



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

An Adaptive Method for Detecting the Faults During Power Swing in Distance Relays Based on Short Fourier Transform

A1*, A2

Department of Electrical Engineering, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13

Revised: 2022-05-12

Accepted: 2022-10-19

Keywords:

Distance relay;

Power swing;

Adaptive short Fourier transform;

Frequency spectrum;

Fault detection.

ABSTRACT

In this paper, a novel method based on the Adaptive Short-Time Fourier Transform (ASTFT) is proposed for reliable detection of faults under power swing conditions. The core of this approach lies in analyzing the frequency content of current signals and calculating their spectral energy. The innovation of the proposed algorithm is its dynamic adaptation of the time-frequency analysis window width: under normal and power swing conditions, a wider window is used to achieve high frequency resolution, while at the moment of fault occurrence, a narrower window is employed to enhance time resolution and enable faster detection. This adaptive mechanism is governed by estimating the instantaneous frequency of the signal and calculating its local stationarity length. To evaluate the proposed method, simulations were conducted in PSCAD/EMTDC and MATLAB environments on a standard power system network. Results demonstrate that ASTFT can detect symmetrical and asymmetric faults during power swings regardless of swing frequency (ranging from 0.5 to 5 Hz), fault location, fault resistance, or fault initiation time. Notably, the detection time of ASTFT is on average 15% faster than the classical STFT method (less than 20 milliseconds), and it maintains robust performance even in the presence of disturbances. Due to its high speed, accuracy, and insensitivity to varying network conditions, ASTFT offers a practical and effective solution for enhancing the reliability of distance relays in modern power systems.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address:

How to cite this article:

روشی تطبیقی برای تشخیص خطای حین نوسان توان در رله‌های دیستانس بر مبنای تبدیل فوریه کوتاه

نام*، نام ۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰	تشخیص خطا در حین نوسان توان، یکی از چالش‌های مهم در عملکرد رله‌های دیستانس به‌شمار می‌رود. در این مقاله، یک روش نوین مبتنی بر تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه تطبیقی (Adaptive Short-Time Fourier Transform - ASTFT) برای تشخیص قابل‌اعتماد خطا در شرایط نوسان توان ارائه شده است. اساس این روش، تحلیل محتوای فرکانسی سیگنال جریان و محاسبه‌ی انرژی طیف آن است. نوآوری الگوریتم پیشنهادی در تطبیق پویای عرض پنجره‌ی تحلیل زمانی-فرکانسی نهفته است؛ به‌گونه‌ای که در شرایط عادی و نوسان توان، برای دستیابی به رزولوشن فرکانسی بالا از پنجره‌ای عریض‌تر، و در لحظه‌ی وقوع خطا، برای دستیابی به رزولوشن زمانی بالا و تشخیص سریع‌تر، از پنجره‌ای باریک‌تر استفاده می‌شود. معیار این تطبیق، بر پایه‌ی تخمین فرکانس لحظه‌ای سیگنال و محاسبه‌ی طول ایستایی محلی آن استوار است. برای ارزیابی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی در محیط‌های PSCAD/EMTDC و MATLAB بر روی یک شبکه‌ی قدرت استاندارد انجام گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که روش ASTFT قادر است خطاهای متقارن و نامتقارن را در طول نوسان توان، مستقل از فرکانس نوسان (در محدوده‌ی ۵ تا ۵۰ هرتز)، مکان وقوع خطا، مقدار مقاومت خطا و زمان شروع آن، به‌درستی تشخیص دهد. نکته‌ی مهم‌تر آن‌که، زمان تشخیص این روش در مقایسه با روش کلاسیک STFT به‌طور میانگین ۱۵ درصد سریع‌تر (کم‌تر از ۲۰ میلی‌ثانیه) بوده و در مواجهه با پدیده‌های اغتشاشی، عملکرد نادرستی ندارد. به‌دلیل سرعت بالا، دقت مناسب و عدم حساسیت به شرایط مختلف شبکه، این روش یک راه‌حل عملی و مؤثر برای افزایش قابلیت اطمینان رله‌های دیستانس در سیستم‌های قدرت مدرن ارائه می‌دهد.
واژگان کلیدی: رله‌ی دیستانس، نوسان توان، تبدیل فوریه‌ی زمان-کوتاه تطبیقی (ASTFT)، تشخیص خطا، طیف فرکانسی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه^۱

تغییرات قابل‌توجهی در امپدانس شبکه شوند. چنین تغییراتی می‌توانند منجر به عملکرد نادرست رله‌های دیستانس شده و در نهایت، طبقه‌بندی اشتباه خطاها و قطع ناخواسته شبکه را به‌دنبال داشته باشند. رفع این چالش‌ها مستلزم بهره‌گیری از روش‌های تطبیقی پیشرفته‌ای است که توانایی تشخیص دقیق خطاهای متقارن از نوسانات توان

تشخیص نوسانات توان نقش حیاتی در حفظ پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت مدرن ایفا می‌کند. این نوسانات ممکن است به‌دلیل تغییرات ناگهانی بار، خروج ژنراتورها از مدار یا وقوع خطاهای شدید رخ دهند و موجب

* پست الکترونیک نویسنده مسئول:

۱. دانشکده مهندسی برق، ایران

تکنیک‌های ماشین بردار پشتیبان، روشی برای تشخیص نوسانات توان پیشنهاد شده است. همچنین در [۱۳] با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی و داده‌های PMU، روشی مؤثر برای شناسایی خطاهای خطوط انتقال معرفی شده است.

دسته‌ی پنجم، روش‌های تحلیل فازور و پردازش سیگنال ریاضی هستند. در [۱۴] ویژگی‌های فازور فرکانس پایه برای تشخیص خطا در شرایط نوسان توان پیشنهاد شده‌اند. در [۱۵] نیز روش میانگین‌گیری پنجره‌ی متحرک برای اعمال بر سیگنال‌های جریان در راستای بهبود تشخیص نوسان توان معرفی شده است. در [۱۶] از فیلترهای ریخت‌شناسی ریاضی برای بهبود شناسایی نوسانات توان استفاده شده است.

گروه بعدی، روش‌های مبتنی بر نظریه‌ی آشوب و پردازش‌های پیشرفته هستند. در این راستا، در [۱۷] یک روش مبتنی بر نظریه‌ی آشوب برای تشخیص نوسانات توان ارائه شده که دقت بالایی دارد. نویسندگان در مرجع [۱۸] نیز از سنجش فشرده برای جلوگیری از عملکرد نادرست رله‌های دیستانس در شرایط نوسان توان استفاده کرده‌اند. دسته‌ی هفتم، روش‌های تطبیقی برای بهبود عملکرد رله‌های دیستانس هستند. در [۱۹] اصول بنیادی حفاظت تطبیقی برای مقاوم‌سازی رله‌های دیستانس در برابر نوسان توان پیشنهاد شده‌اند. در [۲۰] عملکرد این رله‌ها در شناسایی خطاهای متقارن در شرایط نوسان توان بررسی شده و در [۲۱] یک الگوریتم جدید برای تشخیص سریع واکنش به ناپایداری زاویه‌ای ارائه شده است.

مطالعات اخیر به بررسی روش‌های نوین برای بهبود عملکرد حفاظتی سیستم‌های قدرت پرداخته‌اند. در [۲۲] پیشرفت‌های جدید در حفاظت خطوط انتقال بررسی شده‌اند و در [۲۳] یک روش بهبودیافته برای حفاظت تفاضلی ترانسفورماتور ارائه شده است. در [۲۴] نیز روشی جدید برای افزایش دقت عملکرد رله‌های دیستانس در شرایط نوسان توان توسعه داده شده است.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که روش‌های پردازش سیگنال، یادگیری ماشین، تحلیل فازور و روش‌های تطبیقی نقش مهمی در بهبود قابلیت تشخیص خطاهای متقارن ایفا کرده‌اند. و هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته، چالش‌های موجود در این حوزه عبارتند از:

را داشته باشند. از جمله این روش‌ها، می‌توان به تحلیل سیگنال و بررسی ویژگی‌های موجی اشاره کرد.

مطالعات متعددی بر پایه تحلیل ویژگی‌های موجی و تغییرات سیگنال جریان برای تشخیص خطاهای متقارن در شرایط نوسان توان انجام شده‌اند. به‌عنوان نمونه، در مرجع [۱] نشان داده شده است که عدم تقارن موجی در سیگنال جریان می‌تواند ابزار مؤثری برای تفکیک نوسان توان از وقوع خطای واقعی باشد. در مرجع [۲] نیز روش‌های مختلف پردازش موجک برای بهبود تشخیص نوسان توان پیشنهاد شده‌اند. الگوریتمی سریع مبتنی بر موجک در [۳] ارائه شده که قادر به تفکیک نوسان توان از خطاهای متقارن است. همچنین در [۴] از روش موجک برای شناسایی دقیق خطاهای متقارن در شرایط نوسان توان استفاده شده است. دسته‌ی دوم، روش‌های مبتنی بر تحلیل فرکانس لحظه‌ای و دامنه‌ی جریان هستند. در [۵] یک روش مبتنی بر فرکانس لحظه‌ای برای تشخیص خطاهای متقارن هم‌زمان با نوسان توان ارائه شده که سرعت بالای تشخیص از مزایای اصلی آن محسوب می‌شود. در [۶] نشان داده شده است که مقدار مؤثر جریان می‌تواند به‌عنوان معیاری مناسب برای تشخیص نوسان توان مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در [۷] یک روش جدید برای تشخیص خطا صرفاً بر اساس جریان معرفی شده که از دقت و سرعت بالایی برخوردار است.

