



Faulty Phase Identification in SSSC-compensated Transmission Lines Connected to a Solar Farm by Analyzing the Fast Walsh-Hadamard Fourier Transform Coefficient of Three-phase Current Signal

Mahyar Abasi^{1*} | Arash Golgiri²

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering & Administrator, Research Institute of Renewable Energy, Arak University, Arak 38156-8-8349, Iran. Email: m-abasi@araku.ac.ir

3. MSc. Student, Department of Electrical Engineering, Karoon Institute of Higher Education, Ahvaz, Iran. Email: arashgolgiri1376@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 20 July 2024
Revised 20 August 2024
Accepted 21 October 2024
Published Online 04 January 2025

Keywords:
fault classification,
fast walsh- hadamard fourier transform,
solar farms,
SSSC,
three-phase current.

ABSTRACT

This work presents a novel and precise method for detecting faulty phases in transmission lines equipped with a Static Series Synchronous Compensator (SSSC). The DC source for supplying active power of the SSSC is connected to a solar farm, serving as a reliable energy supplier inside the system. The dynamic operational mode of SSSC presents a significant problem in accurately detecting fault phases. This study utilizes three-phase current signals of a single terminal. The suggested method employs a novel and robust transform known as the Fast Fourier-Walsh-Hadamard Transform to extract the properties of the faulty phase. The coefficients derived from applying this transform to three-phase current serve as the primary criterion for comparison and assessment. The algorithm outlined in this article is as follows: The estimated coefficients for each phase and the established threshold values for phase and ground faults, along with a flowchart depicting serial processing, will facilitate the identification of the faulty phase(s). The suggested approach can detect all short-circuit and non-ground faults with exceptional precision. The software simulation model of the primary network is executed in MATLAB/Simulink environment, and the proposed algorithm is developed in an m-file in MATLAB. The suggested solution has undergone testing and evaluation in software over 2600 distinct cases. The statistical database for various fault scenarios across several locations, resistances, phases, and durations indicates that the approach demonstrates a 96% accuracy, which is very advantageous compared to other benchmarks.

Cite this article: Abasi, M. & Golgiri, A. (2025). Faulty Phase Identification in SSSC-compensated Transmission Lines Connected to a Solar Farm by Analyzing the Fast Walsh-Hadamard Fourier Transform Coefficient of Three-phase Current Signal. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (1), 43-67. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.385674.1106>



© Mahyar Abasi, Arash Golgiri

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.385674.1106>

Introduction

The implementation of next-generation reactive power compensators has been strongly advocated as an effective and cost-efficient remedy for power control issues in recent decades. Research indicates that the utilization of this equipment will address issues including active and reactive power control, optimal operation, and stability. However, in addition to the advantages provided by the presence of this device, other challenges arise within the network. A significant concern is protection of the transmission lines where this equipment is situated. The protection of these lines is somewhat more complex than that of standard lines without compensators due to the presence of such equipment. Developing adaptive protection systems for these topologies has consistently presented numerous

hurdles. Experts and academics in the power sector have presented multiple methods to address this dilemma, each with distinct advantages and downsides. The introduction of these compensators into the network virtually alters the impedance of the transmission line, resulting in inaccuracies for distance relays and detection, classification, and location algorithms. On the other hand, because these devices interconnect the power phases of the lines via a control and power electronic system, accurately and swiftly identifying the faulty phase during a short circuit in the transmission lines becomes significantly more challenging and intricate. Furthermore, when these devices are situated within the fault loop, their rapid dynamic response may hinder the relays at the line's near end from accurately detecting the problem in real-time, hence exacerbating the challenges associated with this design. A highly sophisticated and notable variant of these compensators is the series synchronous static compensator (SSSC), which facilitates the control of reactive power and voltage profile, in addition to enabling active power exchange between the supply source and the transmission line. This compensator functions as a voltage source within the transmission line, with the current flowing through it being 90 degrees lagging or leading its voltage, so enabling the absorption or generation of reactive power for the equipment in the line. In this topology, the occurrence of a short circuit fault significantly influences the dynamics of the fault current and impairs the efficacy of line protection algorithms due to the presence of SSSC equipment, which functions as a series dynamic voltage source utilizing a voltage source converter. Given the non-linear and unexpected behavior of this device throughout the fault period, prompt detection of the fault inception is crucial. If the fault is not promptly identified, this equipment may induce instability during the fault duration. The issue arises from the divergence of the control system during the fault period, which is challenging to control at this crucial period. Consequently, the challenge presented in this paper constitutes a significant topic that requires more investigation. The Ministry of Energy's recent proposals for practical projects in regional power companies and network management indicate that the extensive utilization of such equipment in the future power industry network will be unavoidable. This paper addresses the issue of fault detection and classification in compensated transmission lines with an SSSC.

Challenges of prior references:

- Certain proposed approaches necessitate information from both sides of the line for execution.
- Some methods have addressed solely the issues of detection and/or classification, and/or a combination of both with location.
- Owing to the intricate dynamics of SSSC, the majority of references concentrate on series capacitor compensators and TCSC.
- The primary emphasis of the offered methodologies is on teaching and learning-based approaches, such as neural networks or support vector machines.
- Most publications emphasize solutions derived from wavelet transform, highlighting the difficulties in selecting the appropriate mother wavelet and establishing the resolution level.

Methodology

This article introduces a novel method for identifying faulty phases in SSSC-compensated transmission lines connected to a solar farm. The suggested approach employs Fast Walsh-Hadamard Fourier transform coefficients of the current signal for assessment. This integrated transform employs the attributes of Walsh and Fourier transforms for precise signal modeling, hence enhancing solution accuracy. This article proposes a method that calculates the coefficient for the current of each phase to identify phase faults, as well as for instantaneous zero-sequence current to detect ground faults. The method is explained as a comprehensive flowchart, implemented for an SSSC-compensated transmission line irrespective of the fault portion. The results indicate that the Fast Walsh-Hadamard Fourier transform is significantly more accurate and efficient than alternative techniques for detecting faulty phase. The salient features of the suggested methodology are as follows:

- Using a new transform to increase the accuracy and speed of the algorithm in detecting the faulty phase,
- Using a three-phase current signal of only one terminal,
- The algorithm does not depend on the faulty section (the left and right sides of the SSSC)

- The independency of the algorithm from the operation mode of the SSSC as well as the installation location of the SSSC,
- The presence of solar renewable source in supplying the DC link of the SSSC equipment and its lack of influence on the performance of the proposed algorithm.

Results

This article employs five distinct scenarios for the testing and assessment of the proposed method. Each scenario is evaluated based on the phase type under fault, fault resistance, fault location, and fault inception time in SSSC-compensated transmission lines. The SSSC examined in this study is connected to a solar farm to supply DC-link power. The three-phase currents at one terminal of the line, F_{WHFTC_i} , the currents of all three phases and the zero-sequence current proportional to the ground fault, along with the specified threshold values, the fault type regarding grounded/non-grounded, and the faulty phase(s) will be specified. This work examines fault scenarios on both sides of the SSSC, and the results indicate that the suggested approach is independent of fault location, fault resistance, fault inception time, and SSSC operating mode. The method provided in this paper has undergone testing and evaluation across about 2600 scenarios involving various short circuits under diverse conditions. In this statistical population, the suggested algorithm has achieved a success rate of approximately 96%.

Conclusion

This paper presents a novel method utilizing one-terminal signal analysis to identify the faulty phase in transmission lines equipped with SSSC. Being arranged in series within the line, the SSSC significantly impacts the healthy phases during a fault occurrence. The control system of this equipment employs a three-phase combination to give control commands, resulting in divergence upon fault occurrence, which impacts the healthy phases. This study proposes a method to detect the faulty phase(s) during a short circuit by utilizing solely the three-phase current signal from one terminal, employing the analysis of the Fast Fourier-Walsh-Hadamard transform coefficient as an evaluative and comparative metric. This paper's theory is founded on the measurement and computation of the requisite transformation coefficients through a sequential method for different forms of short circuit faults. The approach is independent of the SSSC operating mode and demonstrates excellent performance for diverse fault types on both sides of the compensator. The technique has undergone testing and evaluation for 2,600 fault types. The statistical package has been evaluated for several short circuit types throughout multiple phases, on both sides of the SSSC, and for five resistance values: 1, 10, 50, 100, and 200 ohms, as well as for varying durations of SSSC operational modes. The simulation and implementation of several fault scenarios yielded a 96% accuracy for the suggested algorithm in comparison to the test cases. The proposed solution, designed for all short circuit faults on both sides of the SSSC and using only current of one side of the line, is deemed superior to the methods outlined in prior references.



تعیین فاز تحت خطای اتصال کوتاه در خطوط انتقال جبران‌سازی شده با SSSC متصل به یک مزرعه خورشیدی مبتنی بر آنالیز ضریب تبدیل فوریه والش هادامارد سریع سیگنال جریان سه فاز

مهیار عباسی^{۱*} | آرش گل‌گیری^۲

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، سرپرست پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه اراک، اراک ۸۳۴۹-۸-۳۸۱۵۶، ایران. رایانامه: m-abasi@araku.ac.ir
 ۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، مؤسسه آموزش عالی کارون، اهواز، ایران. رایانامه: arashgolgiri1376@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

کلیدواژه:

تبدیل والش هادامارد فوریه سریع، جبران‌سازی سنکرون استاتیک سری، جریان سه فاز، دسته‌بندی خطا، مزارع خورشیدی.

در این مقاله نوعی روش جدید و دقیق برای تشخیص فازهای تحت خطا در خطوط انتقال جبران‌سازی شده با جبران‌سازی سنکرون استاتیکی سری (SSSC) ارائه شده است. منبع DC تأمین توان اکتیو SSSC، متصل به یک مزرعه خورشیدی است که به عنوان یک تأمین‌کننده انرژی پایدار در سیستم عمل می‌کند. به دلیل مود عملکرد دینامیکی SSSC، تشخیص فاز صحیح خطا یکی از چالش‌های اساسی حفاظتی است. در این مقاله از سیگنال‌های جریان سه فاز تنها یک ترمینال استفاده شده است. روش پیشنهادی از یک تبدیل جدید و قوی به نام تبدیل فوریه والش هادامارد سریع برای استخراج ویژگی‌های فاز تحت خطا استفاده می‌کند. ضرایب حاصل از پیاده‌سازی این تبدیل روی جریان سه فاز به عنوان فاکتور اصلی جهت مقایسه و ارزیابی استفاده شده است. روند الگوریتم پیشنهادی در این مقاله به این صورت است که با استفاده از ضرایب محاسبه‌شده برای هر فاز و مقادیر آستانه تعیین‌شده برای خطاهای فازی و زمین و همچنین، یک فلوچارت با پردازش سریال، فاز و یا فازهای تحت خطا مشخص خواهند شد. الگوریتم پیشنهادی قادر است تمام خطاهای اتصال کوتاه زمین شده و نشده را با دقت بسیار زیادی تشخیص دهد. مدل شبیه‌سازی نرم‌افزاری شبکه اصلی در سیمولینک نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده و برنامه الگوریتم پیشنهادی در m فایل نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده است. روش پیشنهادی برای ۲۶۰۰ سناریوی مختلف به صورت نرم‌افزاری تست و ارزیابی شده است. طبق جامعه آماری پیاده‌سازی شده برای سناریوهای مختلف خطا در مکان‌های مختلف، با مقاومت‌های مختلف، در فازهای مختلف و برای زمان‌های مختلف، عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی ۹۶ درصد است که نسبت به مراجع دیگر بسیار مطلوب ارزیابی شده است.

