



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



Research Article

Simulation of a Fault Location Algorithm Based on the Traveling Wave Method and Wavelet Transform in MATLAB Simulink Using a Frequency-Dependent Distributed Parameter Transmission Line Model

Mohammad Sarikhani^{a,b}, Ali Asghar Ghadimi^{a,b}, and Mahyar Abasi^{a,b*}

^a Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-8-8349, Iran.

^b Research Institute of Renewable Energy, Arak University, Arak, 38156-8-8349, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13

Revised: 2022-05-12

Accepted: 2022-10-19

Keywords:

Fault location,
Frequency-dependent
parameter line model,
MATLAB software,
Traveling waves,
Wavelet transform.

ABSTRACT

Fault location in transmission lines is one of the fundamental pillars of transmission line protection. Before implementing fault location algorithms in protective relays, they are implemented in the form of simulation in various software. MATLAB software is a suitable candidate for this problem because it has a programming platform and Simulink environment for power system simulation. Also, because some algorithms use traveling waves to estimate the short-circuit distance, their implementation in the software platform requires transmission lines with a frequency-dependent parameter model. In general, in the MATLAB software library until 2020, there were two types of line models with fixed parameters, namely Three Phase PI Section Line and Distributed Parameters Line. The former is a compact model and the latter is a distributed model of the transmission line, whose performance was flawed in implementing fault location algorithms based on traveling waves. Since 2020, with the addition of another line model to the library of this software, the necessary conditions have been provided for the implementation of fault location algorithms based on the traveling wave method. Therefore, in this article, the complete steps of implementing the fault location algorithm in transmission lines with distributed parameters (Distributed Parameters Line and Frequency Depended) in the form of Simulink and MATLAB software programming have been presented. The mean estimation error of the proposed model across the 40 implemented scenarios is less than 0.01 percent. The results of implementing the fault location algorithm in the form of software simulation with frequency-dependent transmission lines confirm the successful performance of the mentioned model compared to the other two models.

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: m-abasi@araku.ac.ir

How to cite this article:

شبیه‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خط مبتنی بر روش امواج سیار و تبدیل موجک در محیط شبیه ساز نرم افزار متلب با استفاده از مدل خط انتقال با پارامترهای توزیع شده وابسته به فرکانس

محمد ساریخانی^{۱،۲}، علی اصغر قدیمی^{۱،۲} و مهیار عباسی^{۱،۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰	مکان‌یابی خط در خطوط انتقال یکی از ارکان اساسی حفاظت خطوط انتقال می‌باشد. قبل از پیاده‌سازی الگوریتم‌های مکان‌یابی خط در رله‌های حفاظتی، آن‌ها را در قالب شبیه‌سازی در نرم افزارهای مختلفی پیاده‌سازی می‌کنند. نرم افزار متلب به دلیل اینکه دارای بستر برنامه نویسی و شبیه‌ساز جهت پیاده‌سازی سیستم قدرت می‌باشد، به عنوان یک کاندید مناسب در این مسئله است. همچنین به دلیل اینکه برخی از الگوریتم‌ها از امواج سیار جهت تخمین فاصله اتصال کوتاه استفاده می‌کنند، لذا پیاده‌سازی آن‌ها در بستر نرم افزار نیازمند خطوط انتقال با مدل پارامتر وابسته به فرکانس می‌باشد. به طور کلی در کتابخانه نرم افزار متلب تا قبل از سال ۲۰۲۰ دو نوع مدل خط با پارامترهای ثابت بنام‌های Three Phase PI Section Line و Distributed Parameters Line که اولی مدل فشرده و دومی مدل توزیع شده خط انتقال است، وجود داشتند که عملکرد آن‌ها در پیاده‌سازی الگوریتم‌های مکان‌یابی خط مبتنی بر امواج سیار با خط مواجه بود. از سال ۲۰۲۰ با اضافه شدن یک مدل خط دیگر در کتابخانه این نرم افزار، شرایط لازم جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌های مکان‌یابی خط بر اساس روش امواج سیار مهیا گردید. لذا در این مقاله مراحل کامل پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خط در خطوط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس به صورت توزیع شده Distributed Parameters Line (Frequency Depended) در قالب شبیه‌سازی و برنامه‌نویسی نرم‌افزار متلب آورده شده است. میانگین خطای تخمین مدل پیشنهادی برای ۴۰ سناریوی پیاده‌سازی شده، زیر ۰/۰۱ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خط در قالب شبیه‌سازی نرم‌افزاری با خطوط انتقال وابسته به فرکانس موید عملکرد موفقیت آمیز مدل ذکر شده نسبت به دو مدل دیگر است.
بازنگری مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵	
واژگان کلیدی: امواج سیار، تبدیل موجک، مدل خط با پارامترهای وابسته به فرکانس، مکان‌یابی خط، نرم‌افزار متلب.	
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