دسته‌ی سوم، روش‌های مبتنی بر شاخص‌های آماری و ویژگی‌های دینامیکی سیستم هستند. برخی پژوهش‌ها از شاخص‌های آماری برای افزایش دقت تشخیص بهره گرفته‌اند. در [۸] شاخص‌های کوواریانس برای تشخیص و طبقه‌بندی خطاها در شرایط نوسان توان معرفی شده‌اند. در [۹] نیز واریانس داده‌های نمونه‌برداری‌شده‌ی جریان برای جلوگیری از عملکرد نادرست رله‌های دیستانس به‌کار گرفته شده است. همچنین در [۱۰] نرخ تغییر مقدار میانگین توان ظاهری به‌عنوان معیاری جدید برای تشخیص نوسانات توان معرفی شده است.

دسته‌ی چهارم، مدل‌های هوشمند و یادگیری ماشین هستند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین می‌توانند دقت تشخیص را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند. در مرجع [۱۱] یک مدل داده‌کاوی تطبیقی برای بهبود حفاظت دیستانس در شرایط نوسان توان توسعه داده شده است. در [۱۲] با استفاده از

$$CWT_x^{\psi}(\tau, s) = \Psi_x^{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

که در آن τ و s به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس می‌باشند. مفهوم انتقال دقیقاً مشابه با مفهوم انتقال زمانی در تبدیل فوریه زمان کوتاه است که میزان جابجایی پنجره را معلوم می‌کند و اطلاعات زمانی تبدیل را دربردارد. اما برخلاف تبدیل فوریه زمان کوتاه، در تبدیل موجک پارامتر فرکانس به‌طور مستقیم وجود ندارد. در عوض، پارامتر مقیاس وجود دارد که به‌طور معکوس با فرکانس ارتباط دارد (به عبارت دیگر $s = 1/f$). در رابطه بالا، ψ تابع پنجره است که اصطلاحاً موجک مادر نامیده می‌شود. دلیل استفاده از لغت "مادر" این است که تمامی نسخه‌های انتقال یافته و مقیاس شده، همگی از روی یک تابع اولیه به دست می‌آیند. به بیان علمی، موجک مادر، یک تابع الگو جهت تولید سایر پنجره‌ها می‌باشد.

۲-۱- رزولوشن در صفحه زمان-فرکانس

رزولوشن عامل اصلی روی آوردن از تبدیل فوریه زمان کوتاه به تبدیل موجک است. شکل ۱ توصیف‌های مختلف رزولوشن در صفحات زمان، فرکانس و زمان-فرکانس را برای تبدیل‌های مختلف نشان می‌دهد. هر باکس متناظر با یک محدوده در صفحه‌ی مربوطه می‌باشد. در صفحات زمان-فرکانس، هر باکس یک مساحت غیرصفر دارد که بیان‌کننده‌ی این است که مقدار دقیق یک نقطه در صفحه‌ی زمان-فرکانس قابل دانستن نیست. به عبارت دیگر، تمام نقاطی که در صفحه‌ی زمان-فرکانس در یک باکس قرار می‌گیرند، توسط یک مقدار تبدیل متناظر (موجک یا فوریه زمان کوتاه) توصیف می‌گردند. شکل ۱ نشان می‌دهد که به واسطه‌ی ثابت بودن پنجره در تبدیل فوریه زمان کوتاه، رزولوشن ایجاد شده در همه‌جای صفحه‌ی زمان-فرکانس ثابت است. حال آن‌که در تبدیل موجک، طول و عرض باکس‌های مستطیلی که در حقیقت همان‌های رزولوشن می‌باشند، تغییر می‌کند اما همچنان مساحت آن‌ها ثابت می‌ماند. به بیان دیگر، هر باکس نشان‌دهنده‌ی یک بخش یکسان از صفحه‌ی زمان-فرکانس است که البته در جاهای مختلف، به زمان و فرکانس سهم متفاوتی اختصاص یافته است.

• عدم دقت کافی در تفکیک خطا از نوسان

توان: بسیاری از روش‌های موجود در شرایط عملیاتی پیچیده، به‌ویژه در حضور بارهای متغیر و منابع تولید پراکنده، عملکرد قابل‌اعتمادی ندارند.

• زمان پاسخ‌گویی بالا در برخی الگوریتم‌های

هوشمند: روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین نیازمند پردازش‌های سنگین و پایگاه داده‌های آموزشی گسترده هستند که ممکن است باعث افزایش زمان پاسخ‌گویی شوند.

• حساسیت به شرایط شبکه: برخی روش‌های

مبتنی بر تحلیل امپدانس یا نرخ تغییرات جریان، تحت تأثیر شرایط شبکه قرار گرفته و دقت آن‌ها کاهش می‌یابد.

• نیاز به روش‌های پردازش سیگنال پیشرفته:

بسیاری از مطالعات پیشین پردازش فرکانسی سیگنال را به‌طور کامل بررسی نکرده‌اند، در حالی‌که تکنیک‌هایی مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) می‌توانند بینش بهتری نسبت به رفتار فرکانسی سیگنال‌های شبکه ارائه دهند.

این مقاله در راستای رفع این چالش‌ها، از تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) به عنوان یک روش پردازش سیگنال تطبیقی بهره می‌گیرد که قادر است در زمان کوتاه، ویژگی‌های فرکانسی لحظه‌ای را استخراج کرده و دقت بالایی در تفکیک نوسان توان از خطاهای واقعی ارائه دهد. نوآوری این پژوهش در ارائه‌ی یک ساختار تطبیقی جدید برای پردازش سیگنال‌های حفاظتی و بهبود قابلیت تشخیص رله‌های دیستانس نهفته است.

۲- محتوای فرکانسی سیگنال‌ها

در آنالیز موجک و تبدیل فوریه زمان کوتاه، سیگنال موردنظر در یک تابع ضرب می‌شود که در حقیقت نقش همان تابع پنجره را دارد. تبدیل موجک نیز به‌طور جداگانه بر روی قطعه‌های زمانی مختلف سیگنال انجام می‌شود. تبدیل موجک پیوسته به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌گردد [۲۵]:

رزولوشن زمانی بالا قادر به تشخیص دقیق فرکانس‌ها در نقاط زمانی مختلف خواهد بود. به عبارت دیگر، تأخیر پنجره‌ها برای هماهنگی معقول بین رزولوشن زمانی و فرکانسی وابسته به وضعیت قبلی سیگنال می‌باشد. در روشی که در ادامه به طور کامل به تشریح آن پرداخته خواهد شد، عرض پنجره‌ها برابر طول ایستایی محلی سیگنال است. این طول ایستایی محلی توسط شیب فرکانس لحظه‌ای سیگنال تعیین می‌شود که خود فرکانس لحظه‌ای نیز از لبه‌ی تبدیل موجک استخراج می‌گردد [۲۶].

۲-۳- معیار تطبیقی نمودن تبدیل فوریه زمان کوتاه
رابطه‌ی تبدیل فوریه زمان کوتاه به صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

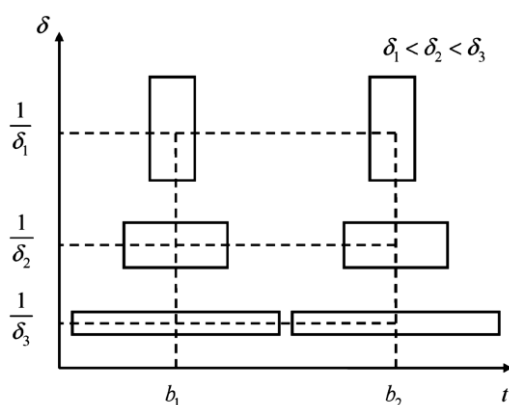
$$STFT_{\delta}^b(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) G_{\delta}^b(t) dt \quad (2)$$

که در آن:

$$G_{\delta}^b(t) = |\delta|^{-1} g\left(\frac{t-b}{\delta}\right), \delta > 0 \quad (3)$$

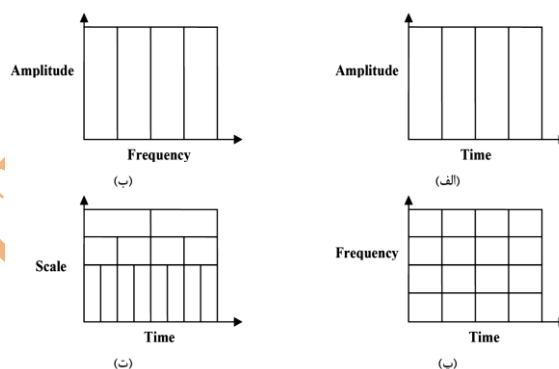
$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (4)$$

چنانچه $g(t)$ شالوده‌ی پنجره‌ی گوسی پایه باشد، پارامتر δ بیان‌کننده‌ی پهنای پنجره و b محل مرکز پنجره‌ی گوسی خواهد بود. رابطه‌ی بین پهنای پنجره‌ی زمانی و فرکانسی که توسط اصل عدم قطعیت هایزنبرگ محدود شده، در شکل ۲ نشان داده شده است. طبق این اصل، افزایش رزولوشن فرکانسی باعث کاهش رزولوشن زمانی می‌شود و بالعکس.