استناد: عباسی، مهیار و گل‌گیری، آرش (۱۴۰۳). تعیین فاز تحت خطای اتصال کوتاه در خطوط انتقال جبران‌سازی شده با SSSC متصل به یک مزرعه خورشیدی مبتنی بر آنالیز ضریب تبدیل فوریه والش هادامارد سریع سیگنال جریان سه فاز. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۴ (۱) ۴۳-۶۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.385674.1106>

© مهیار عباسی، آرش گل‌گیری | ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.385674.1106>



تعریف مخفف‌ها

مخفف	عنوان کامل انگلیسی	عنوان کامل فارسی
SSSC	Series Static Synchronous Compensator	جبران‌ساز سنکرون استاتیک سری
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor	جبران‌ساز خازن سری کنترل شده با تریستور
SC	Series Capacitor	خازن سری
DC	Direct Current	جریان مستقیم
FWHFTC	Fast Walsh-Hadamard Fourier Transform Coefficient	ضریب تبدیل فوریه والش هادامارد سریع
WHT	Walsh-Hadamard Transform	تبدیل والش هادامارد
DFT	Discrete Fourier Transforms	تبدیل فوریه گسسته

۱. مقدمه

۱-۱. انگیزه و ضرورت انجام پژوهش

استفاده از جبران‌سازهای توان راکتیو نسل جدید به عنوان راه حلی بهینه و اقتصادی به منظور رفع چالش‌های کنترل توان در چند دهه اخیر بسیار پیشنهاد شده است. مطالعات نشان می‌دهد استفاده از این تجهیزات چالش‌هایی نظیر کنترل توان اکتیو و راکتیو، بهره‌برداری بهینه، پایداری و ... را حل خواهند کرد، اما در کنار منافع حضور این تجهیزات چالش‌های دیگری در شبکه ایجاد می‌شود [۱]. یکی از این چالش‌ها مسئله حفاظت خطوط انتقالی است که این تجهیزات در آن‌ها نصب می‌شوند. حفاظت این نوع خطوط به دلیل حضور این تجهیزات به تناسب پیچیده‌تر از خطوط عادی و بدون جبران‌ساز است. طراحی الگوریتم‌های حفاظتی تطبیقی این نوع از توپولوژی‌ها همواره چالش‌های بسیار زیادی داشته است. متخصصان و پژوهشگران صنعت برق راه‌حل‌های مختلف و متنوعی برای حل این چالش مطرح کرده‌اند که هر یک نیز نسبت به یکدیگر مزایا و معایبی داشته‌اند [۲]. زمانی که این جبران‌سازها در شبکه قرار می‌گیرند، امپدانس خط انتقال را به طور مجازی تغییر می‌دهند و این مسئله باعث می‌شود که رله‌های دیستانس و الگوریتم‌های تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خط دچار اختلال شوند. از طرفی، به دلیل اینکه این تجهیزات از طریق یک سیستم کنترلی و الکترونیک قدرت فازهای خطوط را به یکدیگر متصل می‌کنند، لذا امکان تشخیص صحیح و سریع فاز تحت خطا هنگام وقوع یک خطای اتصال کوتاه در خطوط انتقال بسیار سخت و پیچیده‌تر می‌شود. همچنین، زمانی که این تجهیزات در حلقه خطا قرار می‌گیرند به دلیل رفتار دینامیکی سریع ممکن است رله‌های ابتدای خط، خطا را در زمان دقیق خود نتوانند تشخیص دهند و این موضوع چالش‌های این نوع توپولوژی را دوچندان می‌کند [۳ - ۴].

از تکامل‌یافته‌ترین و برجسته‌ترین نوع از این جبران‌سازها تجهیز جبران‌ساز سنکرون استاتیک سری (SSSC) است که قابلیت کنترل توان راکتیو و پروفیل ولتاژ و همچنین، تبادل توان اکتیو بین منبع تأمین‌کننده و خط انتقال را فراهم می‌کند. این جبران‌ساز همانند یک منبع ولتاژ در خط انتقال عمل می‌کند که جریان گذرنده از آن به میزان ۹۰ درجه از ولتاژ آن عقب‌تر و یا جلوتر است که امکان جذب و یا تولید توان راکتیو را برای این تجهیز در خط ایجاد می‌کند. زمانی که یک خطای اتصال کوتاه در این توپولوژی اتفاق می‌افتد، تجهیز SSSC همانند یک منبع ولتاژ دینامیک سری مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ به شدت بر دینامیک جریان خطا تأثیر می‌گذارد و باعث ایجاد اختلال در عملکرد الگوریتم‌های حفاظت خط می‌شود [۱ - ۴].

با توجه به رفتار غیرخطی و غیرقابل پیش‌بینی این تجهیز در دوره زمانی خطا، تشخیص سریع زمان وقوع خطا مسئله بسیار پراهمیتی است. در صورتی که خطا به سرعت تشخیص داده نشود، ممکن است این تجهیز خود نیز باعث ایجاد ناپایداری در دوره خطا شود. دلیل این مسئله واگرایی سیستم کنترلی در دوره خطا است که در این بازه زمانی حساس و بحرانی به‌آسانی قابل کنترل نیست. لذا چالش مطرح‌شده در این مقاله به عنوان یک مسئله پراهمیت نیاز به تحقیق و پژوهش دارد. با توجه به پیشنهاد پروژه‌های عملی که در چندین سال اخیر توسط وزارت نیرو در شرکت‌های برق منطقه‌ای و مدیریت شبکه مطرح شده است، استفاده از این تجهیزات به صورت گسترده در شبکه آینده صنعت برق حتمی خواهد بود. لذا در این مقاله، مسئله حل چالش تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با جبران‌ساز SSSC مطرح شده است.

۱-۲-۲. مروری بر پژوهش‌های پیشین

جبران‌سازهای سری در خطوط انتقال به طور کلی شامل سه دسته اساسی می‌شوند. این سه دسته براساس تکنولوژی آن‌ها قابل تقسیم‌بندی هستند، دسته اول مربوط به جبران‌سازهای خازن سری هستند که بدون هیچ نوع کلید کنترلی داخل خط قرار می‌گیرند، دسته دوم مربوط به جبران‌سازهایی می‌شود که مبتنی بر تریتور هستند. این جبران‌ساز خازن سری کنترل شده با تریتور (TCSC) است و دسته سوم جبران‌ساز نسل جدید SSSC که مبتنی بر مبدل‌های منبع ولتاژ هستند. رفتار حالت‌های گذرای این سه نوع جبران‌ساز سری با یکدیگر متفاوت است. در ادامه، براساس این دسته‌بندی مقالات مربوط به تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط مجهز به این جبران‌سازها ارائه شده است.

۱-۲-۱. دسته اول: مرور مقالات تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با خازن سری [۱-۷]

در پژوهشی در کشور ترکیه، محققان روشی جدید برای تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با خازن سری مبتنی بر تبدیل استاکول و ماشین بردار پشتیبان ارائه کرده‌اند. الگوریتم این مرجع به این صورت عمل می‌کند که سیگنال‌های جریان و ولتاژ به عنوان ورودی تبدیل استاکول در نظر گرفته می‌شوند و سپس، ویژگی‌های آن‌ها استخراج می‌شود و سپس خروجی آن‌ها به منظور دسته‌بندی وارد ماشین بردار پشتیبان می‌شود تا قابل تفکیک شوند [۱]. در پژوهشی دیگر در این حوزه، محققان در کشور هند، یک ارزیابی کامل میان انواع موجک‌های مادر در تبدیل موجک برای انتخاب بهترین موجک مادر با هدف تشخیص و دسته‌بندی خطا براساس انرژی سیگنال جریان در خطوط انتقال جبران‌شده با خازن سری ارائه کرده‌اند [۲]. در این مرجع از Haar, Daubechies, Symlets, Coiflet, BiorSplines, Reverse BiorSplines, Meyer به عنوان موجک‌های مادر برای ارزیابی انتخاب شده‌اند. در یک مطالعه دیگر در کشورهای هند و مصر به صورت مشترک، یک روش غیر واحد برای حفاظت کامل خطوط انتقال جبران‌شده با خازن سری براساس تبدیل موجک گسسته و الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه، ارائه شده است [۳]. خط انتقال در نظر گرفته شده در این مطالعه دومداره بوده است و تمام سه مرحله تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا در این مطالعه انجام شده است. در این روش برای پیش‌پردازش اولیه از تبدیل موجک به دلیل اینکه قابلیت تفکیک مؤلفه‌های گذرای فرکانس بالا و پایین دارد، استفاده شده است. در ادامه این مطالعات در پژوهشی دیگر در کشور هند، محققان یک روش جدید در خطوط انتقال دومداره جبران‌شده با خازن سری برای تشخیص وقوع خطا و تعیین فازهای تحت خطا ارائه کرده‌اند. جریان‌های سه فاز هر دو مدار تنها از یک سمت خط اندازه‌گیری شده و برای محاسبه ضرایب جزئی و تقریبی فرکانس بالا شامل محتوای انرژی موجک متناظر با هر سیگنال جریان فاز استفاده می‌شود [۴]. در کشور مصر، محققان در یک طرح تحقیقاتی، یک روش تشخیص وقوع خطا و تعیین سمت خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با خازن سری ارائه کرده‌اند [۵]. در این روش، الگوریتم ریاضی اصلاح شده برای عملکرد رله دیستانس از طریق جبران‌سازی افت ولتاژ روی خازن سری عمل می‌کند. در نتیجه، ناحیه خطا چه در سمت بالادست جبران‌ساز باشد و چه در سمت پایین‌دست آن، شناسایی می‌شود. امپدانس‌های ظاهری هر دو سمت محاسبه شده و زاویه آن‌ها به صورت یک الگوی تصمیم‌گیری در الگوریتم لحاظ می‌شود. در ادامه این روند مطالعاتی گروهی از پژوهشگران کشور هند، یک روش ترکیبی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم و تبدیل موجک گسسته برای تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال مجهز به خازن سری ارائه کرده‌اند [۶]. در این مطالعه تنها از جریان‌های یک سمت برای آنالیز و ارزیابی استفاده شده است. یک پنجره متحرک شامل ۲۰ نمونه انتخاب شده و ضرایب موجک تقریبی با استفاده از موجک والد سطح ۴ با رزولوشن ۱ سطحی تولید می‌شود. سپس، این ضرایب به عنوان ورودی به الگوهای هوشمند اعمال می‌شوند و در نهایت در سال ۲۰۲۲ گروهی از پژوهشگران کشور هند، از دو تبدیل فوریه تمام‌سیکل و موجک برای تشخیص وقوع خطا در خطوط انتقال جبران‌سازی شده با خازن سری استفاده کرده‌اند. از آنالیز فوریه برای پردازش سیگنال‌های جریان اندازه‌گیری شده از یک ترمینال استفاده شده است و در نهایت به عنوان ورودی تبدیل موجک با موجک مادر هر ۵ در نظر گرفته شده‌اند [۷].

۱-۲-۲. دسته دوم: مرور مقالات تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده TSCS [۸-۱۴]

در یک پژوهش انجام‌شده در کشور هند در سال ۲۰۰۶، محققان الگوریتمی برای تشخیص و دسته‌بندی بخش خطادار در خطوط انتقال جبران‌شده با TCSC مبتنی بر روش ماشین بردار پشتیبان ارائه کرده‌اند [۸]. در این مطالعه سه ماشین به منظور دسته‌بندی خطا، تشخیص زمین و شناسایی بخش خطادار در نظر گرفته شده است. در یک مطالعه دیگر در ایران پژوهشگران الگوریتمی جدید برای تشخیص و دسته‌بندی خطا و تعیین بخش خطادار در خطوط انتقال جبران‌شده با TCSC مبتنی بر ترکیب روش درخت مدل لجستیک و تبدیل استاکول ارائه شده است [۹]. از هر فاز شش ویژگی از کانتورهای زمانی - فرکانسی تبدیل استاکول استخراج شده است و در نهایت به عنوان ورودی درخت قرار گرفته‌اند. در یک پژوهش دیگر در کشور هند در سال ۲۰۱۴ از روش شبکه‌های عصبی هوشمند و ماشین بردار پشتیبان برای دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با TCSC استفاده شده است [۱۰]. در این روش از تبدیل موجک گسسته برای استخراج به عنوان ورودی الگوریتم یادگیری ماشین استفاده شده است. در مطالعه دیگری در هند، محققان یک روش شناسایی نوع خطا و تعیین فازهای تحت خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با TCSC مبتنی بر جریان‌های سه فاز یک ترمینال و ماشین بردار پشتیبان ارائه کرده‌اند [۱۱]. نتایج به‌دست‌آمده در این مرجع با شبکه‌های عصبی دیگر مقایسه شده است. در ادامه مطالعات در هند، محققان دیگری، یک الگوریتم تشخیص و تخمین مکان خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با TCSC متصل به مزارع بادی ارائه کرده‌اند [۱۲]. برای تشخیص بخش تحت خطا، از علائم جریان توالی مثبت دو سر خط استفاده شده است. در این مطالعه از تجزیه حالت تجربی و یک طبقه‌کننده تصادفی برای حل چالش تشخیص و دسته‌بندی خطا در این توپولوژی استفاده شده است. در کشور مکزیک، محققان یک روش تشخیص و مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با TCSC ارائه کرده‌اند [۱۳]. در این مطالعه از تبدیل موجک برای تحلیل و آنالیز سیگنال‌های گذرای ناشی از خطا استفاده شده و در یک پژوهش مشترک بین پژوهشگران، هندی، آمریکایی و استرالیایی، یک روش تشخیص و طبقه‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با TSCS مبتنی بر روش شاخص نظارتی گذرا و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است [۱۴].