مسئله مکان‌یابی خط در خطوط انتقال یکی از چالش‌های اساسی حفاظت خطوط انتقال می‌باشد [۱]. زمانی که یک خطای دائمی اتفاق می‌افتد، تشخیص دقیق مکان وقوع خطا جهت پاک‌سازی عامل بوجود آورنده‌ی اتصال کوتاه مسئله بسیار مهمی است. از طرف دیگر زمانی که یک خطای گذرا اتفاق می‌افتد، شناسایی نقاط حساس و بحرانی جهت کاهش وقایع مشابه مسئله مهمی می‌باشد. توسعه و طراحی الگوریتم‌های مکان‌یابی خط ابتدا توسط پژوهشگران به

صورت مدلسازی‌های نرم افزاری انجام می‌شود و در ادامه پس از تست و ارزیابی نهایی، می‌توان آن‌ها را در رله‌های صنعتی پیاده‌سازی نمود. به طور کلی الگوریتم‌های مکان‌یابی خط در چند دسته اساسی قابل دسته بندی هستند. روش‌های مکان‌یابی خط مبتنی بر معادلات امپدانس در حوزه فازور [۲]، روش‌های تحلیل امواج سیار در حوزه ترکیبی زمان-فرکانس [۳]، روش‌های مبتنی بر معادلات حوزه زمان [۴]، روش‌های مبتنی بر امواج معکوس الکترومغناطیسی [۵]، روش‌های

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m-abasi@araku.ac.ir

۱. گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ۸۳۴۹-۸-۳۸۱۵۶ ایران.

۲. پژوهشکده انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه اراک، اراک، ۸۳۴۹-۸-۳۸۱۵۶ ایران.

طول در نظر گرفته می‌شوند. در مدل فشرده، پارامترهای خط به صورت متمرکز تعریف می‌شوند و معمولاً برای خطوط کوتاه و شرایط حالت پایدار به کار می‌روند [۱۱]. در این مدل پارامترهای خط انتقال برای کل طول خط در نظر گرفته می‌شوند و تمام فرآیندهای الکتریکی و مغناطیسی برای کل خط انتقال محاسبه می‌شوند [۱۰، ۱۱].

در یک دیدگاه دیگر، مدل‌های خط انتقال را می‌توان بر اساس پارامترهای آن تقسیم بندی کرد [۱۵-۱۰]. این دو مدل شامل، مدل خط با پارامترهای وابسته به فرکانس و مدل خط با پارامترهای ثابت می‌باشند. در مدل‌های خطوط انتقال وابسته به فرکانس، جهت مدلسازی خط در قالب نرم افزارهای از آرایش هندسی هادی‌ها استفاده می‌شود. در این حالت تمام پارامترهای خط اعم از مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس به صورت وابسته به فرکانس مدلسازی می‌شوند اما در مدل پارامترهای ثابت، پارامترهای ذکر شده به صورت واحد طول و یا واحد کل خط بر اساس نوع مدل توزیع شده و فشرده در مدلسازی در نظر گرفته می‌شوند.

تا قبل از سال ۲۰۲۰، در نسخه‌های مختلف نرم افزار متلب، به طور کلی از دو مدل خط با پارامترهای ثابت استفاده می‌شد. این دو مدل در دو حالت توزیع شده و فشرده در کتابخانه نرم افزار متلب بنام‌های (DPL)^۱ و (TPPISL)^۲ وجود داشتند [۱۶، ۱۷]. در مطالعات حالت‌های گذرا و فرکانس بالا، مدل DPL نسبت به مدل TPPISL عملکرد بهتری دارد اما در نهایت هر دوی آن‌ها نسبت به مدل‌های وابسته به فرکانس در مطالعات حالت‌های گذرا و فرکانس بالا، عملکرد ضعیف‌تری داشتند. زمانی که فرکانس تحلیل مسئله در حد مگا هرتز افزایش می‌یابد، مدل TPPISL قادر به استخراج مولفه‌های فرکانس بالای جریان و ولتاژ نمی‌باشد و به طور کل، این مدل قابل استفاده نمی‌باشد. این چالش باعث شده که در نسخه ۲۰۲۰ به بعد کتابخانه شبیه سازی نرم افزار متلب، یک مدل جدید وابسته به فرکانس بنام (DPLFD)^۳ اضافه گردد [۱۸]. این مدل به صورت هندسی آرایش هادی‌های خطوط را دریافت می‌کند و به صورت توزیع شده مدل نهایی خط را در نظر می‌گیرد. عملکرد این مدل نسبت به دو مدل دیگر در مطالعات حالت‌های گذرا بسیار دقیق‌تر می‌باشد.

