰	۰/۵۸۴۰
		۱۲۰	۱۰	-۱/۶۴۴۳	-۳/۳۳۷۳	۷/۱۵۸۷	۲۵/۶۲۰۸
		۱۲۰	۵	-۴/۶۸۶۳	-۴/۳۷۲۴	۸/۳۱۷۹	-۲۳/۵۲۹۱
	AB-G	۱۲۰	۱	۱/۱۶۴۸	-۴/۰۹۵۱	-۴/۲۹۶۷	-۱/۰۸۲۵
		۱۲۰	۰	-۴/۳۶۸۱	۱/۱۵۷۵	-۵/۷۸۰۴	-۲۶/۳۸۳۰
		۱۲۰	۵	۴/۱۴۹۷	-۴/۹۸۶۹	۴/۸۸۵۰	-۲۵/۹۵۹۵
جریان هجومی	A	۱۲۰	۰	۳/۰۴۹۶	-۲/۳۱۲۰	-۱/۹۳۴۶	-۱۹/۱۲۵۸
		۱۲۰	۱	۲/۲۶۱۸	-۱/۹۴۹۹	-۱/۳۲۳۵	-۲۸/۲۶۲۹
	C	۹۰	۵	-۲/۷۴۶۲	-۶/۳۶۰۷	۷/۹۳۸۹	-۰/۱۷۱۵
		۹۰	۱۰	۱/۷۴۸۱	-۶/۲۵۴۱	۶/۴۷۷۵	-۰/۳۶۹۸
	A	۹۰	۵	۱/۰۵۳۲	-۵/۶۳۸۷	۷/۵۸۲۱	۰/۰۰۱۴
		۱۳۵	۵	۱/۱۴۹۱	-۵/۴۷۳۶	۸/۹۶۱۴	۰/۶۹۷۳
خطاهای داخلی سمت ترمینال اولیه و جریان هجومی به صورت هم‌زمان	A-G	۱۲۰	۱۰	-۳/۱۵۸۲	۲/۹۹۴۷	۵/۰۹۶۹	-۱۹/۰۶۷۵
		۱۲۰	۱	-۱۹/۰۶۷۵	۵/۴۲۲۶	۴/۹۷۳۸	-۴۹/۸۳۹۶
		۱۲۰	۰	-۶/۸۵۴۲	۴/۴۳۹۵	۴/۵۶۵۱	-۰/۱۷۷۶
	ABC	۱۲۰	۰	-۹/۵۷۶۳	۱/۳۴۰۳	۱/۳۴۰۳	-۷/۸۴۸۱
		۱۲۰	۱	-۹/۵۷۳۴	۶/۴۶۲۲	۶/۵۷۳۶	۵/۴۵۵۴
		۱۲۰	۱	-۳/۶۵۴۵	۸/۶۱۶۳	-۱/۳۴۰۳	۷/۳۰۲۵
خطای داخلی سمت ترمینال ثانویه و جریان هجومی به صورت هم‌زمان	A-G	۱۲۰	۱۰	-۶/۱۶۶۰	-۵/۲۹۵۵	-۳/۷۳۹۷	-۱۹/۰۶۲۹
		۱۲۰	۱	-۸/۰۹۵۵	-۸/۴۷۶۷	۳/۸۳۴۷	۲۸/۱۳۳۹
		۱۲۰	۵	-۲/۱۰۷۱	۱/۱۲۰۲	-۳/۳۳۲۵	-۰/۱۷۰۹
	AB-G	۱۲۰	۱	-۸/۴۱۸۰	۲/۵۵۶۴	۱/۲۸۵۵	-۲۲/۱۴۶۱
		۱۲۰	۰	۱/۶۰۶۹	۱/۳۸۷۸	-۸/۷۶۶۹	۳۰/۶۱۷۵
		۱۲۰	۵	۶/۵۰۰۶	۳/۰۳۱۲	-۱/۰۰۹۸	-۰/۴۰۹۷

سرعت تشخیص خطا پس از اجرای الگوریتم در نرم افزار MATLAB، ۹۰ میلی ثانیه است. با توجه به استاندارد IEEE C37.91-2008 [۲۱]، و همچنین مطابق نظام نامه تست دوره‌ای سیستم‌های حفاظتی شبکه انتقال برق ایران (پاییز ۱۳۹۹)، مدت زمان تشخیص خطا در ترانسفورماتورهای قدرت باید زیر ۱۰۰ میلی ثانیه باشد. در نتیجه، سرعت الگوریتم حفاظتی پیشنهادی جهت تشخیص خطاها از پیشامدهای مختلف در این تحقیق، کاملاً قابل قبول و رضایت بخش است.