۱-۲-۳. دسته سوم: مرور مقالات تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده SSSC [۱۵-۲۰]

در یک پژوهش انجام‌شده در کشور مصر در سال ۲۰۱۱، یک روش کارآمد مبتنی بر آنالیز زمان - فرکانس مبتنی بر آنروپی ترکیب‌شده با موجک جهت تشخیص و دسته‌بندی خطای اتصال کوتاه در خطوط انتقال جبران‌شده با SSSC ارائه شده است [۱۵]. در این مطالعه از محاسبات تبدیل موجک گسسته و آنروپی موجک برای تحلیل سیگنال‌های جریان و ولتاژ هنگام خطا استفاده شده است. در مطالعه دیگری در کشور چین، یک ضریب تصحیح برای بهبود آنروپی بسته موجک در بحث تحلیل و شناسایی بخش تحت خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با SSSC ارائه شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی این طرح نسبت به حالت عادی بهبود داده شده است [۱۶]. در یک مطالعه دیگر در کشور هند، پژوهشگران طرح مبتنی بر تبدیل موجک گسسته و درخت رگرسیون دسته‌بندی برای تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با SSSC ارائه کرده‌اند [۱۷]. در این طرح از مزایای هر دو شیوه تبدیل موجک و آنروپی شانون در تشریح مشخصات سیگنال استفاده شده است. در یک پژوهش انجام‌شده در کشور مکزیک، یک روش تشخیص و مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با SSSC آورده شده است. روش پیشنهادی در این مرجع از تئوری امواج سیار و تبدیل موجک برای جلوگیری از تداخل فرکانس پایین ایجادشده توسط سیستم و SSSC پیشنهاد شده است [۱۸]. پژوهشگران کشور اردن در سال ۲۰۲۰، تأثیر حالت گذرای SSSC روی عملکرد رله دیستانس در بحث تشخیص و تخمین مکان خطا بحث و بررسی کرده‌اند [۱۹]. در این مرجع از یک تکنیک تطبیقی برای حل چالش افزایش و کاهش برد رله دیستانس استفاده شده است. در نهایت، روش پیشنهادی روی یک رله دیجیتال پیاده‌سازی شده است و در نهایت در آخرین پژوهش انجام‌شده در این حوزه توسط محققان هندی، یک روش جدید برای تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با SSSC مجهز به ذخیره‌ساز انرژی در یک خط انتقال طولانی ارائه شده است [۲۰]. در این مرجع از

یک شرط مرزی مبتنی بر تبدیل موجک، برای تمایز بین خطاهای داخلی و خارجی استفاده شده است. نتایج حاصل از مقایسه مراجع پیشین و روش پیشنهادی در جدول ۱ آورده شده است. برای این مقایسه از ۶ شاخص استفاده شده است.

- شاخص ۱: این شاخص نوع جبران‌ساز را معرفی می‌کند.
- شاخص ۲: این شاخص فضای حل مسئله را معرفی می‌کند. فضای حل مسئله می‌تواند، فازوری، امواج سیار، هوش مصنوعی و الگوریتم‌های ابتکاری و ترکیبی از سه روش قبل باشد.
- شاخص ۳: این شاخص وابستگی الگوریتم پیشنهادی به دیتای اندازه‌گیری است. این دیتاها می‌تواند جریان، ولتاژ و یا هر دو باشد.
- شاخص ۴: این شاخص تعداد ترمینال‌های مورد نیاز برای اندازه‌گیری دیتا را نشان می‌دهد.
- شاخص ۵: این شاخص سهولت شرایط پیاده‌سازی و عملکرد الگوریتم مراجع پیشین نسبت به الگوریتم پیشنهادی را در سه سطح سخت، متوسط و آسان نشان می‌دهد.
- شاخص ۶: این شاخص حضور تولیدات تجدیدپذیر به عنوان منبع تأمین‌کننده توان اکتیو جبران‌ساز را نشان می‌دهد.

۱-۳. طرح چالش‌ها

چالش‌های مراجع پیشین:

- برخی روش‌های پیشنهادی برای پیاده‌سازی نیاز به اطلاعات دو سمت دارند.
- برخی روش‌ها تنها مسئله تشخیص و یا مسئله دسته‌بندی و یا همراه با مکان‌یابی را حل کرده‌اند.
- به دلیل دینامیک بسیار پیچیده SSSC تمرکز بیشتر مراجع روی جبران‌ساز خازن سری و TCSC است.
- تمرکز اصلی روش‌های پیشنهادی بیشتر بر روش‌های مبتنی بر آموزش و یادگیری مانند شبکه عصبی و یا ماشین بردار پشتیبان است.
- تمرکز بیشتر مراجع به ارائه راه حل‌های مبتنی بر تبدیل موجک با چالش‌ها انتخاب موجک مادر و تعیین سطح رزولوشن است.

جدول ۱. نتایج مقایسه مراجع پیشین و روش پیشنهادی

شماره مرجع	سال انتشار	شاخص ۱	شاخص ۲	شاخص ۳	شاخص ۴	شاخص ۵	شاخص ۶
[۱]	۲۰۱۳	SC	هوش مصنوعی	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	سخت	ندارد
[۲]	۲۰۱۵	SC	امواج سیار	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	متوسط	ندارد
[۳]	۲۰۱۹	SC	امواج سیار	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	سخت	ندارد
[۴]	۲۰۱۹	SC	امواج سیار	جریان	یک ترمینال	متوسط	ندارد
[۵]	۲۰۲۰	SC	فازوری	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	راحت	ندارد
[۶]	۲۰۲۰	SC	هوش مصنوعی	جریان	یک ترمینال	سخت	ندارد
[۷]	۲۰۲۲	SC	امواج سیار	جریان	یک ترمینال	متوسط	ندارد
[۸]	۲۰۰۷	TCSC	هوش مصنوعی	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	سخت	ندارد
[۹]	۲۰۱۱	TCSC	ترکیبی	جریان	یک ترمینال	سخت	ندارد
[۱۰]	۲۰۱۵	TCSC	هوش مصنوعی	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	سخت	ندارد
[۱۱]	۲۰۱۶	TCSC	هوش مصنوعی	جریان	یک ترمینال	سخت	ندارد
[۱۲]	۲۰۲۰	TCSC	ترکیبی	جریان	یک ترمینال	سخت	دارد
[۱۳]	۲۰۲۱	TCSC	امواج سیار	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	راحت	ندارد
[۱۴]	۲۰۲۳	TCSC	هوش مصنوعی	جریان	یک ترمینال	سخت	دارد
[۱۵]	۲۰۱۱	SSSC	امواج سیار	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	سخت	ندارد
[۱۶]	۲۰۱۲	SSSC	امواج سیار	جریان	یک ترمینال	متوسط	ندارد
[۱۷]	۲۰۱۴	SSSC	امواج سیار	جریان	یک ترمینال	متوسط	ندارد
[۱۸]	۲۰۱۵	SSSC	امواج سیار	ولتاژ و جریان	یک ترمینال	متوسط	ندارد
[۱۹]	۲۰۲۰	SSSC	فازوری	امواج سیار	ولتاژ و جریان	راحت	ندارد
[۲۰]	۲۰۲۰	SSSC	امواج سیار	جریان	یک ترمینال	متوسط	ندارد

۱-۴. سهم مشارکت و روش انجام پژوهش

در این مقاله یک روش جدید، برای تعیین فازهای تحت خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با SSSC متصل به یک مزرعه خورشیدی ارائه شده است. روش پیشنهادی از ضرایب تبدیل والش هادامارد فوریه سریع سیگنال جریان برای ارزیابی بهره برده است. این تبدیل ترکیبی از ویژگی‌های تبدیل والش و فوریه در مدل‌سازی دقیق سیگنال استفاده شده است. روش پیشنهادی در این مقاله براساس محاسبه این ضریب برای جریان هر فاز جهت تشخیص خطاهای فاز و همچنین، برای جریان توالی صفر لحظه‌ای جهت تشخیص خطای زمین استفاده شده است. روش پیشنهادی در قالب یک فلوجارت کامل در این مقاله ارائه شده و برای یک خط انتقال جبران‌شده با SSSC بدون توجه به بخش تحت خطا پیاده‌سازی شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده تبدیل فوریه والش هادامارد سریع برای تشخیص فاز تحت خطا نسبت به الگوریتم‌های دیگر بسیار دقیق‌تر و سریع‌تر است. نکات برجسته روش پیشنهادی به شرح ذیل هستند:

- استفاده از یک تبدیل جدید برای افزایش دقت و سرعت الگوریتم به منظور تعیین فاز تحت خطا
- استفاده از سیگنال جریان سه فاز تنها یک ترمینال
- عدم وابستگی الگوریتم به بخش تحت خطا (منظور سمت چپ و راست SSSC)
- عدم تأثیرپذیری الگوریتم از مود عملکرد SSSC و همچنین، مکان نصب SSSC
- حضور منبع تجدیدپذیر خورشیدی در تغذیه لینک DC تجهیز SSSC و عدم تأثیرگذاری آن در عملکرد الگوریتم پیشنهادی

۱-۵. سازمان‌دهی مقاله

این مقاله در چهار بخش سازماندهی شده است. در ادامه در بخش دوم، تئوری روش پیشنهادی آورده شده است. در این بخش ابتدا توپولوژی شبکه توضیح داده شده است، سپس در ادامه منطق روش پیشنهادی و در نهایت در قسمت آخر فلوجارت روش پیشنهادی آورده شده است. در بخش سوم، نتایج حاصل از پیاده‌سازی نرم‌افزاری روش پیشنهادی آورده شده است. در این قسمت سناریوهای مختلف خطا پیاده‌سازی شده و عملکرد الگوریتم پیشنهادی نقد و بررسی شده است. در نهایت، در قسمت چهارم مقاله، نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

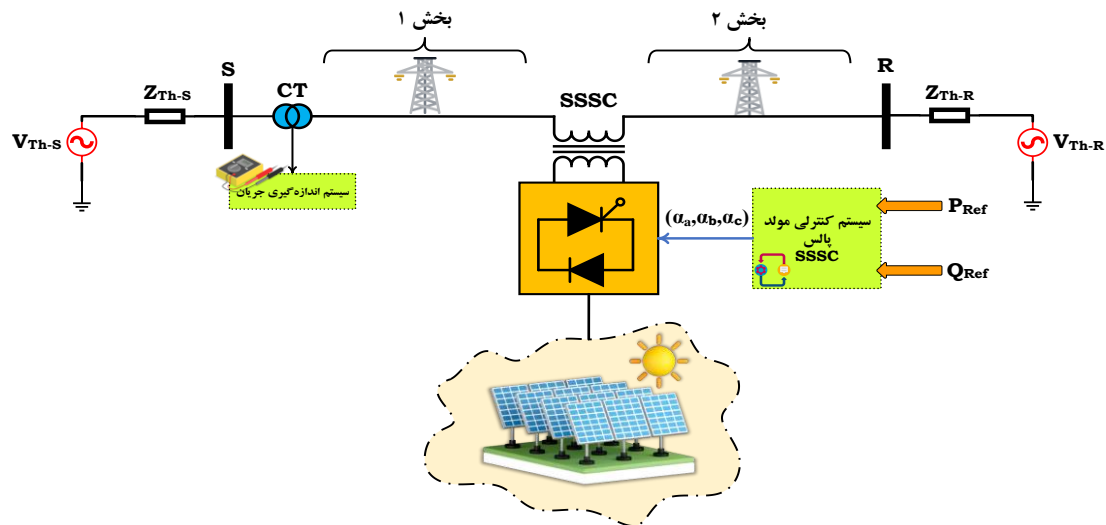
۲. روش پیشنهادی

۲-۱. معرفی دیاگرام تک‌خطی شبکه تحت مطالعه

شبکه تحت مطالعه در این مقاله، یک خط انتقال دو سوءتغذیه است که در وسط آن خط یک SSSC برای جبران‌سازی توان راکتیو نصب شده است. SSSC نصب‌شده در این خط، از طریق لینک DC به یک مزرعه خورشیدی متصل شده است. برای پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی از سیگنال جریان سه فاز ترمینال S استفاده شده است. هر دو طرف خط انتقال مورد نظر توسط منبع تونن مدل‌سازی شده است. در شکل ۱ دیاگرام تک‌خطی، شبکه تحت مطالعه نشان داده شده است.

۲-۲. الگوریتم تعیین فاز تحت خطا

خطوط انتقال سه فاز به طور کلی تحت ۱۱ نوع خطای اتصال کوتاه قرار می‌گیرند [۱۸-۲۰]. در این قسمت هدف ارائه الگوریتم کامل تشخیص فازهای تحت خطا در خطوط انتقال جبران‌شده با SSSC است. الگوریتم پیشنهادی از دیتاهای جریان اندازه‌گیری از ترمینال یک سمت خط برای تشخیص فاز تحت خطا بهره می‌برد. سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به عنوان ورودی تبدیل والش قرار می‌گیرند و در نهایت، متناسب با هر فاز ضرایب تبدیل والش هادامارد سریع محاسبه می‌شوند. از محاسبه مقدار پیک این ضرایب با مقادیر آستانه می‌توان فاز تحت خطا را مشخص کرد. یکی از برجستگی‌های روش پیشنهادی عدم وابستگی به مود بهره‌برداری شبکه و همچنین، سمت وقوع خطا در دو طرف تجهیز SSSC است. در ادامه ابتدا تئوری تبدیل والش، سپس منطق الگوریتم پیشنهادی و در نهایت فلوجارت الگوریتم پیشنهادی آورده شده است.