شکل ۲- پنجره زمان-فرکانس تابع گوسی

در مقیاس‌های بالا (فرکانس‌های پایین)، ارتفاع باکس‌ها کوتاه‌تر است که متناظر با رزولوشن فرکانسی بهتر است و عرض باکس‌ها بزرگ‌تر است که بیان‌کننده‌ی رزولوشن زمانی ضعیف می‌باشد. در نقطه‌ی مقابل، در مقیاس‌های پایین (فرکانس‌های بالا)، عرض باکس‌ها کاهش یافته تا رزولوشن زمانی بهبود یابد و در عوض ارتفاع آن‌ها افزایش می‌یابد تا در جایی که نیاز نیست، رزولوشن پایین بیاید. شایان ذکر است که مساحت باکس‌ها به نامساوی هایزنبرگ مربوط می‌شود و بستگی به نوع موجک مادر به کار رفته دارد. می‌توان نشان داد که فارغ از این که موجک مادر به کار رفته چه باشد، کران پایین مساحت باکس‌ها به عدد $(\pi/4)$ محدود می‌شود، چرا که بر اساس اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، نمی‌توان عرض باکس‌ها را تا جای ممکن کم کرد.



شکل ۱- نمایش رزولوشن در صفحات مختلف. (الف) صفحه‌ی زمان، (ب) صفحه‌ی فرکانس، (پ) صفحه‌ی زمان-فرکانس در تبدیل فوریه زمان-کوتاه (ت) صفحه‌ی زمان-فرکانس در تبدیل موجک

۲-۲- تبدیل فوریه زمان کوتاه تطبیقی

روش‌های مختلفی برای آنالیز زمان-فرکانسی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل موجک و تبدیل S می‌باشند. از آنجایی که عرض پنجره‌ها در تبدیل فوریه زمان کوتاه ثابت است، بنابراین رزولوشن زمان-فرکانسی ضعیف خواهد بود. در تبدیل موجک نیز، نقش تأخیر پنجره‌ها وابسته به سیگنال نمی‌باشد؛ بنابراین رزولوشن زمان-فرکانسی خوبی نخواهد داشت. در تبدیل S نیز شرایط مشابهی برقرار است. برای دستیابی به هماهنگی معقول بین رزولوشن زمانی و فرکانسی، استفاده از پنجره‌ی عریض در نواحی با تغییرات نرم فرکانس لحظه‌ای و پنجره‌ی باریک در نواحی با تغییرات تند فرکانس لحظه‌ای پیشنهاد می‌شود. پنجره‌ی زمانی با عرض کمتر و

دقت الگوریتم در تفکیک نوسان توان از خطاهای واقعی می‌شود.

برای پیاده‌سازی الگوریتم در محیط گسسته، روابط فوق باید بازنویسی شوند. رابطه‌ی (۷) برای سیگنال گسسته با بازه‌ی نمونه‌برداری زمانی Δt به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla f_{inst}[k] = \frac{f_{ins}[k+1] - f_{ins}[k]}{\Delta t} \quad (11)$$

که در آن $\nabla f_{inst}[k]$ ، شیب فرکانس لحظه‌ای در نمونه‌ی k ام و N تعداد نمونه‌های متناظر با طول ایستایی محلی است. طول ایستایی محلی سیگنال گسسته نیز با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) حاصل خواهد شد:

$$\sum_{k-m}^{k+m} f_{ins}[k+m] - f_{ins}[k-m] \leq \sigma \quad (12)$$

در نهایت طول ایستایی محلی سیگنال در نقطه‌ی زمانی k به صورت رابطه‌ی (۱۳) به‌دست خواهد آمد:

$$L_k = 2m\Delta t \quad (13)$$

۳- الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله، از ویژگی تغییرات مؤلفه‌ی فرکانسی جریان در شرایط مختلف برای تشخیص خطا در حین نوسان توان استفاده شده است. ایده‌ی اصلی الگوریتم بر پایه‌ی تحلیل انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان در طول زمان بنا شده است. روش کار به این صورت است که انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود. از آنجایی که در لحظه‌ی وقوع خطا، مؤلفه‌های فرکانس بالا در سیگنال جریان افزایش می‌یابند، انرژی طیف فرکانسی در آن لحظه به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر زمان‌ها خواهد بود. بنابراین، اگر انرژی طیفی محاسبه‌شده از مقدار آستانه‌ی مشخص بیشتر باشد، وقوع خطا تشخیص داده می‌شود؛ در غیر این صورت، رله باید در حالت قفل باقی بماند تا از عملکرد اشتباه جلوگیری شود. روش محاسبه‌ی انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان به این صورت است که ابتدا با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه تطبیقی (ASTFT)، طیف فرکانسی سیگنال جریان در زمان‌های مختلف استخراج می‌شود و سپس با استفاده از رابطه‌ی (۱۴)، انرژی طیف فرکانسی در هر لحظه محاسبه می‌گردد:

$$E = [abs(S(j, n))]^2 \quad (14)$$

$$t_{\omega} = 2\delta\sqrt{2\ln 2} \quad (5)$$

شیب فرکانس لحظه‌ای سیگنال با توجه به رابطه‌ی (۶) به‌دست می‌آید:

$$\nabla f_{inst}(t) = \frac{df_{inst}(t)}{dt} = f'_{inst}(t) \quad (6)$$

برای یک سیگنال پیوسته، رابطه‌ی (۷) برقرار است:

$$\int_{t-l}^{t+l} |f'_{inst}(t)| dt \leq \sigma, \quad l > 0 \quad (7)$$

که در آن $f(t)$ شیب فرکانس لحظه‌ای و σ مقدار آستانه‌ای است که برای حفظ ایستایی محلی سیگنال باید مقدار کوچک (نزدیک صفر) داشته باشد. در این رابطه، شرط ایستایی محلی زمانی برقرار است که تغییرات فرکانس لحظه‌ای در بازه زمانی T به‌اندازه‌ای کوچک باشد که بتوان سیگنال را در آن بازه، شبه‌ایستا در نظر گرفت. مقدار آستانه σ باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که حساسیت الگوریتم در برابر نویز و تغییرات دینامیکی شبکه حفظ شود.

$$L_t = t + l - (t - l) = 2l \quad (8)$$

در رابطه فوق L_t طول ایستایی محلی سیگنال است. پارامتر l نیز ماکزیمم مقداری است که رابطه (۹) را برآورده می‌سازد.

پس از تعیین L_t ، مقدار پهنای پنجره‌ی گوسی تطبیقی در زمان t با استفاده از رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شود:

$$\delta_t = \frac{L_t}{2\sqrt{2\ln 2}} \quad (9)$$

که در آن δ_t پارامتر تأخیر پنجره‌ی گوسی در زمان t است. با جای‌گذاری مقدار تطبیقی δ_t در رابطه‌ی تبدیل فوریه زمان کوتاه، نسخه‌ی تطبیقی آن به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$ASTFT_{\delta_t}^b(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) \exp[-\frac{(t-b)^2}{2\delta_t^2}] dt \quad (10)$$

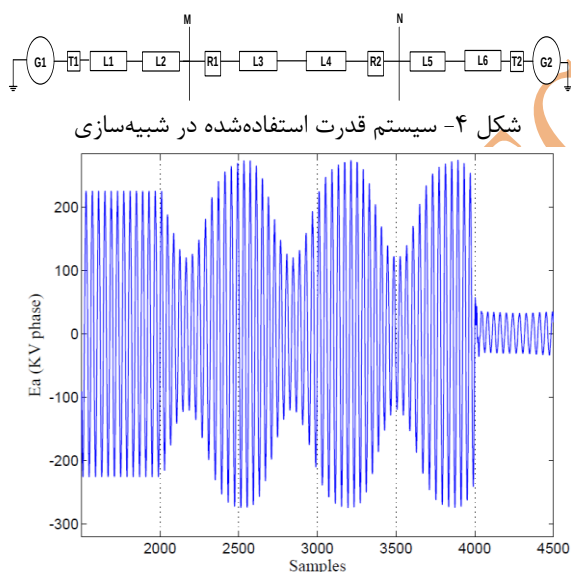
رابطه (۱۰) بیان‌گر تبدیل فوریه زمان کوتاه تطبیقی است که در آن عرض پنجره به‌صورت دینامیکی و وابسته به رفتار فرکانسی سیگنال تنظیم می‌شود. این ویژگی باعث افزایش

این سازوکار تطبیقی در تنظیم پنجره‌ها، موجب افزایش دقت الگوریتم در تفکیک خطا از نوسان توان شده و امکان پیاده‌سازی بلادرنگ آن در تجهیزات حفاظتی را فراهم می‌سازد.

۴- نتایج شبیه سازی

الگوریتم ارائه شده بر روی سیستم قدرت مطابق شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفت. در لحظه‌ی $t = 1$ ثانیه، اتصال کوتاه شماره ۱ رخ می‌دهد و بریکرهای B_3 و B_4 به دلیل خطا باز می‌شوند. در این شرایط، نوسان توان روی خط ۱ که یک خط ۴۰۰ کیلوولت، ۵۰ هرتز به طول ۳۰۰ کیلومتر است، آغاز می‌شود (شکل‌های ۵ و ۶). سپس روی همین خط، یک خطای سه‌فاز متقارن اتفاق می‌افتد. زاویه‌ی روتور قبل از شروع نوسان توان برابر ۷۰ درجه بوده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط PSCAD انجام شده‌اند.

برای اثبات استقلال الگوریتم پیشنهادی از زمان و مکان وقوع خطا، شبیه‌سازی‌ها در زمان‌های مختلف با فاصله‌ی ۲ میلی ثانیه از یکدیگر تکرار شده‌اند.