لذا در این مقاله هدف، پیاده‌سازی و ارزیابی یک الگوریتم

مبتنی بر آموزش و یادگیری مانند شبکه عصبی مصنوعی [۶]، یادگیری ماشین [۷]، الگوریتم‌های فازی [۸] و ... که می‌توانند براساس داده‌های حوزه فرکانس و یا زمان باشند. الگوریتم‌های مکان‌یابی خطا با هدف افزایش دقت و سرعت از نظر شاخص‌های مختلفی از قبیل، حوزه حل مسئله بر اساس تکنولوژی دستگاه‌های نمونه برداری و ذخیره ساز داده، داده‌های لازم جهت پیاده‌سازی الگوریتم و همچنین تکنولوژی انتقال داده، نوع مدلسازی خط انتقال، روش‌های تحلیلی و یا عددی معادلات مکان‌یابی خطا و ... قابل بحث و بررسی می‌باشند [۱]. با توجه به مسائل مطرح شده، نوع مدل خط انتقال جهت پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتم‌های مکان‌یابی خطا در قالب نرم افزار بسیار مهم است. در مسئله مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال، مدلسازی خطوط انتقال از دیدگاه‌های مختلفی قابل دسته بندی می‌باشد.

در یک دیدگاه، برخی از مراجع خطوط انتقال را بر اساس حوزه حل مسئله به صورت حوزه زمان و حوزه فازور دسته بندی می‌کنند [۹]. در حوزه زمان، سیگنال‌ها به صورت تابعی از زمان مدلسازی می‌شوند. این روش به تحلیل رفتار سیگنال‌ها در زمان واقعی و پاسخ آن‌ها به ورودی‌های مختلف می‌پردازد. تحلیل‌های دینامیکی، شبیه‌سازی‌های حالت گذرا و بررسی پاسخ سیستم‌ها به ورودی‌های غیرخطی معمولاً در این حوزه انجام می‌شود [۹]. در حوزه فازور، سیگنال‌های متناوب (معمولاً سینوسی) به صورت فازورها مدلسازی می‌شوند. این روش به تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها در فرکانس و فاز می‌پردازد و معمولاً برای سیگنال‌های AC و تحلیل‌های حالت ماندگار مناسب است. [۹، ۱۰].

در یک دیدگاه دیگر می‌توان خطوط را از نظر مدل توزیع شده یا فشرده پارامترها تقسیم بندی کرد [۱۰]. در مدل توزیع شده، پارامترهای مهم خط انتقال (مقاومت، اندوکتانس، و ظرفیت) به صورت پیوسته در طول خط توزیع می‌شوند. این مدل معمولاً برای خطوط بلند و در شرایط دینامیکی مناسب است [۱۱]. در این مدل، پارامترهای خط انتقال به صورت واحد طول در نظر گرفته می‌شوند. در این نوع مدلسازی، اثر پارامترهای مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس به ترتیب جهت تلفات انرژی، ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی و ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در واحد

¹ Distributed Parameters Line

² Three Phase PI Section Line

³ Distributed Parameters Line (Frequency Depended)

به عنوان بهترین گزینه برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال با روش‌های مبتنی بر امواج سیار شناخته شوند. در ادامه ابتدا، معادلات اساسی مدل خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس و سپس پیاده‌سازی این خط در محیط شبیه‌ساز نرم افزار متلب آورده شده است.