شکل ۱. دیاگرام تک‌خطی، خط انتقال جبران‌شده با SSSC

۲-۲-۱. تئوری تبدیل والش هادامارد فوریه سریع

در این مقاله از یک الگوریتم ترکیبی شامل دو تبدیل والش - آدامارد سریع و تبدیل فوریه گسسته با هدف تسریع در محاسبات و کاهش تعداد عملیات محاسباتی ریاضی و همچنین، تعریف شاخص‌های مختلف با هدف افزایش کارایی در قالب یک الگوریتم به نام radix-4 FWHFT استفاده شده است. در این تبدیل به‌وجودآمده محاسبات سریع یک توالی که طول آن برابر توان چهار است، صورت گرفته است. این تبدیل پیش‌تر در کاربردهای مخابراتی برای حل چالش‌های ارتباطاتی بی‌سیم استفاده شده است. در این مقاله برای افزایش دقت روش پیشنهادی و همچنین، افزایش سرعت تشخیص از عملکرد موفقیت‌آمیز این تبدیل استفاده شده است [۲۱]. الگوریتم radix-4 FWFT با فرموله کردن ماتریس T_N آغاز می‌شود، ماتریسی که در واقع حاصل ضرب ماتریس WHT در ماتریس DFT است:

$$T_N = \frac{1}{N} H_N \hat{F}_N \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱، \hat{F}_N برای نشان دادن ماتریس DFT به صورت radix-4 به کار می‌رود و همچنین، در این رابطه H_N ماتریس والش-آدامارد است. در این رابطه $N = 4^m$ است و تمام روابط در ادامه متناسب با این مقدار توسعه یافته‌اند. برای توصیف \hat{F}_N و H_N می‌توان از ترتیب از روابط ۲ و ۳ استفاده کرد.

$$\hat{F}_N = (I_4 \otimes \hat{F}_{4^{m-1}}) A_{4^m} (\hat{F}_4 \otimes I_{4^{m-1}}) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$H_N = (I_4 \otimes H_{4^{m-1}}) (H_4 \otimes I_{4^{m-1}}) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در روابط یادشده H_4 و \hat{F}_4 از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آیند.

$$\hat{F}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -j & -1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & j & -1 & -j \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۵}$$

همچنین، می‌توان A_N را از رابطه ۶ به دست آورد.

$$A_N = (I_{4^{m-1}} \oplus D_{4^{m-1}} \oplus D_{4^{m-1}}^2 \oplus D_{4^{m-1}}^3) \quad \text{رابطه ۶}$$

در اینجا $I_{N/4}$ یک ماتریس واحد از مرتبه $N/4$ بوده، عملگرهای \otimes و \oplus بیانگر به ترتیب ضرب تنسور و جمع مستقیم هستند.

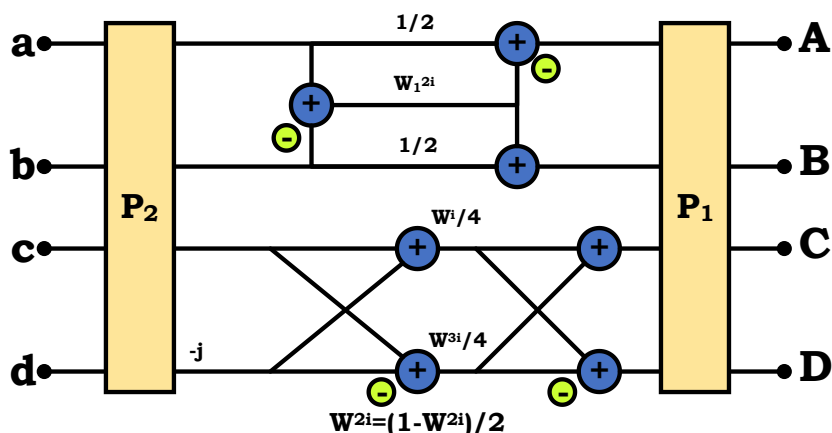
با جای‌گذاری ۲ و ۳ در رابطه ۱، ماتریس کلی T radix-4 از مرتبه $N = 4^m$ را می‌توان به صورت رابطه ۷ نوشت:

$$T_N = \frac{1}{N} (I_4 \otimes H_{4^{m-1}}) (H_4 \otimes I_{4^{m-1}}) \times (I_4 \otimes \hat{F}_{4^{m-1}}) \Delta_{4^m} (\hat{F}_4 \otimes I_{4^{m-1}}) \quad \text{رابطه ۷}$$

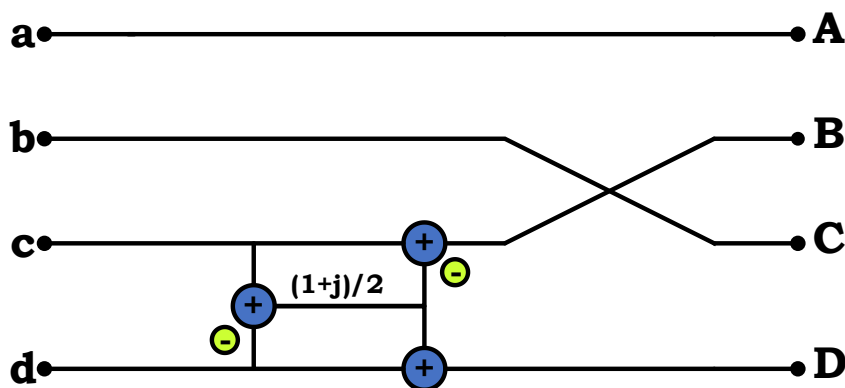
در نهایت با اعمال یک سری محاسبات ریاضی می‌توان معادله ۷ را به صورت معادله ۸ توسعه داد.

$$T_N = \prod_{i=0}^{m-1} (I_{4^{m-i-1}} \otimes H_4 \otimes I_{4^i}) \left(I_{4^{m-i-1}} \otimes \frac{1}{4} \Delta_{4^{i+1}} \right) \times (I_{4^{m-i-1}} \otimes \hat{F}_4 \otimes I_{4^i}) \quad \text{رابطه ۸}$$

تبدیل‌ها با ماتریس‌هایی که در معادله ۸ توصیف شده را می‌توان با کمک ساختار پروانه‌ای در مکان که در شکل ۲ نشان داده شده است محاسبه کرد. الگوریتم radix-4 FWFT مبتنی بر تفکیک ماتریس تبدیل به ضرب ماتریس‌های پراکنده است که هر سطر فقط چهار درایه غیرصفر دارد. همچنین، وقتی $i = 0$ باشد می‌توان صرفه‌جویی زیادی در عملیات حسابی به صورت شکل ۳ داشت. الگوریتم در نظر گرفته شده نسبت به الگوریتم‌های WHT و DFT، $1 - \frac{N}{4}$ ضرب مختلط کمتر و $\frac{N}{4} \log_4 N + 4(N - 1)$ جمع مختلط کمتر دارد که این مسئله از نظر سرعت محاسبات ریاضی بسیار سریع‌تر و قوی‌تر عمل می‌کند.



شکل ۲. یک پروانه منفرد از الگوریتم radix-4 FWFT



شکل ۳. پروانه جزئی radix-4 FWFT وقتی $i = 0$

۲-۲-۲. منطق الگوریتم پیشنهادی FWHFTC

در این قسمت برای تشخیص وقوع خطا، از $FWHFTC_i$ هر سه فاز ($i=a, b, c$) استفاده شده است. طبق نتایج شبیه‌سازی حاصل از پیاده‌سازی سناریوهای مختلف، در صورتی که مقدار $\max(FWHFTC_i)$ یک سیکل نسبت به سیکل قبل خود از مقدار Th_0 (این مقدار آستانه با توجه به توپولوژی شبکه در پیاده‌سازی سناریوهای مختلف خطا قابل محاسبه است) بیشتر شده است، احتمالاً وقوع خطا است. در صورتی که این اتفاق برای هر سه فاز به طور هم‌زمان اتفاق افتاده باشد، خطا به صورت متقارن است و در صورتی که این اتفاق برای حداقل یک فاز اتفاق افتاده، حتماً خطا به صورت نامتقارن است. همچنین، برای تقویت این منطق هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه نامتقارن می‌توان از اطلاعات دوره خطا برای هر فاز نسبت به دو فاز دیگر هم استفاده کرد. این روش به این صورت است که اگر مقدار $\max(FWHFTC_i)$ یک فاز به طور هم‌زمان از $Th_0 * \max(FWHFTC_i)$ دو فاز دیگر و یا اینکه $\max(FWHFTC_i)$ دو فاز به طور هم‌زمان از مقدار $Th_0 * \max(FWHFTC_i)$ یک فاز دیگر بیشتر باشد، در این صورت حتماً خطای نامتقارن اتفاق افتاده است که مقدار Th_0 در نظر گرفته تقریباً $1/1$ است. با استفاده از این تکنیک می‌توان پدیده وقوع خطا و همچنین، متقارن بودن و نامتقارن بودن آن را نیز تشخیص داد. در ادامه برای تشخیص خطای زمین در این مقاله از جریان توالی صفر استفاده شده است. اگر مقدار $FWHFTC_0$ از مقدار Th_1 بیشتر باشد نشان‌دهنده وقوع خطای زمین است و در غیر این صورت خطای اتفاق افتاده از نوع فاز به فاز است. این مقدار Th_1 از رابطه ۹ به دست می‌آید. با توجه به رابطه ۹، مقادیر $FWHFTC_i$ در نظر گرفته شده از یک دوره سیگنال جریان قبل از وقوع خطا در شرایط نرمال محاسبه شده است.

$$Th_1 = 1\% * \max(FWHFTC_A, FWHFTC_B, FWHFTC_C) \quad (\text{رابطه ۹})$$

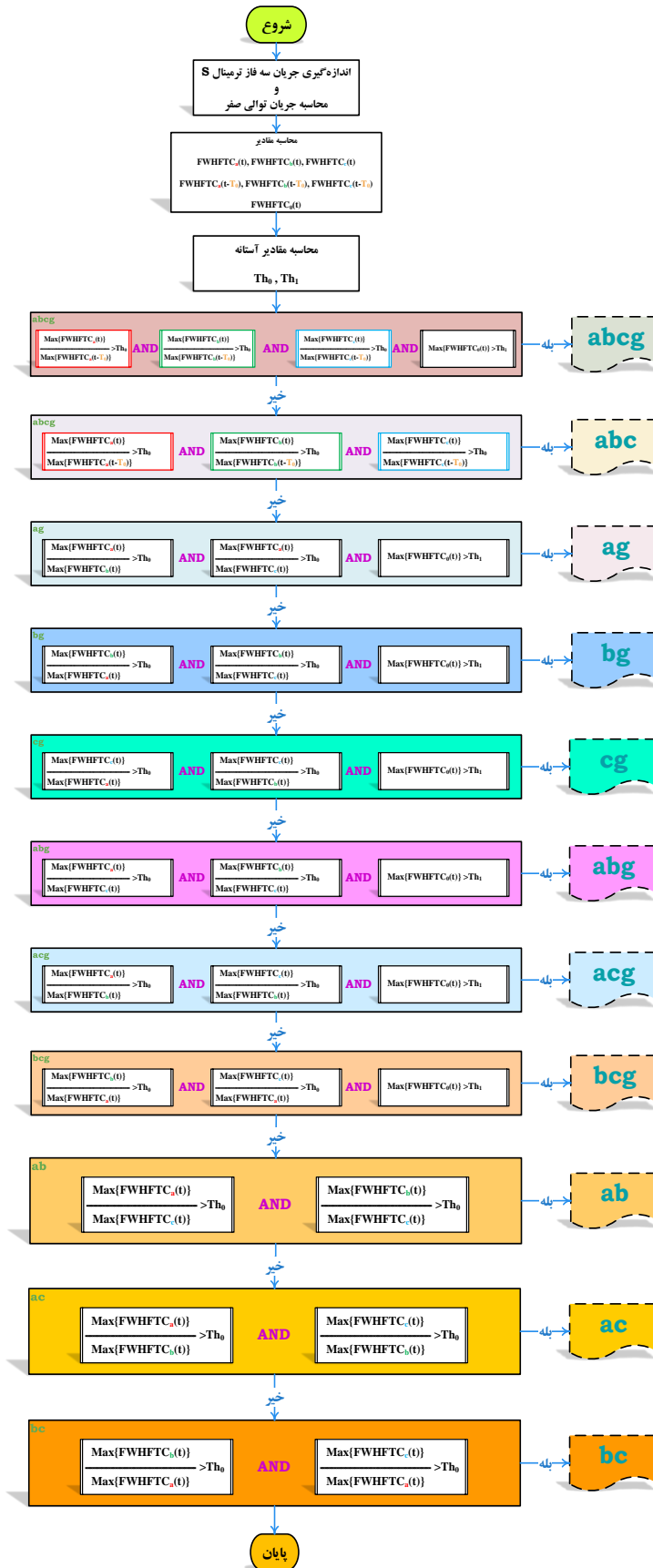
۲-۳. فلوجارت روش پیشنهادی

در این قسمت ساختار کلی طرح پیشنهادی مبتنی بر منطق ارائه شده در قسمت قبل آورده شده است. روش پیشنهادی در قالب یک فلوجارت نهایی در شکل ۴، برای تشخیص فازهای تحت خطا نشان داده شده است. در این روش ابتدا جریان‌های سه فاز ترمینال S و سپس جریان توالی صفر محاسبه می‌شود، در ادامه مقادیر $FWHFTC$ سه فاز حین خطا و سه فاز بعد از خطا محاسبه می‌شود و به همراه مقادیر آستانه الگوریتم آماده تشخیص فازهای تحت خطا می‌شود. دستورهای در نظر گرفته شده برای تشخیص انواع اتصال کوتاه شامل، سه خطای تک‌فاز به زمین، سه خطای دوفاز به زمین، سه خطای دوفاز و دو خطای سه‌فاز طراحی شده‌اند.