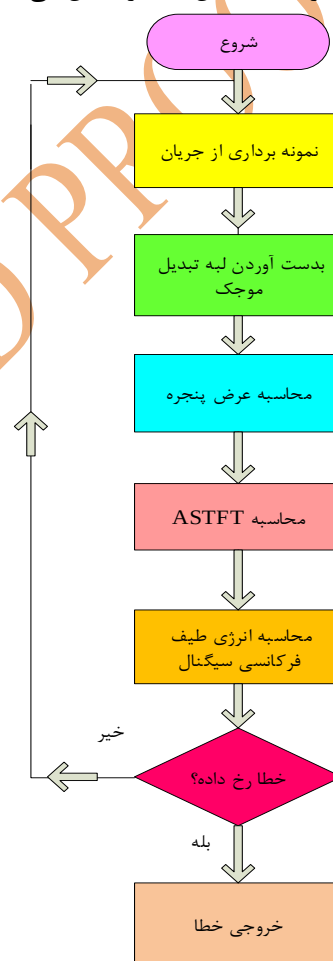


شکل ۴- سیستم قدرت استفاده شده در شبیه سازی

که در این رابطه :

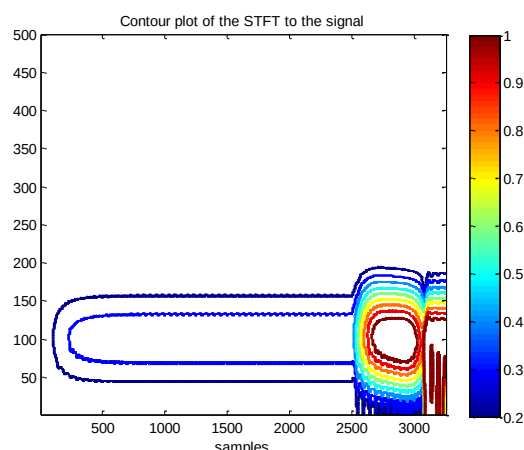
- انرژی طیف فرکانسی سیگنال در لحظه‌ی n ام و
- مقدار تبدیل فوری زمان کوتاه تطبیقی در فرکانس $S(j, n)$ و زمان n می‌باشد.

این معیار انرژی، حساس به حضور مؤلفه‌های فرکانس بالا بوده و در لحظه‌ی وقوع خطا، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. مقدار آستانه‌ی انرژی طیفی (σ) باید به گونه‌ای انتخاب شود که در شرایط نوسان توان یا کلیدزنی بار، موجب تشخیص اشتباه نشود. شکل ۳ فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خطا را نشان می‌دهد.

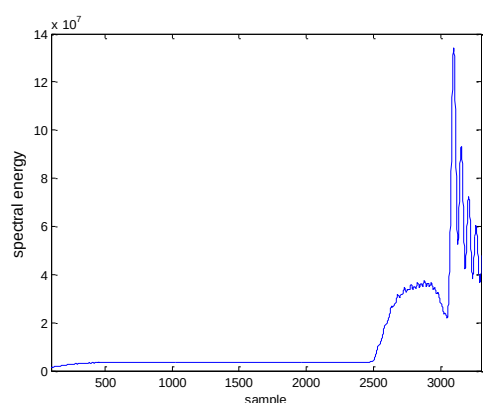


شکل ۳- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خطا

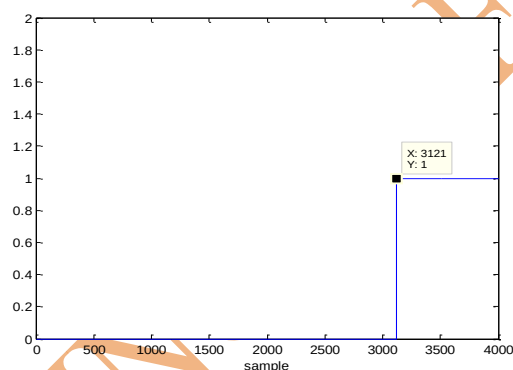
برای دستیابی به رزولوشن فرکانسی بالاتر، عرض پنجره در فرکانس‌های پایین بزرگ‌تر و در فرکانس‌های بالا کوچک‌تر در نظر گرفته می‌شود. این تنظیم تطبیقی موجب می‌شود که در شرایط عادی سیستم و در زمان نوسان توان، پنجره‌ها عریض‌تر باشند تا جزئیات فرکانسی بهتر آشکار شوند. در مقابل، در لحظه‌ی وقوع خطا، عرض پنجره‌ها کاهش می‌یابد تا انرژی مؤلفه‌های فرکانس بالا به درستی شناسایی شود.



شکل ۷- طیف فرکانسی سیگنال جریان برای نوسان توان

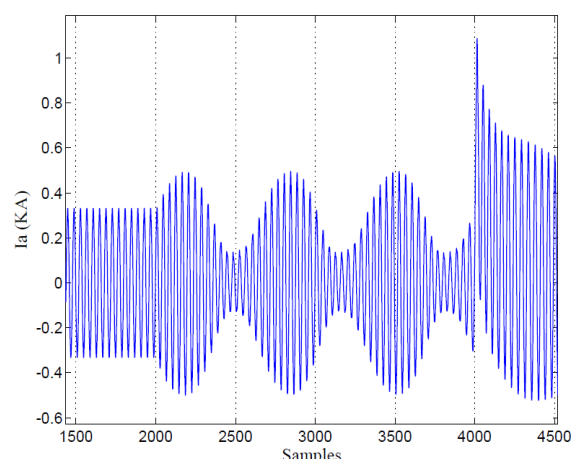


شکل ۸- انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای نوسان توان و خطای سه‌فاز



شکل ۹- زمان تشخیص خطا در حین نوسان توان
هدف از استفاده از تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه تطبیقی به جای تبدیل معمولی، کاهش زمان تشخیص خطا و افزایش دقت در لحظه‌ی وقوع آن است. در تبدیل فوریه تطبیقی، عرض پنجره‌ها متغیر در نظر گرفته می‌شود؛ به گونه‌ای که در زمان وقوع خطا، پنجره باریک‌تر شده و رزولوشن زمانی افزایش می‌یابد. این ویژگی باعث می‌شود که خطا سریع‌تر و دقیق‌تر تشخیص داده شود.

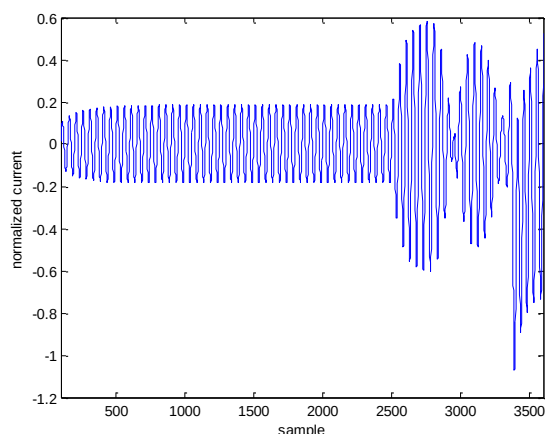
شکل ۵- تغییرات ولتاژ حین نوسان توان



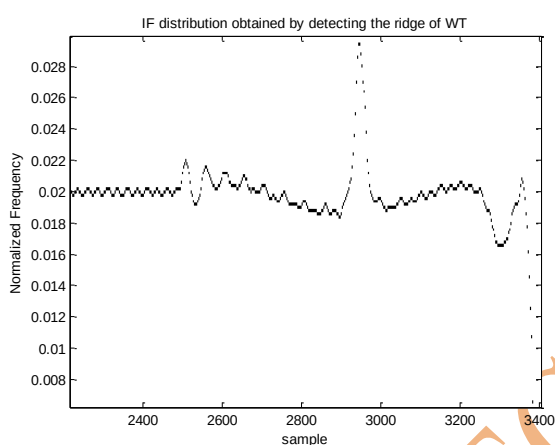
شکل ۶- تغییرات جریان حین نوسان توان

در زمان وقوع نوسان توان، شبکه به دو ناحیه تقسیم می‌شود که با فرکانس‌های f_1 و f_2 به صورت گروهی نوسان می‌کنند. فرکانس نوسانات روی خطوط برابر با $|f_1 - f_2|$ خواهد بود. با توجه به مطالعات انجام شده، فرکانس نوسانات توان در سیستم‌های قدرت امروزی بین ۰.۵ تا ۵ هرتز برآورد می‌شود [۲۱]. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در این محدوده، شبیه‌سازی‌ها برای چندین فرکانس نوسان مختلف و در زمان‌های متفاوت انجام شده‌اند. برای نمونه برداری جریان و ولتاژ، از فاز A استفاده شده و فرکانس نمونه برداری برابر با ۲.۵ کیلوهرتز (۵۰ نمونه در هر سیکل قدرت) در نظر گرفته شده است. همان گونه که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان در شرایط عادی و نوسان توان همواره کمتر از انرژی طیف در لحظه وقوع خطا است. بنابراین، با تعیین مقدار آستانه‌ی مناسب برای انرژی طیف فرکانسی، می‌توان بین خطا و نوسان توان تمایز قائل شد.

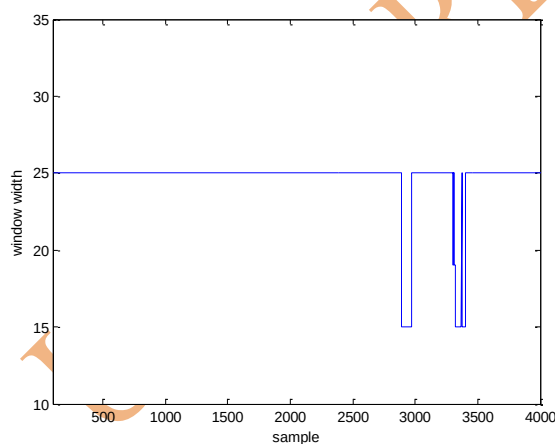
برای تعیین مقدار آستانه، شبیه‌سازی‌ها در شرایط مختلف از جمله فرکانس‌های گوناگون نوسان توان، زمان‌های مختلف وقوع خطا، و مقاومت‌های مختلف خطا انجام شده‌اند. با اعمال مقدار آستانه‌ی بهینه، الگوریتم پیشنهادی توانست خطا را با تأخیری کمتر از ۱.۵ سیکل قدرت تشخیص دهد (شکل ۹).