۲-۱- معادلات اساسی مدل خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس

مدل‌های خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس به صورت مدل‌های امواج سیار توزیع شده هستند. با این حال مقاومت خط انتقال (R) به جای اینکه در نقاط سر خط به صورت فشرده باشد در طول خط به همراه اندوکتانس (L) و کاپاسیتانس (C) به حالت پراکنده یا توزیع شده است. نکته مهم در این مدل خط این است که مدل‌های خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس در تعدادی از نقطه فرکانسی حل می‌شوند که این مسئله نشان دهنده‌ی وابستگی پارامترها به فرکانس می‌باشند. به طور کلی مدل‌های وابسته به فرکانس شامل دو مدل وابسته به فرکانس فاز و مدل وابسته به فرکانس مود می‌شوند [۹]. مدل وابسته به فرکانس فاز، دقیق‌ترین مدل است چرا که وابستگی ماتریس‌های تبدیل داخلی به فرکانس را در نظر می‌گیرد (و به این ترتیب سیستم‌های متعادل و نامتعادل را نمایش می‌دهد). مدل وابسته به فرکانس مود به عنوان اولین مدل، یک تبدیل ثابت را در نظر می‌گیرد و لذا فقط زمانی دقیق است که سیستم‌های متعادل را مدلسازی کند. برای سیستم‌هایی که شامل یک یا دو هادی هستند این دو مدل نتایج یکسانی بدست می‌دهند (چرا که تبدیل در هر صورت ثابت است). این موضوع برای آرایش‌های سه‌فاز مثلث (واقع در فاصله بالاتر از سطح زمین) و هر مدار ترانسپوز شده به صورت ایده‌آل هم برقرار است [۱۵-۱۲]. مدل وابسته به فرکانس فاز نسبت به هر مدل دیگری از خط یا کابل که به صورت تجاری موجودند از نظر عددی مقاوم‌تر و دقیق‌تر است و لذا این مدل در بیشتر مطالعات مهندسی ترجیح داده می‌شود [۱۵-۱۲].

۲-۱-۱- مدل وابسته به فرکانس مود

این مدل از یک ماتریس تبدیل مودال ثابت (یا مستقل از فرکانس) برای تفکیک سیستم‌های چندفاز به مودهای مجزا و دو به دو انحصاری استفاده می‌کند. هر مود به صورت یک مدار تکفاز جدا بررسی می‌شود [۹]. هرچند این مدل در دسته مدل‌های وابسته به فرکانس قرار می‌گیرد اما در وابستگی به فرکانس فقط برای سیستم‌های انتقال به صورت

مکان‌یابی خطا در حوزه امواج سیار در نرم افزار متلب مبتنی بر مدل خط با پارامترهای وابسته به فرکانس و مقایسه نتایج آن با مدل‌های خط با پارامتر ثابت می‌باشد. به طور کلی هدف اساسی این مقاله مدلسازی گام به گام و دقیق الگوریتم مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال در قالب نرم افزار متلب مبتنی بر مدل DPLFD بر اساس روش امواج سیار می‌باشد. تمام مراحل این پیاده‌سازی در این مقاله به طور کامل بیان شده است. در قسمت شبیه‌ساز نرم افزار متلب نحوه‌ی پیاده‌سازی این مدل خط و تنظیمات دقیق آن آورده شده است. در نهایت دقت تخمین مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال با استفاده از مدل‌های مختلف خط انتقال موجود در کتابخانه شبیه‌ساز نرم افزار متلب به عنوان شاخص ارزیابی در نظر گرفته شده است. عملکرد موفقیت آمیز روش مکان-یابی خطا مبتنی بر این مدل خط، نسبت به دو مدل دیگر در نتایج ارزیابی نرم افزاری در انتهای مقاله آورده شده است. این مقاله در شش بخش تقسیم بندی شده است. بخش دوم، مدلسازی خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس در سیمولینک متلب آورده شده است. بخش سوم، تئوری کامل مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار و ابزار مورد نیاز آن آورده شده است. بخش چهارم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزاری مبتنی بر مدل DPLFD در نرم افزار متلب آورده شده است. در بخش پنجم، بحث و مقایسه نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش مکان‌یابی خطا مبتنی بر تئوری امواج سیار با هر سه مدل خط انتقال موجود در محیط شبیه ساز نرم افزار متلب آورده شده است و در نهایت در بخش ششم، نتیجه گیری مقاله آورده شده است.

۲- مدلسازی خط انتقال با پارامترهای وابسته به

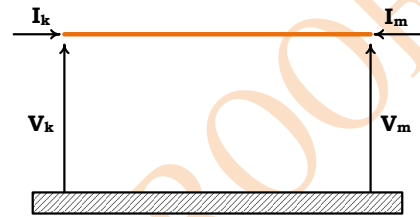
فرکانس در محیط شبیه‌ساز نرم افزار متلب

مدل‌های خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس، ابزارهای اساسی برای تحلیل و طراحی سیستم‌های الکتریکی و مخابراتی هستند.