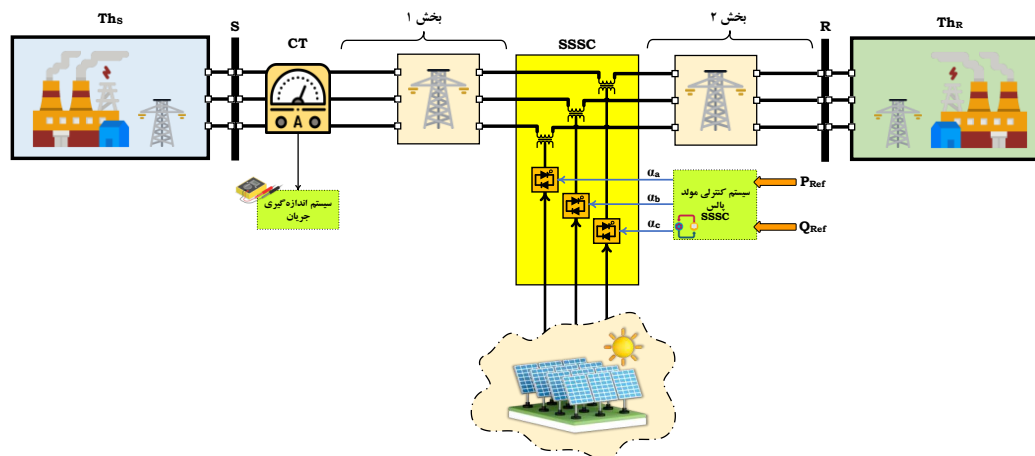
۳. نتایج شبیه‌سازی

۳-۱. معرفی شبکه سه فاز تحت مطالعه

در این قسمت شبکه تحت مطالعه در این مقاله آورده شده است. در شکل ۵، دیاگرام سه فاز کامل شبکه تحت مطالعه آورده شده است. این شبکه شامل یک خط انتقال است که در وسط آن یک SSSC مبتنی بر مزرعه خورشیدی برای جبران‌سازی توان نصب شده است. با توجه به اینکه این SSSC در وسط خط قرار گرفته است، احتمال وقوع خطا در هر دو سمت SSSC وجود دارد. طرح پیشنهادی در این مقاله، با اندازه‌گیری جریان سه فاز ترمینال S و اعمال یک سری محاسبات ریاضی قادر به تشخیص فاز تحت خطا در زمان اتصال کوتاه در هر دو سمت SSSC است. اطلاعات کامل شبکه تحت مطالعه برای پیاده‌سازی در نرم‌افزار متلب در جدول ۲ مقاله آورده شده است.



شکل ۴. فلوجارت طرح پیشنهادی



شکل ۵. دیاگرام سه فاز شبکه تحت مطالعه پیاده‌سازی شده در سیمولینک نرم‌افزار متلب

جدول ۲. اطلاعات شبکه تحت مطالعه ترسیم شده در شکل ۵

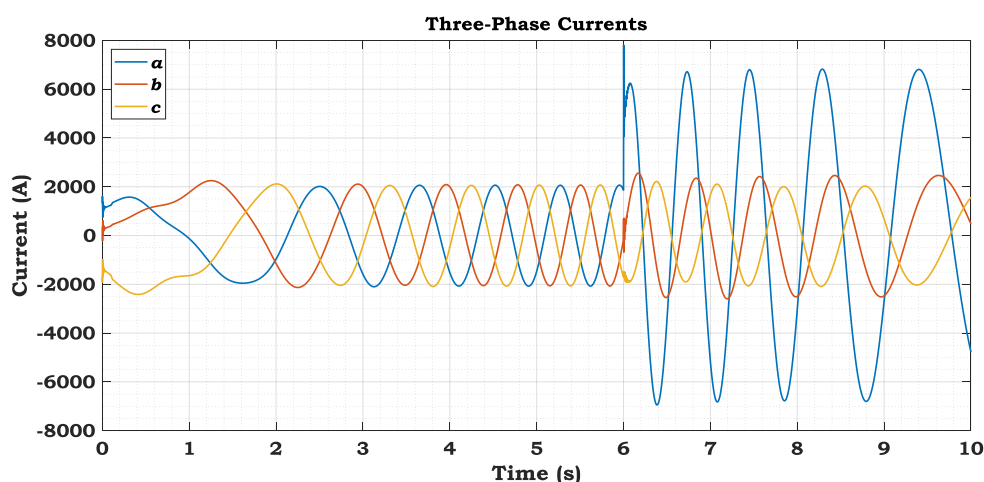
مقدار	پارامترهای خط
۰/۰۲۵۴۶	مقاومت توالی مثبت R_1 برحسب اهم بر کیلومتر
۰/۳۸۶۴	مقاومت توالی صفر R_0 برحسب اهم بر کیلومتر
۰/۰۰۰۹۳	اندوکتانس توالی مثبت L_1 برحسب هانری بر کیلومتر
۰/۰۰۴۱۲۶۴	اندوکتانس توالی صفر L_0 برحسب هانری بر کیلومتر
$10^{-1} \times 1/27$	کاپاسیتانس توالی مثبت C_1 برحسب فاراد بر کیلومتر
$10^{-9} \times 7/751$	کاپاسیتانس توالی صفر C_0 برحسب فاراد بر کیلومتر
۱۵۰	طول تکه خط بر حسب کیلومتر
۵۰	فرکانس خط بر حسب هرترتز
مقدار	پارامترهای پنل خورشیدی
۲۰۰۰	تعداد ماژول‌های موازی
۴۶۹	تعداد ماژول‌های سری شده در هر پنل
۴۰۴/۸۰۱	حداکثر توان هر ماژول (W)
۱۲۸	سلول در هر ماژول (Ncell)
۸۵/۳	ولتاژ مدار باز ماژول Voc (V)
۶/۰۹	جریان اتصال کوتاه Isc (A)
۷۲/۹	ولتاژ در نقطه حداکثر توان Vmp (V)
۵/۶۹	جریان در نقطه حداکثر توان Imp (A)
-۰/۲۲۹	ضریب دمایی Voc (%/deg.C)
۰/۰۳۰۷۰۶	ضریب دمایی Isc (%/deg.C)
مقدار	مشخصات مدار معادل‌های تونن دو سمت خط
۵۰۰	ولتاژ نامی بر حسب کیلوولت
۰ و ۲۰ درجه	زاویه ولتاژ شین S و R
۵۰	فرکانس نامی بر حسب هرترتز
۱/۰۰۲۰۸	ولتاژ توالی مثبت اولیه بر حسب پریونیت
۲۰/۹۵۱۴	زاویه توالی مثبت اولیه بر حسب درجه
مقدار	مشخصات SSSC
۵۰۰	ولتاژ نامی بر حسب کیلوولت
۵۰	فرکانس نامی بر حسب هرترتز
۱۰۰	توان نامی کانورتر سری بر حسب مگاوات آمپر
۰/۱	ولتاژ تزریقی بر حسب پریونیت
۰/۰۰۵۳۳	R بر حسب پریونیت
۰/۱۶	L بر حسب پریونیت
۴۰۰۰۰	ولتاژ لینک DC بر حسب ولت
۰/۰۰۰۳۷۵	خازن لینک DC بر حسب فاراد

۳-۲. نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف

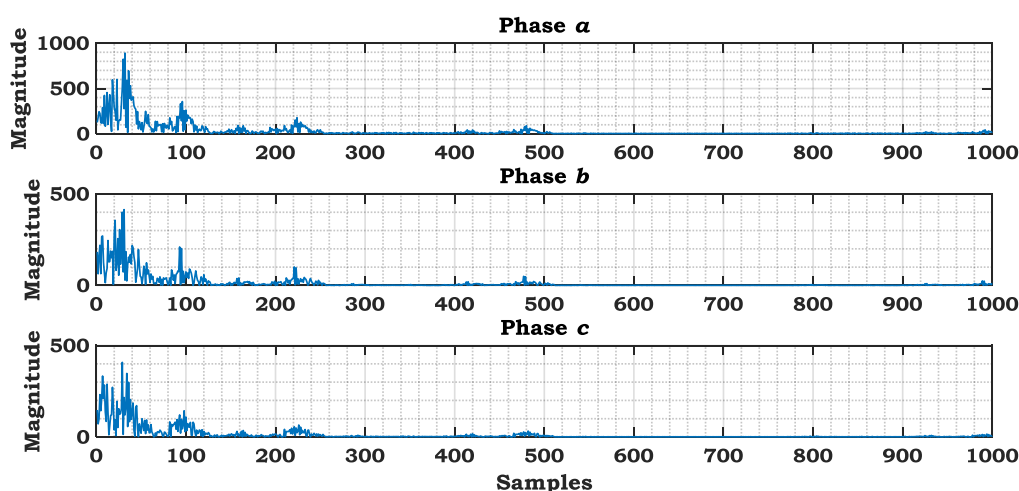
در این بخش، انواع خطاهای مختلف روی سیستم مورد مطالعه شبیه‌سازی شده و عملکرد روش تشخیص و دسته‌بندی مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی ارزیابی می‌شود.

۳-۲-۱. آنالیز سناریوی ۱

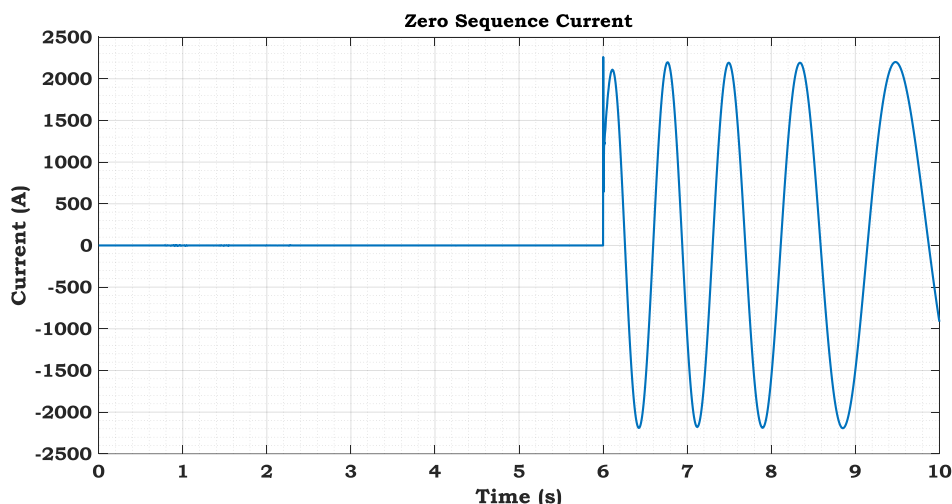
در این سناریو فرض شده است که یک خطای ag (اتصال فاز a به زمین) در فاصله ۶۰ کیلومتری از ترمینال S در زمان $t=6\text{sec}$ با مقاومت ۱ اهم اتفاق افتاده است. جریان سه فاز اندازه‌گیری شده از این ترمینال در بازه زمانی خطا در شکل ۶ آورده شده است. در ادامه، نتایج حاصل از پیاده‌سازی تبدیل فوریه والش هادامارد سریع و در نهایت $FWHFTC_i$ متناسب با هر سه فاز در شکل ۷ آورده شده است. طبق نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی الگوریتم در این قسمت مشخص است که حتماً فاز a تحت خطا است. در مرحله بعد طبق شکل ۸، جریان توالی صفر اندازه‌گیری شده روی ترمینال S برای تشخیص خطای فاز به زمین استفاده خواهد شد. طبق نتایج به دست آمده از محاسبه $FWHFTC_i$ در شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد خطای اتفاق افتاده به صورت زمین شده است. طبق فلوجارت شکل ۴ مقدار ماکزیمم $FWHFTC_i$ فاز a نسبت به دو فاز دیگر به طور هم‌زمان به میزان Th_0 بیشتر است و همچنین $FWHFTC_0$ از مقدار Th_1 کمتر است. در مجموع طبق نتایج حاصل از تحلیل این سناریو مشخص است که خطای اتفاق افتاده از نوع تک‌فاز به زمین ag است.