شکل ۱۲- شکل موج جریان برای نوسان توان با فرکانس نوسان ۳ هرتز در $t=1s$ ($N_s = 2500$) و خطای سه فاز در $t=1.35s$ ($N_s = 3375$)

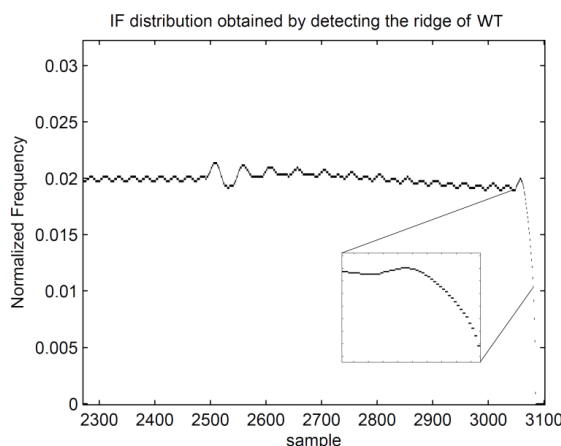


شکل ۱۳- فرکانس لحظه‌ای سیگنال جریان بدست آمده از تبدیل موجک برای حالت دوم

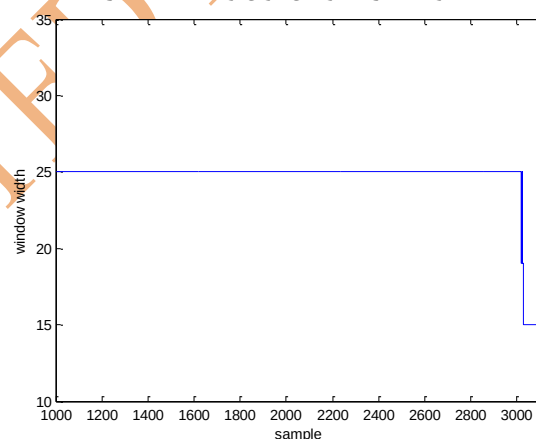


شکل ۱۴- عرض پنجره برای نوسان توان و خطای سه فاز برای حالت دوم

در مقابل، تبدیل فوریه زمان کوتاه معمولی با پنجره‌ی ثابت، رزولوشن فرکانسی بالاتری دارد اما رزولوشن زمانی پایین‌تری دارد، که در کاربردهای حفاظتی مطلوب نیست. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات فرکانس لحظه‌ای و عرض پنجره را برای طیف فرکانسی شکل ۷ نشان می‌دهند.

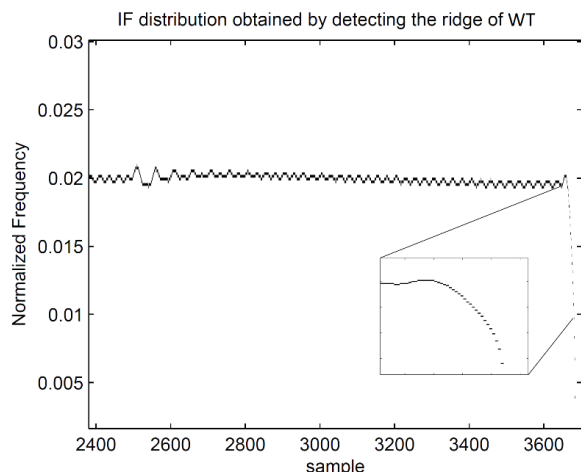


شکل ۱۰- فرکانس لحظه‌ای سیگنال جریان حاصل از تبدیل موجک برای نوسان توان و خطای سه فاز

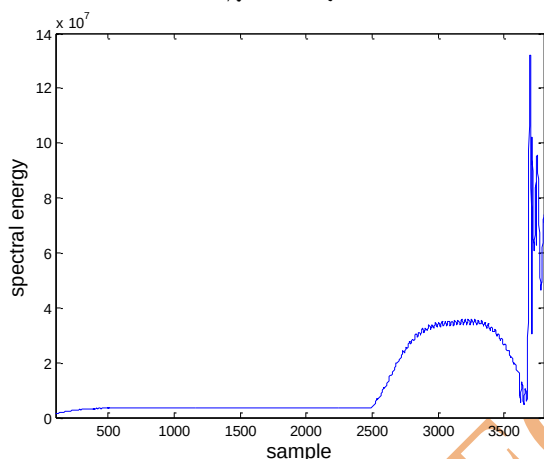


شکل ۱۱- عرض پنجره برای نوسان توان و خطای سه فاز مقایسه‌ی عملکرد روش تطبیقی با روش معمولی نشان می‌دهد که در لحظه‌ی وقوع خطا، انرژی طیف فرکانسی حاصل از STFT بیشتر است، اما زمان تشخیص در ASTFT کمتر و دقیق‌تر است. این تفاوت به دلیل رزولوشن زمانی بالاتر در ASTFT و تنظیم تطبیقی پنجره‌ها در لحظه‌ی وقوع خطا است.

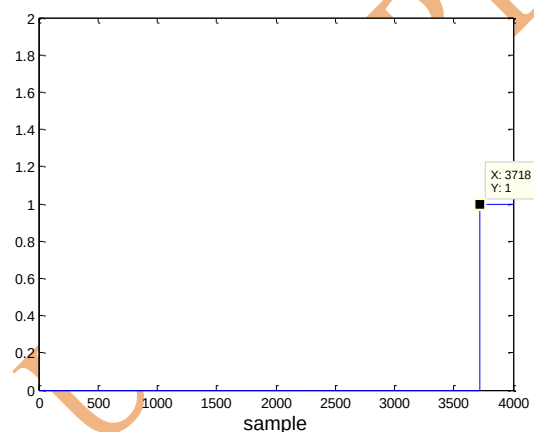
در حالت بعدی فرض می‌شود نوسان توان در $t=1s$ رخ داده و فرکانس نوسان توان ۳ هرتز بوده و خطای سه فاز در $t=1.35s$ رخ دهد. شکل زیر، شکل موج مربوط به جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- فرکانس لحظه‌ای سیگنال جریان بدست آمده از تبدیل موجک برای حالت سوم

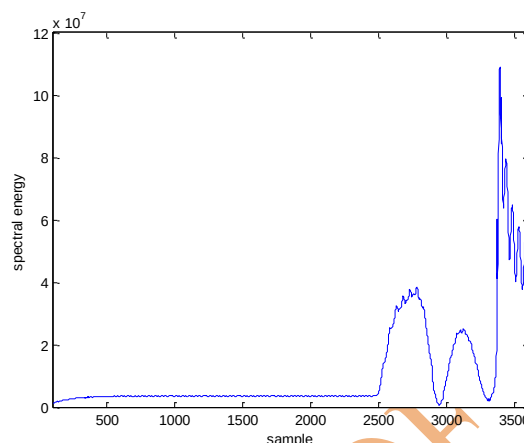


شکل ۱۹- انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای حالت سوم

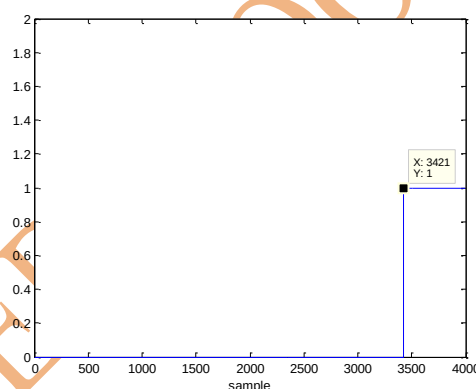


شکل ۲۰- زمان تشخیص خطا برای حالت سوم

این روش توانست خطا را با تأخیر ۴۳ نمونه تشخیص دهد.
حالت چهارم: فرض می‌شود نوسان توان در $t=1S$ رخ داده و فرکانس نوسان توان ۵ هرتز بوده و خطای سه‌فازی در $t=1.4S$ رخ دهد.



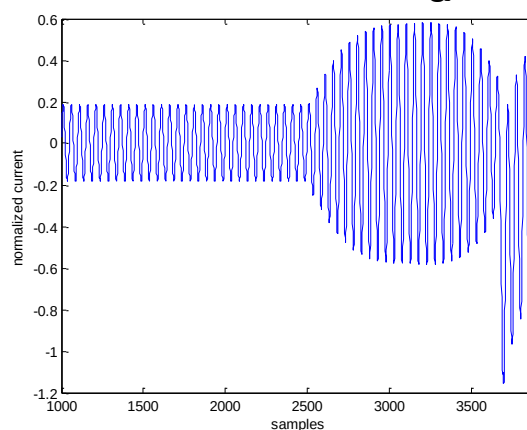
شکل ۱۵- انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای حالت دوم



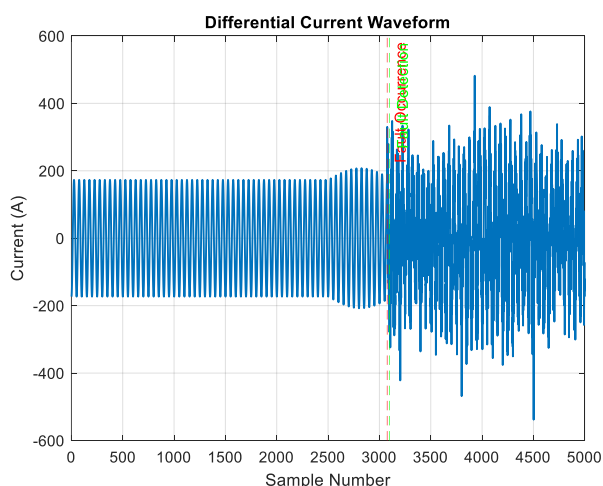
شکل ۱۶- زمان تشخیص خطا برای حالت دوم

این روش توانست خطای رخ داده را با تأخیر ۴۶ نمونه تشخیص دهد.