با توجه به استفاده از روش‌های داده کاوی و پردازش سیگنال و بکاربردن تبدیلات هوشمند از جمله MODWT و همچنین، با وجود تکنولوژی پیشرفته در رله‌های حفاظتی از جمله رله دیفرانسیل نیومریک مدل 7UT512/513 ساخت شرکت زیمنس که قابلیت برنامه نویسی و پیاده سازی انواع الگوریتم‌های پیچیده حفاظتی را با سرعت و دقت بسیار بالا دارند، و همچنین هوشمندسازی سیستم قدرت و استفاده از روش‌های اتوماسیون در پست‌های DCS، استفاده و پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی در این مقاله جهت تشخیص آنلاین خطاها به راحتی قابل اجرا می‌باشد.

نتایج این شاخص‌ها می‌تواند در هنگام تنظیم رله‌های دیفرانسیل دیجیتالی و نیومریک ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار گیرد که نیاز به تحقیقات و مطالعات گسترده‌تری در این خصوص دارد و به‌عنوان یکی از پیشنهادها کارهای آتی در حوزه صنعت می‌توان لحاظ نمود.

## ۶- نتیجه‌گیری

این مقاله بر روی تمایز خطاهای فرا-مرزی، خطاهای الکتریکی در ترمینال‌های فشارقوی، خطاهای خارجی و جریان هجومی ترانسفورماتورها براساس محاسبه ضرایب انرژی تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی در سطوح مختلف انرژی به‌عنوان مهم‌ترین نوآوری مقاله تمرکز می‌کند. تشخیص و تمایز خطاهای فرا-مرزی از سایر پیشامدها، از مهمترین چالش‌هایی است که امروزه مهندسان حفاظت با آن روبرو هستند؛ لذا بررسی و بهبود عملکرد حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورها در هنگام وقوع این نوع خطاها از اولویت‌های ضروری در حفاظت می‌باشد.

در این روش پیشنهادی، ابتدا جریان‌های دیفرانسیل در پیشامدهای مختلف در نرم افزار EMTP نمونه برداری و استخراج گردید. سپس، ویژگی‌های برتر جریان‌های نمونه برداری شده توسط تبدیل موجک گسسته حداکثر همپوشانی با تابع موجک مادر دابچی ۴ در چهار سطح مختلف استخراج و شاخص‌های میانگین مجموع هر سطح در نرم افزار MATLAB محاسبه گردید.

نتایج حاصل از محاسبات ضرایب مختلف صورت گرفته در چهار سطح نشان داد که مقادیر ضرایب موجود در سطح ۳ کمترین همپوشانی را با سایر پیشامدها جهت تمایز خطاهای فرا-مرزی، ضرایب سطح ۱ دارای کمترین همپوشانی برای تشخیص همزمان خطاهای داخلی و پدیده جریان هجومی و مقادیر ضرایب موجود در سطح ۲ دارای کمترین همپوشانی با سایر پیشامدها جهت تمایز خطاهای داخلی و جریان هجومی به صورت مجزا دارند.

دلایل نتایج مناسب اخذ شده توسط تبدیل MODWT در سه سطح از چهار سطح این است که این تبدیل، یک نوع تبدیل غیر قابل تغییر می‌باشد و هرگونه شیفت و تغییر در سیگنال اصلی و شرایط پیش‌بینی نشده از قبیل آفست DC و نویزهای موجود در شبکه، الگوی ضرایب تبدیل موجک را تغییر نخواهد داد. در نهایت، الگوریتم حفاظتی پیشنهادی می‌تواند سبب بهبود عملکرد حفاظت دیفرانسیل و در نتیجه باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت گردد.