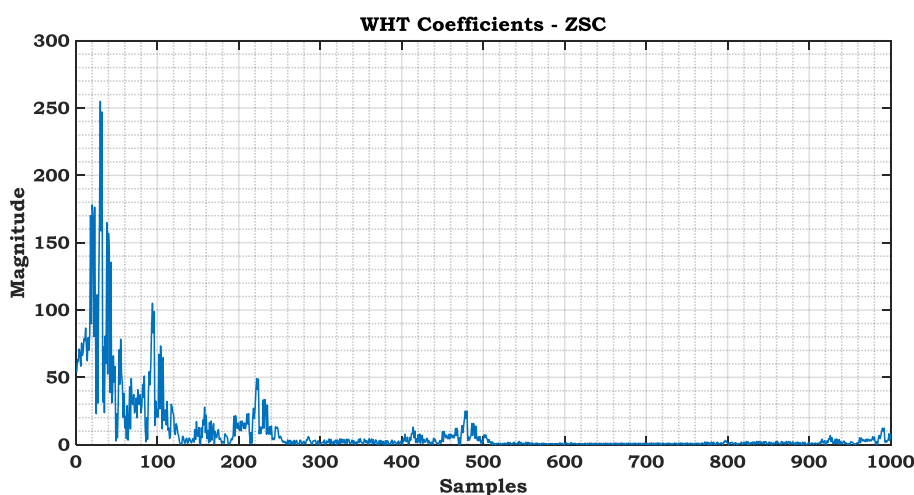
شکل ۶. جریان‌های سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال S در سناریوی ۱



شکل ۷. نتایج $FWHFTC_i$ هر سه فاز جریان در سناریوی ۱



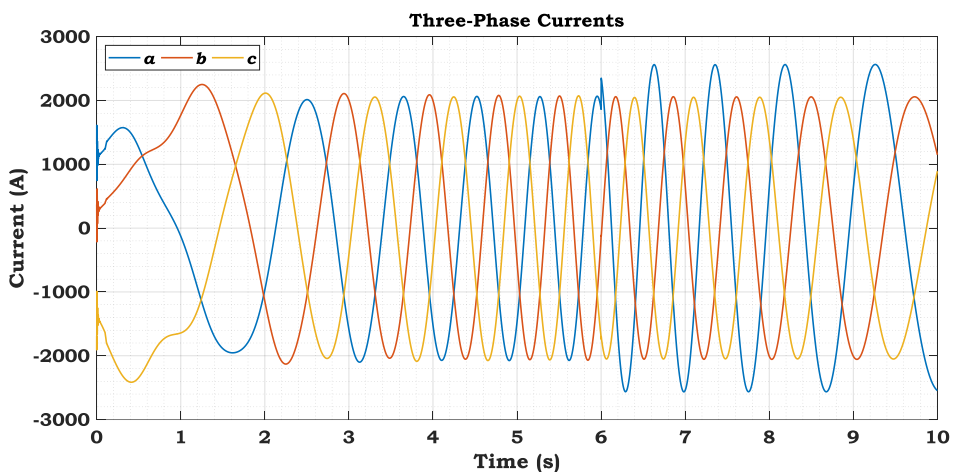
شکل ۸. جریان توالی صفر اندازه‌گیری شده از ترمینال S در سناریوی ۱



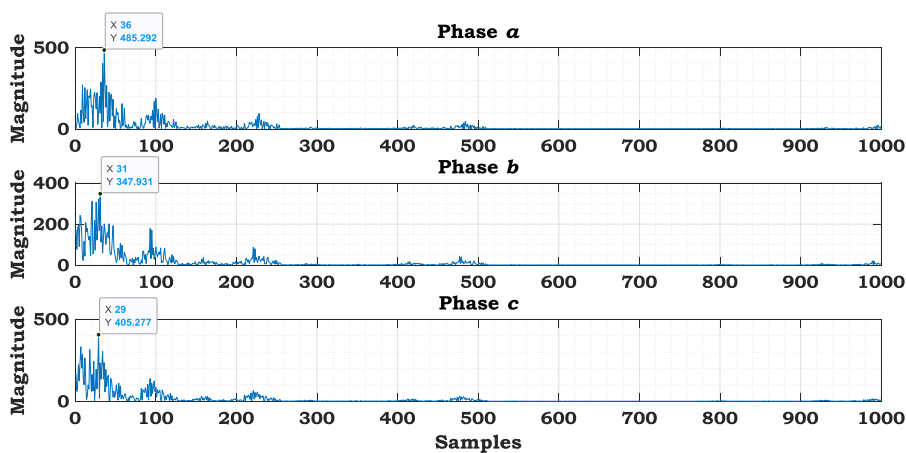
شکل ۹. نتایج FWHFTC_i جریان توالی صفر S در سناریوی ۱

۲-۲-۳. آنالیز سناریوی ۲

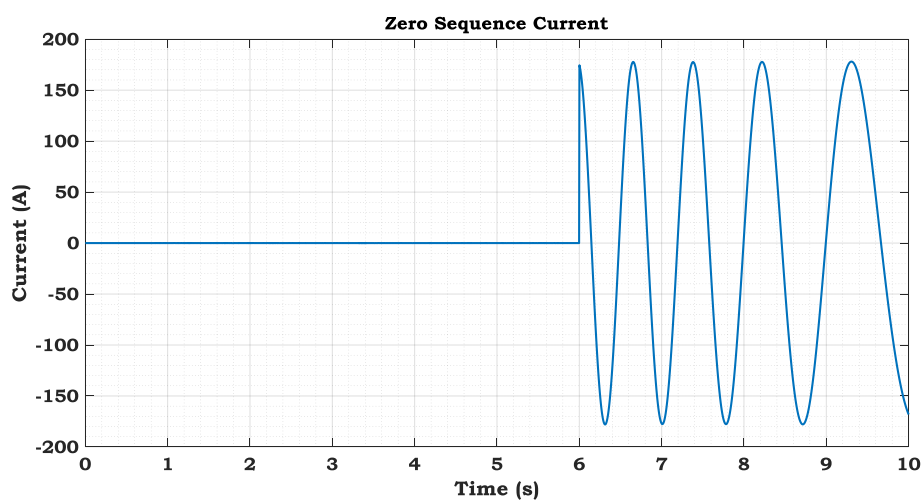
در این سناریو فرض شده است که یک خطای ag (اتصال فاز a به زمین) در فاصله ۸۰ کیلومتری از ترمینال S در زمان $t=6\text{sec}$ با مقاومت ۵۰۰ اهم اتفاق افتاده است. در این سناریو نسبت به سناریوی قبلی هدف تست خطای امپدانس بالا است. جریان سه فاز و نتایج حاصل از پیاده‌سازی FWHFTC_i برای هر سه فاز به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. همچنین، جریان توالی صفر و FWHFTC_i مربوط به آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. طبق فلوجارت شکل ۴ مقدار ماکزیمم FWHFTC_i فاز a نسبت به دو فاز دیگر به طور هم‌زمان به میزان Th_0 بیشتر است و همچنین، FWHFTC₀ از مقدار Th_1 کمتر است. طبق نتایج به‌دست‌آمده و پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در این مقاله مشخص است که خطا از نوع تک‌فاز به زمین ag نتایج یادشده نشان می‌دهد علی‌رغم افزایش امپدانس خطا و ناچیز بودن انحراف دامنه جریان‌های اندازه‌گیری‌شده، باز هم روش پیشنهادی قادر است تشخیص و دسته‌بندی خطا را به‌خوبی انجام دهد. در این حالت هرچند اختلاف مقادیر پیک در طیف ضرایب محاسبه‌شده متناظر با جریان‌های سه‌فاز با هم کم است، اما باز هم فازی که دچار خطا شده است دارای بیشترین مقدار پیک خواهد بود.



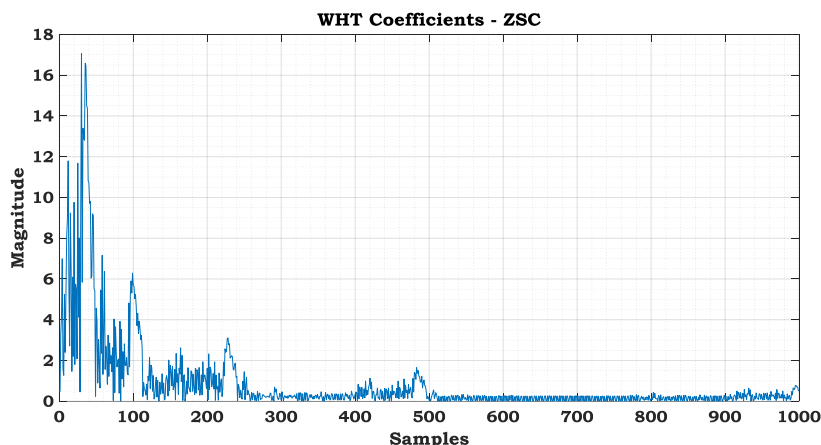
شکل ۱۰. جریان‌های سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال S در سناریوی ۲



شکل ۱۱. نتایج FWHFTC_i هر سه فاز جریان در سناریوی ۲



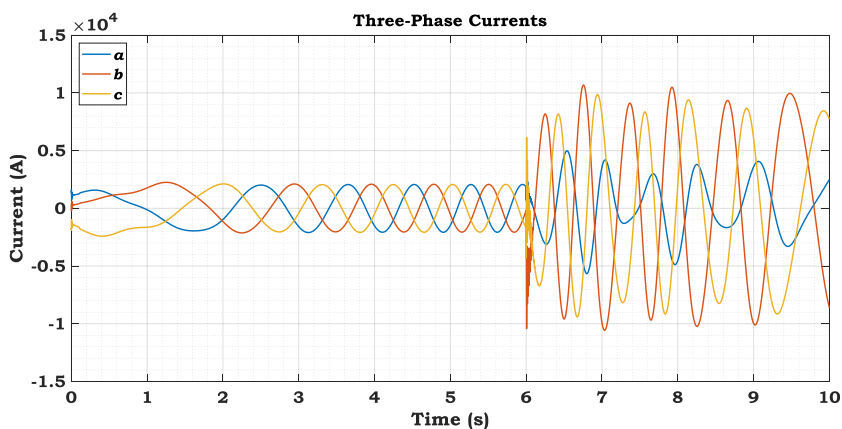
شکل ۱۲. جریان توالی صفر اندازه‌گیری شده از ترمینال S در سناریوی ۲



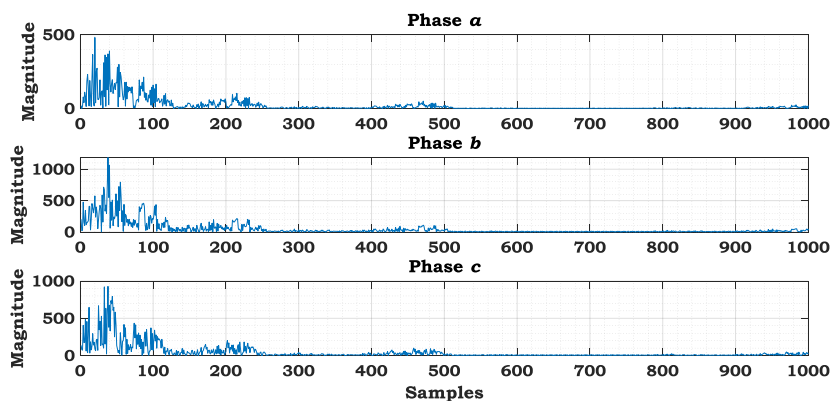
شکل ۱۳. نتایج $FWHFTC_i$ جریان توالی صفر S در سناریوی ۲

۳-۲-۳. آنالیز سناریوی ۳

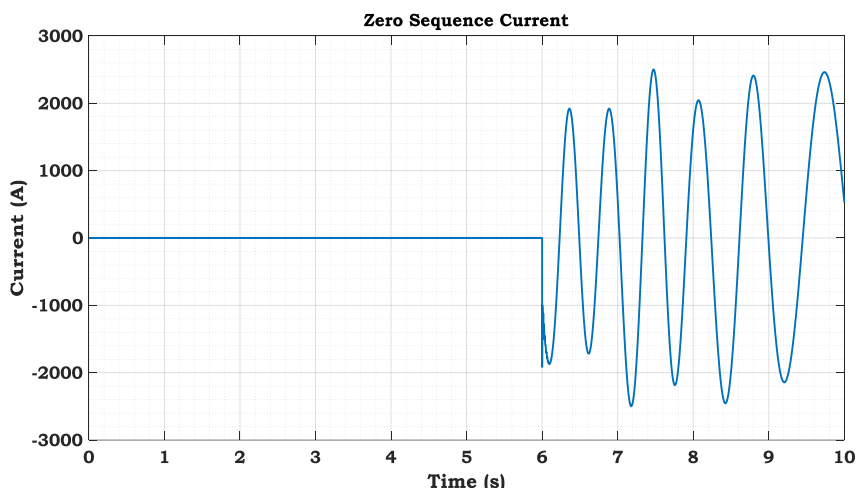
در این سناریو فرض شده است که یک خطای bcg (اتصال فاز b و c به زمین) در فاصله ۲۰ کیلومتری از ترمینال S در زمان $t=6\text{sec}$ با مقاومت ۱۰ اهم اتفاق افتاده است. جریان سه فاز و نتایج حاصل از پیاده‌سازی $FWHFTC_i$ برای هر سه فاز به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ آورده شده است. همچنین جریان توالی صفر و $FWHFTC_i$ مربوط به آن در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. طبق فلوجارت شکل ۴، $FWHFTC_i$ فاز b و c به طور هم‌زمان نسبت به $FWHFTC_i$ فاز a از میزان Th_0 بزرگ‌تر است و همچنین $FWHFTC_0$ نسبت به Th_1 بزرگ‌تر است که این نشان‌دهنده وقوع خطا در دوفاز b و c به صورت زمین شده است.