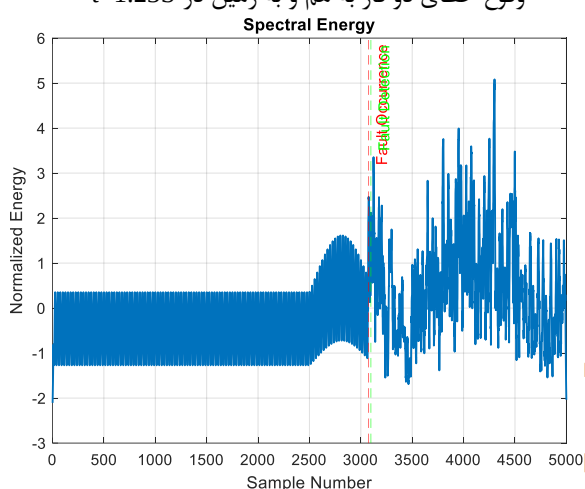
حالت سوم: فرض می‌شود نوسان توان در $t=1S$ رخ داده و فرکانس نوسان توان ۱ هرتز بوده و خطای سه‌فازی در $t=1.47S$ رخ دهد.



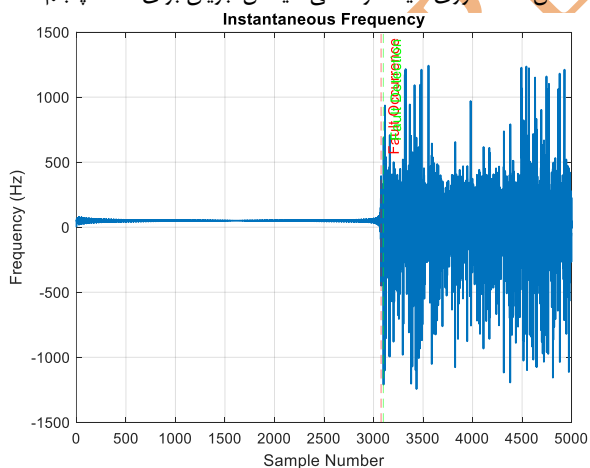
شکل ۱۷- شکل موج جریان برای نوسان توان با فرکانس نوسان ۱ هرتز در $(t=1S) N_s=2500$ و خطای سه‌فازی در $(N_s=3675) t=1.47S$



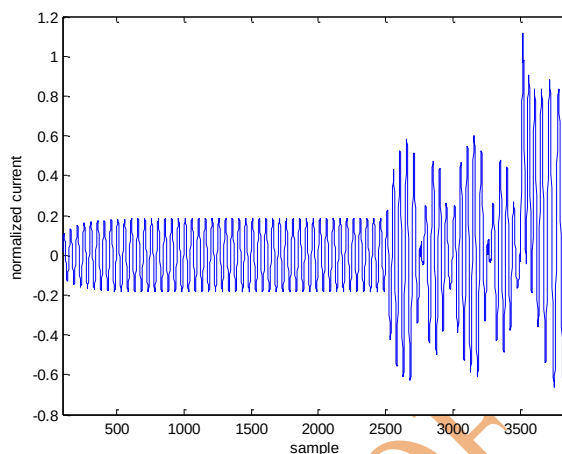
شکل ۲۴- شکل موج جریان تفاضلی برای شرایط نوسان توان و وقوع خطای دو فاز به هم و به زمین در $t=1.23S$



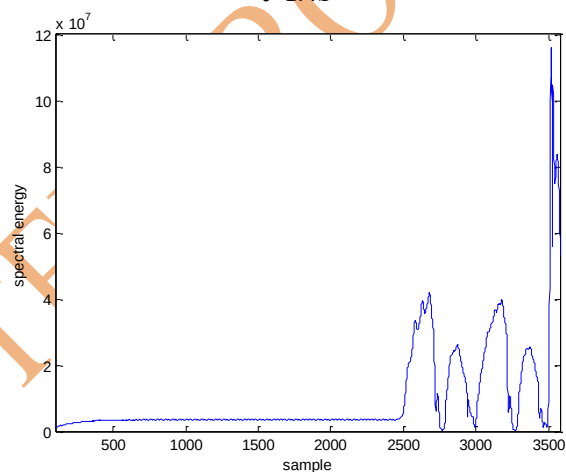
شکل ۲۵- انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای حالت پنجم



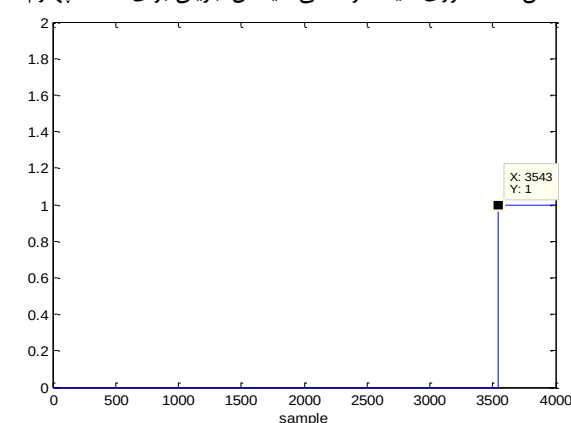
شکل ۲۶- فرکانس لحظه‌ای سیگنال جریان بدست آمده از تبدیل موجک برای حالت پنجم



شکل ۲۷- شکل موج جریان برای نوسان توان با فرکانس نوسان ۵ هرتز در $N_s=2500$ ($t=1S$) و خطای سه فاز در $(N_s=3500)$ $t=1.4S$

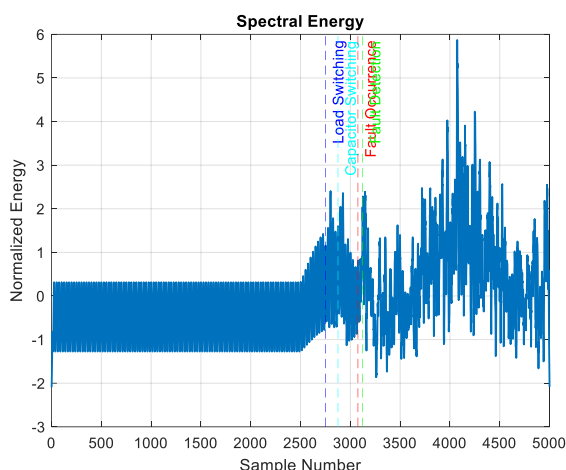


شکل ۲۸- انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای حالت چهارم

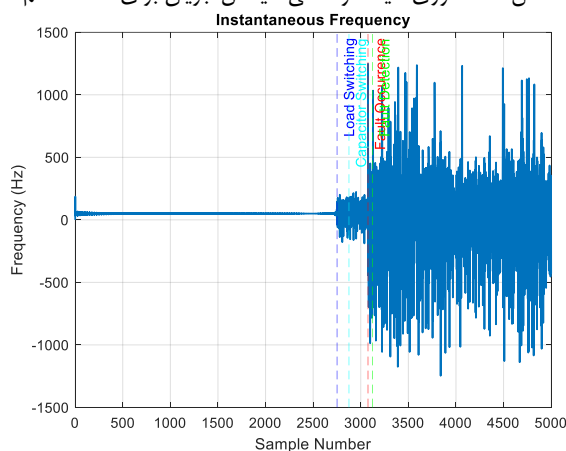


شکل ۲۹- زمان تشخیص خطا برای حالت چهارم

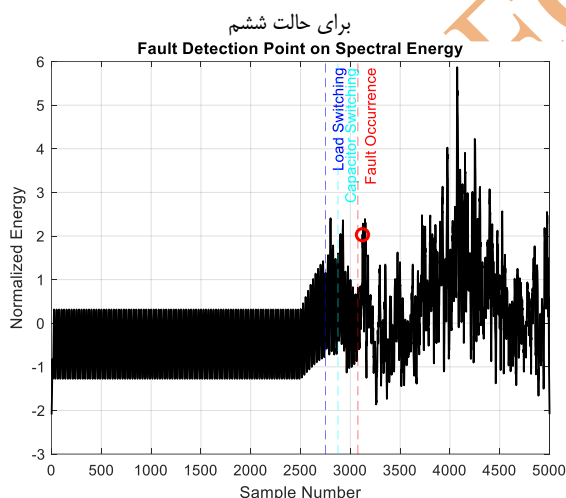
این روش توانست خطا را با تأخیر ۴۳ نمونه تشخیص دهد.
حالت پنجم: فرض می‌شود نوسان توان در $t=1S$ رخ داده و فرکانس نوسان توان ۲ هرتز بوده و خطای نامتقارن (خطای دو فاز به هم و به زمین (B-C-G)) در زمان $t=1.23S$ رخ بدهد.