در حوزه‌ی مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال، استفاده از این مدل‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. یکی از روش‌های مؤثر در مکان‌یابی خطا، استفاده از امواج سیار است که به کمک تحلیل فرکانس، بازتاب و تداخل امواج را بررسی می‌کند.

مدل‌های خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس به طور خاص برای تحلیل رفتار این امواج در شرایط مختلف طراحی شده‌اند و قابلیت شناسایی الگوهای بازتابی ناشی از خطاها را دارند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که این مدل‌ها

هندسی متعادل دارای دقت مثلاً در مدارهایی که به صورت ایده‌آل ترانسپوز شده باشند یا هر سیستم دیگری که در آن یک ماتریس مودال ثابت وجود دارد. در توصیف مدار معادل حوزه زمان برای مدل Bergeron، عبارات به صورت مستقیم فرمول بندی و حل شدند، اما زمانی که وابستگی‌های فرکانسی در نظر گرفته شوند تقریباً مدلسازی و فرمول بندی آن‌ها غیر ممکن خواهد بود. در شکل (۱)، مدل تکفاز یک خط انتقال هوایی به همراه سیگنال جریان و ولتاژ ورودی و خروجی نشان داده شده است [۹].



شکل ۱- ولتاژها و جریان‌های یک خط انتقال هوایی تکفاز. با توجه به شکل (۱)، در حوزه فرکانس، ولتاژها و جریان‌های یک سمت خط را می‌توان بر حسب ولتاژ و جریان سر دیگر به صورت معادله (۱) نمایش داد [۱۱]:

$$\begin{bmatrix} V_k \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \cdot \ell) & -Z_0 \cdot \sinh(\gamma \cdot \ell) \\ \frac{1}{Z_0} \cdot \sinh(\gamma \cdot \ell) & -\cosh(\gamma \cdot \ell) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_m \\ I_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در این رابطه، $Z_0 = \sqrt{Z \cdot Y}$ و $\gamma = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$ ، Z ، Y و l به ترتیب امپدانس مشخصه خط انتقال، تابع انتشار، امپدانس سری خط انتقال در واحد طول خط، ادیمیتانس شنت خط انتقال در واحد طول خط و طول خط انتقال می‌باشند [۱۱]. اگر فرض شود سیستم به یک شبکه متعادل ختم شود که پاسخ فرکانسی آن برابر امپدانس مشخصه $Z_0(\omega)$ باشد آنگاه توابع موج سیار رو به جلو و عقب را می‌توان در حوزه فرکانس به صورت معادلات (۲) الی (۷) بیان کرد. در این معادلات، با استفاده از یک روش مشابه به آنچه که برای روش مشخصات توصیف شد توابع وزنی موج سیار رو به جلو و رو به عقب یعنی F_k ، F_m و B_k و B_m معرفی می‌شوند [۱۲، ۱۴].

$$F_k(\omega) = V_k(\omega) + Z_{eq}(\omega) \cdot i_k(\omega) \quad (2)$$

$$F_m(\omega) = V_m(\omega) + Z_{eq}(\omega) \cdot i_m(\omega) \quad (3)$$

و به همین ترتیب

$$B_k(\omega) = V_k(\omega) - Z_{eq}(\omega) \cdot i_k(\omega) \quad (4)$$

$$B_m(\omega) = V_m(\omega) - Z_{eq}(\omega) \cdot i_m(\omega) \quad (5)$$

با مقایسه معادلات فوق خواهیم داشت:

$$B_k(\omega) = A(\omega) \cdot F_m(\omega) \quad (6)$$

$$B_m(\omega) = A(\omega) \cdot F_k(\omega) \quad (7)$$

که در معادلات (۶) و (۷)

$$b_k(t) = \int_{-\tau}^{\infty} f_m(t-u) \cdot a(u) \cdot du \quad (8)$$

$$b_m(t) = \int_{-\tau}^{\infty} f_k(t-u) \cdot a(u) \cdot du \quad (9)$$

توجه شود که حد پایین انتگرال در معادلات (۸) و (۹) زمان سیر τ است چرا که سریع‌ترین مولفه فرکانسی یک ضربه در یک سر سیستم انتقال به سر دیگر نخواهد رسید مگر آنکه این زمان سپری شده باشد. معادلات (۸) و (۹) نشان می‌دهند که مقادیر $b_k(t)$ و $b_m(t)$ را می‌توان به طور کامل با مقادیر گذشته $f_k(t)$ و $f_m(t)$ تعریف کرد (البته به شرطی که گام زمانی $\Delta t < \tau$ باشد). بنابراین معادلات (۸) و (۹) را می‌توان به صورت معادلات (۱۰) و (۱۱) توصیف کرد [۹].