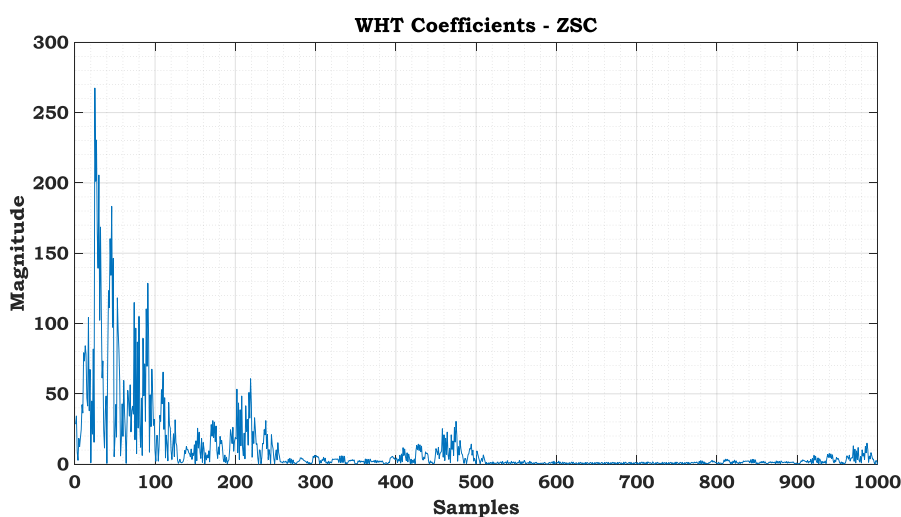
شکل ۱۴. جریان‌های سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال S در سناریوی ۳



شکل ۱۵. نتایج $FWHFTC_i$ هر سه فاز جریان در سناریوی ۳

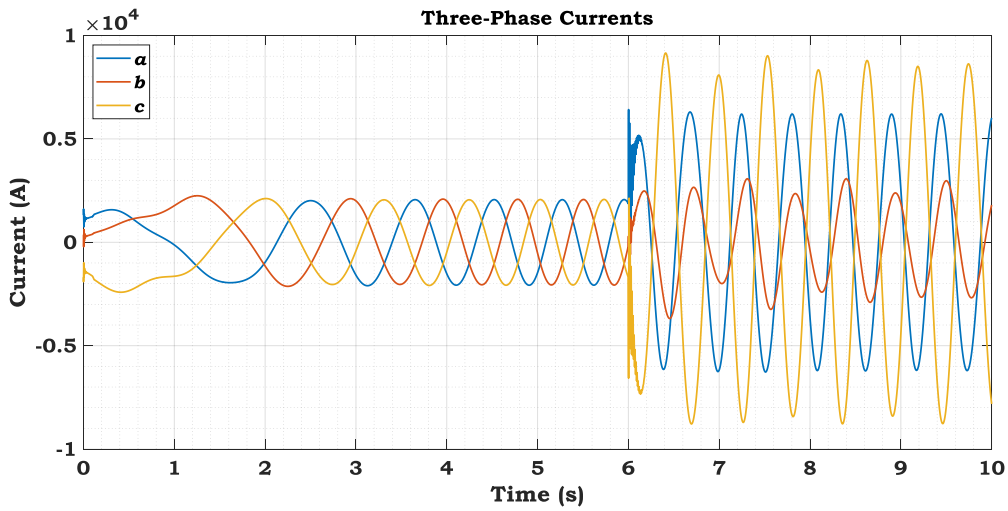


شکل ۱۶. جریان توالی صفر اندازه‌گیری شده از ترمینال S در سناریوی ۳

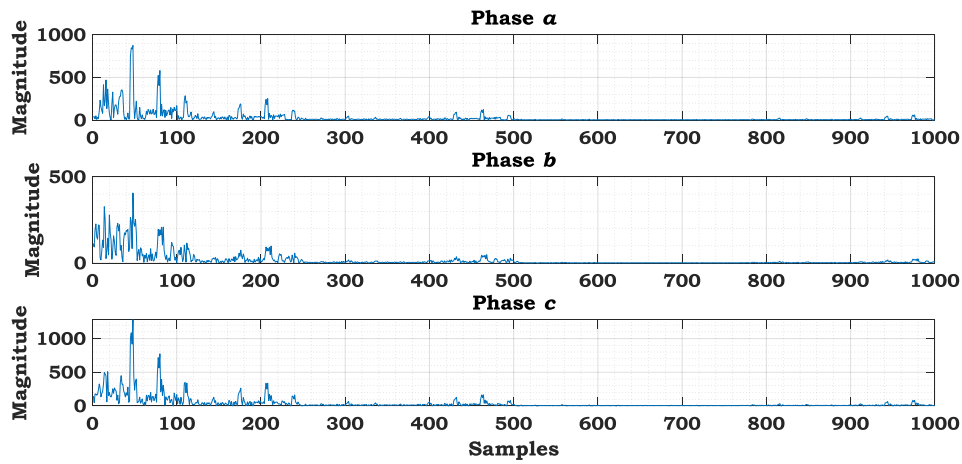
شکل ۱۷. نتایج $FWHFTC_i$ جریان توالی صفر S در سناریوی ۳

۳-۲-۴. آنالیز سناریوی ۴

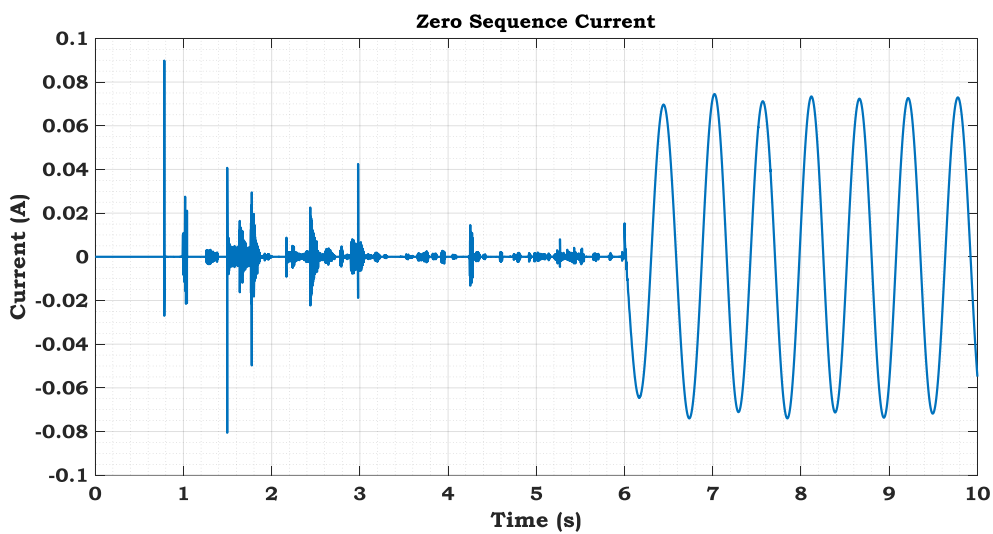
در این سناریو فرض شده است که یک خطای ac (اتصال فاز a و c به هم) در فاصله ۹۰ کیلومتری از ترمینال S در زمان $t=6\text{sec}$ با مقاومت ۲۰ اهم اتفاق افتاده است. جریان سه فاز اندازه‌گیری شده از این ترمینال در بازه زمانی خطا در شکل ۱۸ آورده شده است. در ادامه نتایج حاصل از پیاده‌سازی تبدیل فوریه والش هادامارد سریع و در نهایت $FWHFTC_i$ متناسب با هر سه فاز در شکل ۱۹ آورده شده است. در مرحله بعد طبق شکل‌های ۲۰ و ۲۱، جریان توالی صفر اندازه‌گیری شده روی ترمینال S برای تشخیص زمین بودن یا نبود اتصال کوتاه نشان داده شده است. طبق فلوجارت ارائه شده در شکل ۴، پس از طی ۸ بلوک اول، نوبت به سه بلوک آخر می‌رسد. با توجه به اینکه، شرط بزرگ بودن $FWHFTC_i$ نسبت به Th_0 صادق نبوده است، لذا اطمینان حاصل می‌شود که خطا از نوع زمین شده نیست و حتماً به صورت دو فاز است و با توجه به اینکه، $FWHFTC_i$ هر دو فاز a و c نسبت به فاز b به طور هم‌زمان بزرگ‌تر از Th_1 هستند لذا خطا به صورت دو فاز ac اتفاق افتاده است.



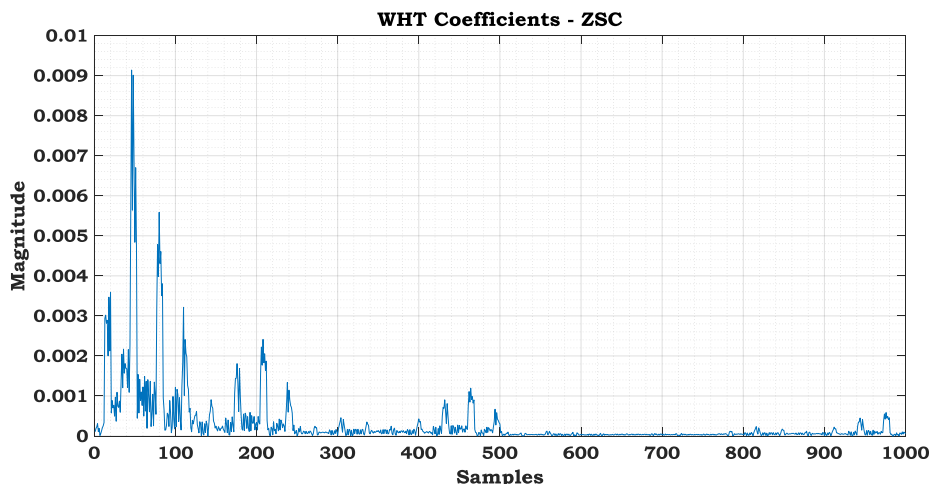
شکل ۱۸. جریان‌های سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال S در سناریوی ۴