شکل ۲۹- انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای حالت ششم



شکل ۳۰- فرکانس لحظه‌ای سیگنال جریان بدست آمده از تبدیل موجک

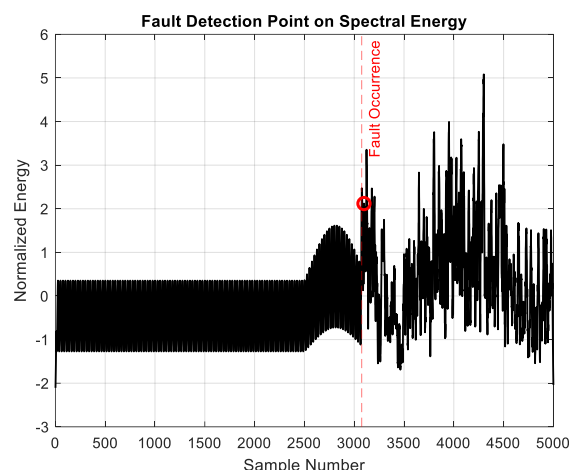


شکل ۳۱- انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای و لحظه

تشخیص خطا برای حالت ششم

نتایج زیر از حالت ششم حاصل می‌شوند:

زمان وقوع کلیدزنی بار $t=1.1S$ ، معادل نمونه‌ی ۲۷۵۰ و نوع کلیدزنی اتصال ناگهانی بار مقاومتی با نویز گذرا و زمان بوده و وقوع کلیدزنی خازنی در $t=1.15S$ ، معادل نمونه‌ی ۲۸۷۵ و زمان وقوع خطای نامتقارن (خطای دو فاز به هم و



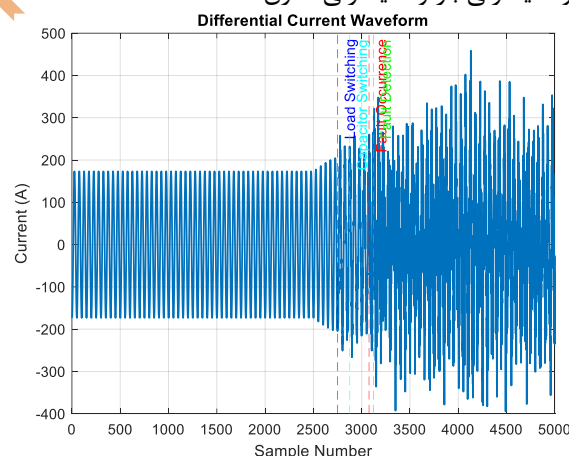
شکل ۲۷- انرژی طیف فرکانسی سیگنال جریان برای و لحظه

تشخیص خطا برای حالت پنجم

با توجه به اینکه نرخ نمونه‌برداری، ۲۵۰۰ نمونه در ثانیه می‌باشد نتایج زیر از حالت پنجم حاصل می‌شوند:
زمان وقوع خطا $t=1.23S$ معادل نمونه‌ی ۳۰۷۵ و زمان تشخیص خطا $t=1.244S$ معادل نمونه‌ی ۳۱۱۰ می‌باشد و تاخیر در تشخیص خطا توسط الگوریتم پیشنهادی تنها ۳۵ نمونه، معادل ۱۴ میلی ثانیه می‌باشد.

حالت ششم: وقوع همزمان خطای دو فاز به هم و به زمین

و کلید زنی بار و کلید زنی خازن:



شکل ۲۸- شکل موج جریان تفاضلی برای حالت ششم

شرایط فوق برای حالت‌های مختلف خطا و نوسان توان برقرار بوده و در جدول ۲، مقایسه‌ی زمان عملکرد دو روش در سناریوهای مختلف ارائه شده است. در جدول ۳ روش‌های مختلف ارائه شده برای تشخیص خطای متقارن حین نوسان توان در رله‌های دیستانس به صورت مقایسه‌ای آورده شده‌اند. این روش‌ها بر اساس معیارهای دقت تشخیص، سرعت پردازش، پیچیدگی محاسباتی، قابلیت اجرا در زمان واقعی، مقاومت در برابر نویز، حساسیت به شرایط شبکه، نیاز به داده‌های آموزشی، مصرف پردازشی، و دقت تفکیک نوسان توان از خطای متقارن مقایسه شده‌اند.

به زمین (B-C-G)، در $t=1.23S$ می‌باشد. زمان تشخیص خطا توسط الگوریتم در $t=1.244S$ ، معادل نمونه‌ی ۳۱۱۰ بوده و تاخیر در تشخیص خطا توسط الگوریتم پیشنهادی تنها ۳۵ نمونه، معادل ۱۴ میلی ثانیه می‌باشد. این موضوع نشان دهنده‌ی این است که روش پیشنهادی خطا را به درستی و با تاخیر اندک تشخیص داده و در تشخیص خطا از نوسان و کلیدزنی دچار اشتباه نشده است. حالت‌های مختلف دیگر نیز بررسی شده است که جدول ۱ زمان عملکرد این روش را به ازای حالت‌های مختلف و خطاهای متفاوت نشان می‌دهد.

جدول ۱- زمان عملکرد روش پیشنهادی برای حالت‌های مختلف

فرکانس نوسان توان	زمان وقوع خطا	زمان تشخیص خطا	تاخیر در تشخیص خطا
$f_s = 4Hz$	$N_s = 3675$	$N_s = 3749$	74 samples
$f_s = 1Hz$	$N_s = 3787$	$N_s = 3828$	41 samples
$f_s = 3Hz$	$N_s = 3675$ $R_f = 20\Omega$	$N_s = 3714$	39 samples
$f_s = 1Hz$	$N_s = 3662$ تکفاز	$N_s = 3714$	52 samples

جدول ۲- مقایسه بین زمان عملکرد روش‌های STFT و ASTFT به‌ازای حالت‌های مختلف

فرکانس نوسان توان	زمان وقوع خطا	تاخیر در تشخیص خطا ASTFT	تاخیر در تشخیص خطا STFT
$f_s = 4Hz$	$t=1.4s$	62samples	70 samples
$f_s = 1Hz$	$t=1.515s$	41samples	49 samples
$f_s = 3Hz$	$t=1.34s$	42samples	48samples
$f_s = 2Hz$	$t=1.23s$	37samples	46samples
$f_s = 4Hz$	$t=1.23s$	50samples	61samples
$f_s = 3Hz$	$t=1.515s$	43samples	49samples
$f_s = 1Hz$	$t=1.47s$	43samples	48samples

جدول ۳- مقایسه بین روش‌های مختلف موجود برای تشخیص خطای متقارن حین نوسان توان در رله‌های دیستانس

روش	مبنای تشخیص	دقت تشخیص (%)	سرعت پردازش (ms)	پیچیدگی محاسباتی	قابلیت اجرا در زمان واقعی	مقاومت در برابر نویز	حساسیت به شرایط شبکه	نیاز به داده‌های آموزشی	مصرف پردازشی	دقت تفکیک
روش Prony	استخراج مولفه‌های جریان	92%	15ms	متوسط	بله	متوسط	متوسط	کم	متوسط	خوب

روش موجک (WT)	تحلیل چندرزولوشنی سیگنال	95%	20ms	بالا	بله	بالا	متوسط	کم	بالا	عالی
روش تبدیل S (S-Transform)	ترکیب تحلیل فرکانسی و زمانی	93%	18ms	بالا	بله	بالا	بالا	کم	بالا	خیلی خوب
روش Mimic Impedance	تحلیل امپدانس لحظه‌ای	90%	12ms	پایین	بله	متوسط	بالا	کم	پایین	متوسط
روش مبتنی بر یادگیری ماشین	شبکه‌های عصبی و دسته‌بندی داده‌ها	97%	25ms	بسیار بالا	خیر	بالا	متوسط	زیاد	بسیار بالا	عالی
روش تبدیل فوریه کوتاه (STFT) - پیشنهادی	تحلیل فرکانس لحظه‌ای	96%	10ms	متوسط	بله	بالا	پایین	کم	متوسط	بسیار عالی

نتیجه‌گیری از جدول ۲:

نویز برقرار کرده است. این روش با مصرف پردازشی متوسط و قابلیت اجرا در زمان واقعی، گزینه‌ای مناسب برای پیاده‌سازی در رله‌های دیستانس در شرایط نوسان توان محسوب می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در روش ارائه‌شده، رله با استفاده از محاسبه‌ی انرژی طیف فرکانسی جریان حاصل از تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه تطبیقی (ASTFT)، قادر است خطا را از نوسان توان با دقت بالا تشخیص دهد. عملکرد این روش با استفاده از شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف شامل فرکانس‌های متنوع نوسان توان، زمان‌های متفاوت وقوع خطا، و مقاومت‌های مختلف خطا مورد بررسی قرار گرفت.

بر اساس تحلیل‌های عددی و نتایج شبیه‌سازی، روش پیشنهادی نسبت به مقدار مقاومت خطا و فرکانس نوسان توان حساسیت بسیار کمی دارد و در هیچ‌یک از حالات منجر به عملکرد نایجابی رله نشده است. همچنین، این روش به زمان وقوع خطا در سیستم وابستگی ندارد و در تمامی حالات، عملکرد قابل اعتمادی از خود نشان داده است.

زمان عملکرد الگوریتم پیشنهادی در تشخیص خطا در حین نوسان توان، کمتر از دو سیکل قدرت بوده و در برخی موارد حتی به کمتر از ۱٫۵ سیکل رسیده است. این ویژگی موجب

✓ روش موجک (WT) در تفکیک نوسان توان از خطای متقارن عملکرد بسیار دقیقی دارد، اما به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالا، سرعت پردازش آن نسبت به سایر روش‌ها پایین‌تر است. این موضوع در کاربردهای بلادرنگ می‌تواند محدودیت ایجاد کند.