## مراجع

- [۱] جهانگیری. حمید، اکبری ازیرانی. اصغر، ورله. پیترا، "بررسی عملکرد پروب‌های UHF در آشکارسازی تخلیه جزئی در ترانسفورماتورهای فشار قوی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک، پائیز ۱۳۹۷، شماره سوم، صفحه ۳۳-۴۳.
- [2] S. Michael, and Z. Djekic, "The impact of current-transformer saturation on transformer differential protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, no. 3, 1278-1287, 2014.
- [3] Zh. Tao, T. Huang, Y. M. Zihang 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, 610-619, 2017.
- [4] M. R. Prado, and F. B. Costa, "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, 789-799, 2017.
- [5] L. Xiangning, H. Weng, and B. Wang. "Identification of cross-country fault of power transformer for fast unblocking of differential protection." *IEEE transactions on power delivery*, Vol. 24, no. 3, 1079-1086, 2009.
- [6] A. V. Anamika Yadav, and A. Y. Abdelaziz, "MODWT-based fault detection and classification scheme for cross-country and evolving faults," *Electric Power Systems Research*, Vol. 175, pp. 1-20, 2019.
- [7] S. Bagheri, Z. Moravej, and G. B. Gharehpetian, "Classification and discrimination among winding mechanical defects, internal and external electrical faults, and inrush current of transformer," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, no. 2, 484-493, 2017.
- [8] S. Lucas, B. L. Souza, H. Costa, R. P. Medeiros, V. S. Orivaldo, and F. B. Costa, "A Power Transformer Event Classification Technique Based on Support Vector Machine," In *2020 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, 2020, pp. 1-6.
- [9] M. Jing, and D. Jingyi, "Research on Magnetizing Inrush Current and Fault Identification of Transformer Based on VMD-SVM," In *2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*, Vol. 1, pp. 172-178, 2020.
- [10] A. Behvandi, S. G. Seifossadat, and A. Saffarian, "A new method for discrimination of internal fault from other transient states in power transformer using Clarke's transform and modified hyperbolic S-transform," *Electric Power Systems Research*, Vol. 178, pp. 106023, 2020.
- [11] N. Shahbazi, S. Bagheri, and G. B. Gharehpetian, "Performance Improvement of Transformer Differential Protection during Cross-Country Fault using Hyperbolic S-Transform," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Early Access*, 2021.

- [12] N. Shahbazi, S. Bagheri, and G. B. Gharehpetian, "Identification and classification of cross-country faults in transformers using K-NN and tree-based classifiers," *Electric Power Systems Research*, Vol. 204, pp. 1-14, 2022.
- [13] Y. Mengting, Y. Zhu, J. Li, H. Wei, and P. He, "Research on predicting line loss rate in low voltage distribution network based on gradient boosting decision tree," *Energies*, vol. 12, no. 13, pp. 2522, 2019.
- [14] C. Hu, J. Yan, and C. Wang, "Advanced cyber-physical attack classification with extreme gradient boosting for smart transmission grids," In *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1-5, 2019.
- [15] C. Long, J. Gu, J. Ma, and Zh. Jin, "Probabilistic wind power forecasting approach via instance-based transfer learning embedded gradient boosting decision trees," *Energies*, vol. 12, no. 1, pp. 159, 2019.
- [16] M. Tajdinian, M. Allahbakhshi, A. Bagheri, H. Samet, P. Dehghanian, and P. Malik, "An enhanced sub-cycle statistical algorithm for inrush and fault currents classification in differential protection schemes," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 119, pp. 105939, 2020.
- [17] S. Afrasiabi, M. Afrasiabi, B. Parang, and M. Mohammadi, "Designing a composite deep learning based differential protection scheme of power transformers," *Applied Soft Computing*, vol. 87, pp. 105975, 2020.
- [18] S. H. Murugan, S. P. Simon, P. S. R. Nayak, K. Sundareswaran, and N. P. Padhy, "Power transformer protection using chirplet transform," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, no. 10, pp. 2520-2530, 2016.
- [19] S. Bagheri, Z. Moravej, and G. B. Gharehpetian, "Effect of transformer winding mechanical defects, internal and external electrical faults and inrush currents on performance of differential protection," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, no. 10, pp. 2508-2520, 2017.
- [20] S. A. Govar, and H. Seyedi, "Adaptive CWT-based transmission line differential protection scheme considering cross-country faults and CT saturation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 9, pp. 2035-2041, 2016.
- [21] IEEE Guide for Protecting Power Transformers, IEEE Standard C37.91™-30 May 2008 (Revision of IEEE Std C37.91-2000).