شکل ۱۹. نتایج FWHFTCi هر سه فاز جریان در سناریوی ۴

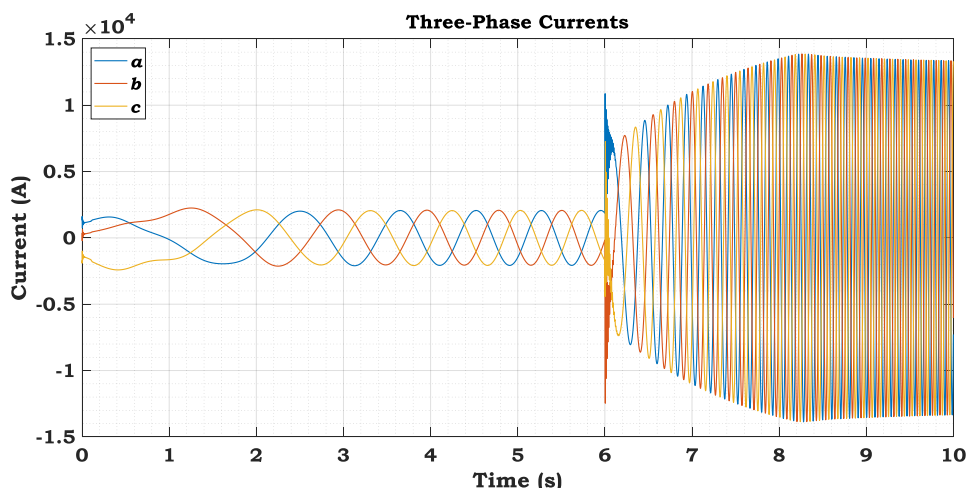


شکل ۲۰. جریان توالی صفر اندازه‌گیری شده از ترمینال S در سناریوی ۴

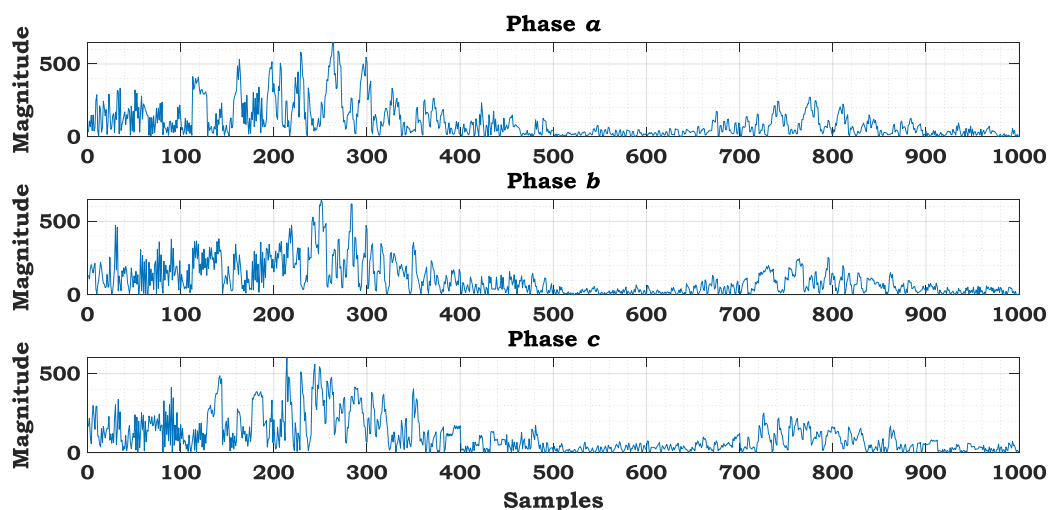
شکل ۲۱. نتایج $FWHFTC_i$ جریان توالی صفر S در سناریوی ۴

۳-۲-۵. آنالیز سناریوی ۵

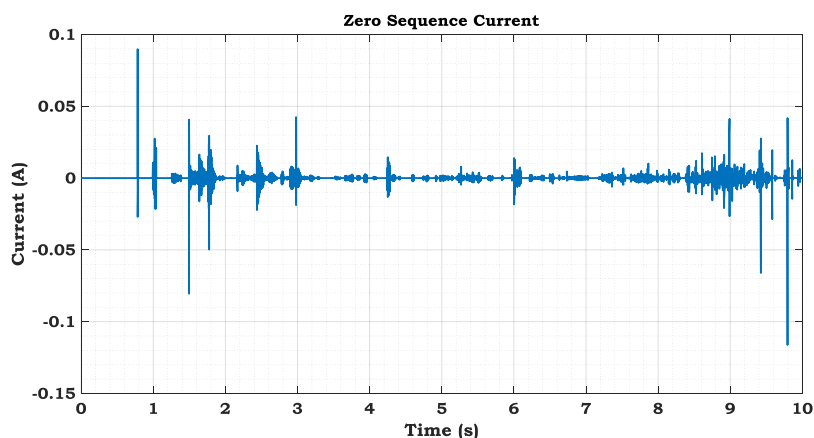
در این سناریو فرض شده است که یک خطای ABC (اتصال هر سه فاز a، b و c به هم) در فاصله ۴۰ کیلومتری از ترمینال S در زمان $t=6\text{sec}$ با مقاومت ۱ اهم اتفاق افتاده است. جریان سه فاز اندازه‌گیری شده از این ترمینال در بازه زمانی خطا در شکل ۲۲ آورده شده است. در ادامه نتایج حاصل از پیاده‌سازی تبدیل فوریه والش هادامارد سریع و در نهایت $FWHFTC_i$ متناسب با هر سه فاز در شکل ۲۳ آورده شده است. در مرحله بعد طبق شکل‌های ۲۴ و ۲۵، جریان توالی صفر اندازه‌گیری شده روی ترمینال S برای تشخیص زمین بودن یا نبود اتصال کوتاه نشان داده شده است. طبق فلوجارت ارائه شده در شکل ۴، طبق روند سریال بلوک‌ها مشاهده می‌شود که این خطا از نوع سه فاز زمین نشده نیست لذا در بلوک دوم، هر سه فاز نسبت به یک سیکل قبل در زمان خطا، مقدار $FWHFTC_i$ نسبت به Th_0 برای هر سه فاز بزرگ‌تر است، لذا خطا به صورت abc اتفاق افتاده است.



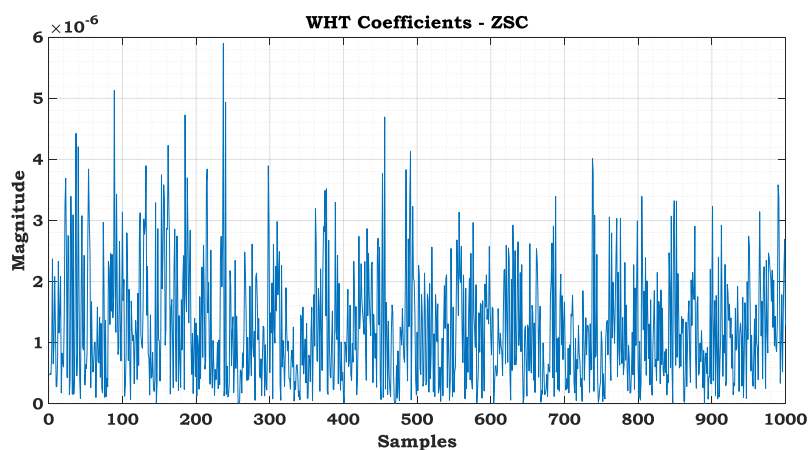
شکل ۲۲. جریان‌های سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال S در سناریوی ۵



شکل ۲۳. نتایج FWHFTC_i هر سه فاز جریان در سناریوی ۵



شکل ۲۴. جریان توالی صفر اندازه‌گیری شده از ترمینال S در سناریوی ۵



شکل ۲۵. نتایج FWHFTC_i جریان توالی صفر S در سناریوی ۵

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید مبتنی بر آنالیز سیگنال یک سمت برای تشخیص فاز تحت خطا در خطوط انتقال جبران شده با SSSC آورده شده است. تجهیز SSSC به دلیل اینکه به صورت سری در خط قرار می‌گیرد، در زمان وقوع خطا، به طور مؤثر

فازهای سالم را هم تحت تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل اینکه سیستم کنترلی این تجهیز برای صدور فرمان کنترلی از ترکیب سه فاز استفاده می‌کند، لذا در زمان وقوع خطا دچار واگرایی می‌شود و فازهای سالم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. روش پیشنهادی در این مقاله تنها با استفاده از سیگنال جریان سه فاز یک ترمینال و با استفاده از آنالیز ضریب تبدیل فوریه والش هادامارد سریع به عنوان یک شاخص ارزیابی و مقایسه، قادر به تشخیص فاز تحت خطا در زمان اتصال کوتاه است. تئوری ارائه شده در این مقاله بر اساس اندازه‌گیری و محاسبه ضرایب تبدیل مورد نظر در قالب یک الگوریتم سریال برای انواع خطاهای اتصال کوتاه توسعه یافته است. روش پیشنهادی در این مقاله مستقل از مود عملکرد SSSC است و برای انواع خطاها در دو سمت این جبران‌ساز عملکرد بسیار مناسبی دارد. روش پیشنهادی برای ۲۶۰۰ نوع خطا تست و ارزیابی شده است. جامع آماری در نظر گرفته شده، به ازای انواع اتصال کوتاه‌ها در فازهای مختلف، در دو سمت SSSC و برای پنج نوع مقاومت ۱، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ و همچنین برای زمان‌های مختلف مود بهره‌برداری SSSC در نظر گرفته شده است. طبق نتایج به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی و پیاده‌سازی سناریوهای مختلف خطا، صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی نسبت به سناریوهای تست ۹۶ درصد است. با توجه به اینکه روش پیشنهادی برای تمام خطاهای اتصال کوتاه در دو سمت SSSC توسعه یافته است و همچنین از جریان یک سمت فقط استفاده می‌کند، لذا نسبت به روش‌های ارائه شده در مراجع پیشین مطلوب‌تر ارزیابی می‌شود.

منابع

- [1] ÇÖTELİ R. A combined protective scheme for fault classification and identification of faulty section in series compensated transmission lines. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2013;21(7):1842-56.
- [2] Gawali NU, Hasabe R, Vaidya A. A comparison of different mother wavelet for fault detection & classification of series compensated transmission line. *Int. J. Innov. Res. Sci. Technol*. 2015 Feb;1(9):57-63.
- [3] Swetapadma A, Mishra P, Yadav A, Abdelaziz AY. A non-unit protection scheme for double circuit series capacitor compensated transmission lines. *Electric Power Systems Research*. 2017 Jul 1;148:311-25.
- [4] Kapoor G. A protection technique for series capacitor compensated 400 kV double circuit transmission line based on wavelet transform including inter-circuit and cross-country faults. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2019 Apr 4;11(2):1-20.
- [5] Abd el-Ghany HA, Elsadd MA, Ahmed ES. A faulted side identification scheme-based integrated distance protection for series-compensated transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019 Dec 1;113:664-73.
- [6] Swetapadma A, Yadav A, Abdelaziz AY. Intelligent schemes for fault classification in mutually coupled series-compensated parallel transmission lines. *Neural Computing and Applications*. 2020 Jun;32(11):6939-56.
- [7] Yadav T, Ali S, Kapoor G. A single-end fault identification system for transmission lines connected with DFSC. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2022 Dec;5(4):365-90.
- [8] Dash PK, Samantaray SR, Panda G. Fault classification and section identification of an advanced series-compensated transmission line using support vector machine. *IEEE transactions on power delivery*. 2006 Dec 26;22(1):67-73.
- [9] Moravej Z, Pazoki M, Abdoos AA. A new approach for fault classification and section detection in compensated transmission line with TCSC. *European Transactions on Electrical Power*. 2011 Jan;21(1):997-1014.
- [10] Vyas B, Maheshwari RP, Das B. Evaluation of artificial intelligence techniques for fault type identification in advanced series compensated transmission lines. *IETE Journal of Research*. 2014 Jan 2;60(1):85-91.
- [11] Yashvantraï Vyas B, Maheshwari RP, Das B. Pattern recognition application of support vector machine for fault classification of thyristor controlled series compensated transmission lines. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*. 2016 Jun;97:175-83.
- [12] Biswas S, Nayak PK. A new approach for protecting TCSC compensated transmission lines connected to DFIG-based wind farm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020 Oct 6;17(8):5282-91.
- [13] Reyes-Archundia E, Gutiérrez-Gnecchi JA, Guerrero-Rodríguez NF, del Carmen Téllez-Anguiano A, Méndez-Patiño A, Salazar-Torres JA. Impact of TCSC on directionality of traveling waves to locate faults in transmission lines. *IEEE Latin America Transactions*. 2021 Jan;19(01):147-54.
- [14] Mohanty SK, Nayak PK, Bera PK, Alhelou HH. An enhanced protective relaying scheme for TCSC compensated line connecting DFIG-Based wind farm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2023 Sep 7.
- [15] El-Zonkoly AM, Desouki H. Wavelet entropy based algorithm for fault detection and classification in FACTS compensated transmission line. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2011 Oct 1;33(8):1368-74.
- [16] Liu Q, Chang YY, Xu Y. Fault Position Identification for Series Compensated Lines with SSSC Based on Improved Wavelet Packet Entropy. *Advanced Materials Research*. 2012 Feb 3;383:5200-5.
- [17] Geethanjali M, Anju Alias M, Karpaga Senthil Pandey T. Discrete wavelet transform based fault detection and classification in a static synchronous series compensated transmission system. In *Proceedings of the Third International Conference on Soft Computing for Problem Solving: SocProS 2013, Volume 1 2014* (pp. 85-94). Springer India.

- [18] Reyes-Archundia E, Guardado JL, Morenogytia EL, Gutierrez-Gnecchi JA, Martinez-Cardenas F. Fault detection and localization in transmission lines with a static synchronous series compensator. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2015 Jan 1;15(3):17-22.
- [19] Almomani MM, Algharaibeh SF. Modelling and testing of a numerical pilot distance relay for compensated transmission lines. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*. 2020;3(6):776-86.
- [20] Gururaja Rao HV, Prabhu N, Mala RC. Wavelet transform-based protection of transmission line incorporating SSSC with energy storage device. *Electrical Engineering*. 2020 Sep;102:1593-604.
- [21] Hamood MT, Boussakta S. Fast walsh-hadamard-fourier transform algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2011 Jul 25;59(11):5627-31.