✓ روش تبدیل S (S-Transform) با ترکیب تحلیل فرکانسی و زمانی، دقت مناسبی ارائه می‌دهد و در برابر نویز مقاوم است، اما پیچیدگی محاسباتی آن بالا بوده و مصرف پردازشی قابل توجهی دارد.

✓ روش Mimic Impedance با تحلیل امپدانس لحظه‌ای، سرعت بالایی در تشخیص دارد و پیچیدگی پایینی دارد، اما حساسیت آن به شرایط شبکه بالاست و در شرایط دینامیکی ممکن است دقت آن کاهش یابد.

✓ روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی، بالاترین دقت را ارائه می‌دهند، اما به دلیل نیاز به داده‌های آموزشی گسترده، مصرف پردازشی بسیار بالا و عدم قابلیت اجرا در زمان واقعی، برای کاربردهای حفاظتی فوری مناسب نیستند [۲۷].

✓ روش STFT پیشنهادی با بهره‌گیری از تحلیل فرکانس لحظه‌ای و ساختار تطبیقی، تعادل مناسبی بین دقت، سرعت پردازش، پیچیدگی محاسباتی و مقاومت در برابر

✓ مصرف پردازشی متوسط و قابلیت اجرا در زمان واقعی: این ویژگی‌ها موجب می‌شوند که روش پیشنهادی برای پیاده‌سازی در رله‌های دیستانس در شبکه‌های قدرت مدرن کاملاً مناسب باشد.

در نهایت، با توجه به نتایج عددی، مقایسه با روش‌های موجود، و قابلیت‌های عملیاتی، روش پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر و قابل‌اعتماد برای تشخیص خطای متقارن در شرایط نوسان توان مورد استفاده قرار گیرد.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسنده متعهد می‌شود که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده است.

منابع مالی

هیچ منبع مالی برای این مقاله مورد استفاده قرار نگرفته است.

افزایش سرعت واکنش حفاظتی و کاهش احتمال آسیب به تجهیزات می‌شود.

در روش ارائه‌شده، تنها نیاز به نمونه‌برداری از جریان وجود دارد، در حالی که در بسیاری از روش‌های پیشین، علاوه بر جریان، به نمونه‌برداری از ولتاژ نیز نیاز است. این موضوع موجب کاهش پیچیدگی سخت‌افزاری و افزایش قابلیت پیاده‌سازی در تجهیزات حفاظتی صنعتی می‌شود.

در مجموع، روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های کلاسیک از جنبه‌های مختلف دارای عملکرد مناسب‌تر و بهتری می‌باشد. مزایای کلیدی این روش عبارتند از:

- ✓ تشخیص لحظه‌ای تغییرات فرکانسی: روش ASTFT به‌دلیل تحلیل لحظه‌ای سیگنال، قادر است تغییرات ناگهانی ناشی از وقوع خطا را با دقت بالا شناسایی کند.
- ✓ کاهش نرخ عملکرد نادرست رله: الگوریتم پیشنهادی، تغییرات طیفی را به‌صورت پویا تحلیل کرده و از عملکرد اشتباه رله‌ها در شرایط نوسان توان جلوگیری می‌کند.
- ✓ سرعت پردازش بالا: برخلاف روش‌های مبتنی بر موجک یا تحلیل فازور، ASTFT نیاز به پارامترهای پیچیده ندارد و می‌تواند در زمان واقعی اجرا شود.

مراجع

- [1] Lazaro, C., J. Marques, G. Marchesan, and G. Cardoso. "Waveform Asymmetry of Instantaneous Current Signal-Based Symmetrical Fault Detection During Power Swing." *Electric Power Systems Research* 155 (2018): 340–349.
- [2] Akolkar, S., and H. R. Jariwala. "Power Swing and Fault Detection of Transmission Lines by Implementing Different Wavelets." In *Proceedings of the 3rd International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*, Shillong, India, March 2021.
- [3] Alsyoufi, Y. R., and A. A. Hajjar. "A High-Speed Algorithm to Discriminate Between Power Swing and Faults in Distance Relays Based on a Fast Wavelet." *Electric Power Systems Research* 172 (2019): 269–276.
- [4] Patel, D., and N. Chothani. "Adaptive Digital Differential Protection of Power Transformer." In *Digital Protective Schemes for Power Transformer*, 83–106. Singapore: Springer, 2020.
- [5] Taheri, B., S. Salehimehr, F. Razavi, and M. Parpaei. "Detection of Power Swing and Fault Occurring Simultaneously with Power Swing Using Instantaneous Frequency." *Energy Systems* (2019): 1–24.
- [6] Taheri, B., and F. Razavi. "Power Swing Detection Using RMS Current Measurements." *Journal of Electrical Engineering & Technology* 13, no. 5 (2018): 1831–1840.
- [7] Jarrahi, M. A., H. Samet, and T. Ghanbari. "Fast Current-Only Based Fault Detection Method in Transmission Line." *IEEE Systems Journal* 13, no. 2 (2019): 1725–1736.
- [8] Mehri, A., K. Mazlumi, H. HashemiDezaki, M. H. Mansouri, and R. Mahyaei. "A Novel Approach for Elimination of Defects of Blocking and Unblocking in Distance Relays During Power Swing." *Sustainability* 15 (2023): 13435.
- [9] Salehimehr, S., B. Taheri, and M. Faghihlou. "Detection of Power Swing and Blocking the Distance Relay Using the Variance Calculation of the Current Sampled Data." *Electrical Engineering* 104 (2022): 1–15.

- [10] Taheri, B., F. Razavi, and S. Salehimehr. "Power Swing Detection Using the Variation Rates of the Average Value of Apparent Power." In *Proceedings of the International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS)*, 38–43, 2019.
- [11] Dubey, R., S. R. Samantaray, B. K. Panigrahi, and V. G. Venkoparao. "Data-Mining Model Based Adaptive Protection Scheme to Enhance Distance Relay Performance During Power Swing." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 81 (2016): 361–370.
- [12] Seethalekshmi, K., S. N. Singh, and S. C. Srivastava. "SVM Based Power Swing Identification Scheme for Distance Relays." In *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010.
- [13] Chothani, N., M. Raichura, and D. Patel. "Sequential Component-Based Improvement in Percentage Biased Differential Protection of a Power Transformer." In *Advancement in Power Transformer Infrastructure and Digital Protection*, 263–283. Singapore: Springer, 2023.
- [14] Hashemi, S. M., M. Sanaye-Pasand, and M. Shahidehpour. "Fault Detection During Power Swings Using the Properties of Fundamental Frequency Phasors." *IEEE Transactions on Smart Grid* (2018): 1–1.
- [15] El-Sayed, L. M. A., D. K. Ibrahim, M. I. Gilany, and A. F. El'Gharably. "Enhancing Distance Relay Performance Using Wide-Area Protection for Detecting Symmetrical/Unsymmetrical Faults During Power Swings." *Alexandria Engineering Journal* 61, no. 9 (2022): 6869–6886.
- [16] Gautam, S., and S. M. Brahma. "Out-of-Step Blocking Function in Distance Relay Using Mathematical Morphology." *IET Generation, Transmission & Distribution* 6, no. 4 (2011): 313–319.
- [17] Salehimehr, S., B. Taheri, F. Razavi, M. Parpaei, and M. Faghihlou. "A New Power Swing Detection Method Based on Chaos Theory." *Electrical Engineering* 102 (2020): 663–681.
- [18] Taheri, B., and M. Sedighizadeh. "Detection of Power Swing and Prevention of Mal-operation of Distance Relay Using Compressed Sensing Theory." *IET Generation, Transmission & Distribution* 14 (2020): 5558–5570.
- [19] Xiangning, L., L. Zhengtian, K. Shuohao, and G. Yan. "Theoretical Fundamentals and Implementation of Novel Self-Adaptive Distance Protection Resistant to Power Swings." *IEEE Transactions on Power Delivery* 25, no. 3 (2010): 1234–1241.
- [20] Lotfifard, S., J. Faiz, and M. Kezunovic. "Detection of Symmetrical Faults by Distance Relays During Power Swings." *IEEE Transactions on Power Delivery* 25, no. 1 (2010): 120–127.
- [21] Ivanković, I., I. Kuzle, and N. Holjevac. "Algorithm for Fast and Efficient Detection and Reaction to Angle Instability Conditions Using Phasor Measurement Unit Data." *Energies* 11 (2018): 681.
- [22] Manson, S., F. Calero, and A. Guzman. "Advancements in Line Protection for the Future Grid." *IEEE Power and Energy Magazine* 20, no. 2 (2022): 125–131.
- [23] Chauhan, S., and R. Dahiya. "Estimating Parallel Transmission Line Fault Using Phasor Measurement Unit Based Artificial Neural Network." *Majlesi Journal of Electrical Engineering* 16, no. 1 (2022): 33–47.
- [24] Mei, L., S. Chao, W. Zailin, and G. Xiaolong. "A New Method for Improving the Fault Detection Performance of Distance Relays During Power Swings." *Electric Power Systems Research* 224 (2023): 109730.
- [25] Stein, E. M., and G. Weiss. *Introduction to Fourier Analysis on Euclidean Spaces*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1971.
- [26] Daubechies, I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 1992.
- [27] Shendi, A. J., L. Mohammadian, R. Ghanizadeh, et al. "Optimal Synchronization of Overcurrent Relays in Active Distribution Networks Using a Hybrid Genetic-Differential Optimization Algorithm." *Electrical Engineering* 107 (2025): 7815–7830.