$$b_k(t) = v_k(t - \tau) \quad (10)$$

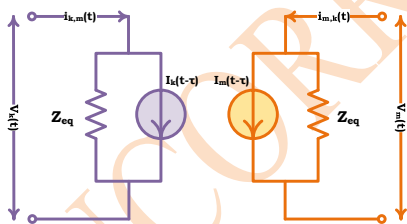
$$b_m(t) = v_m(t - \tau) \quad (11)$$

و در نهایت ولتاژهای نقاط k و m را در زمان t می‌توان به ترتیب از به طریق معادلات (۱۲) و (۱۳) توصیف کرد [۹].

$$v_k(t) = Z_{eq} \cdot i_k(t) + v_k(t - \tau) \quad (12)$$

$$v_m(t) = Z_{eq} \cdot i_m(t) + v_m(t - \tau) \quad (13)$$

نمایش مودال معادلات (۱۲) و (۱۳)، در شکل (۲) آورده شده است [۹].



شکل ۲- مدل خط انتقال در حوزه زمان مودال با پارامترهای وابسته به فرکانس مود.

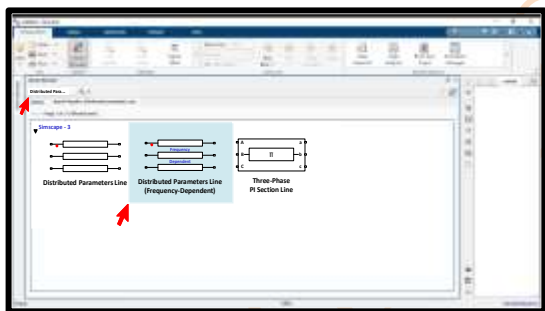
۲-۱-۲- مدل وابسته به فرکانس فاز

این مدل با کمک روش‌های تفکیک مودال می‌تواند مشکل تاخیر زمانی را حل کنند و در تمام ساختارهای هندسی نامتعادل در سیستم‌های AC و DC با درهم کنش‌های متقابل نامطلوب عملکرد مناسبی داشته باشد. در سال ۱۹۹۹، مدل خط جهانی، مبتنی بر نظریه‌ای که در اصل در مرجع [۱۵] ارائه شده بود، به کار گرفته شد تا یک مدل کلی و دقیق وابسته به فرکانس برای همه هندسه‌های کابل‌های زمینی و خطوط هوایی ارائه کند. مدل وابسته به

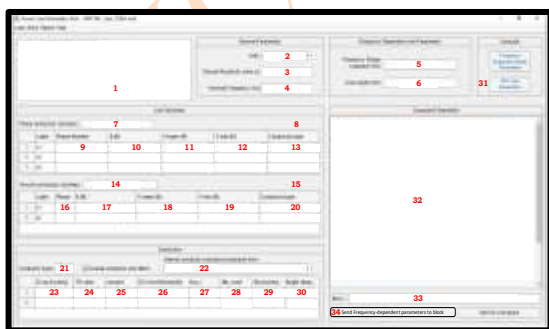
$$\begin{cases} I_k(n) = G \cdot V_k(n) - I_{his_k}(n) \\ I_{kr}(n) = I_k(n) - I_{ki}(n) \\ I_{ki}(n+1) = H * I_{Frr}(n - \tau) \end{cases} \quad (16)$$

۲-۲- پیاده‌سازی مدل خط با پارامتر وابسته به فرکانس در محیط شبیه‌ساز نرم افزار متلب

در کتابخانه قسمت شبیه ساز نرم افزار متلب نسخه ۲۰۲۰ سه نوع مدل خط بنام‌های TPPISL و DPL و DPLFD وجود دارد. در شکل (۵)، نمایی از هر سه مدل در کتابخانه شبیه‌ساز نرم افزار متلب نسخه ۲۰۲۰ آورده شده است. دو مدل اول از نوع پارامتر ثابت و مدل سوم از نوع پارامتر وابسته به فرکانس می‌باشند. در این مقاله هدف پیاده‌سازی الگوریتم مکان یابی خطا در نرم افزار متلب مبتنی بر روش امواج سیار با استفاده از مدل DPLFD می‌باشد. در این مدل پارامترهای هندسی خط به عنوان تنظیمات خط انتقال در نرم افزار وارد می‌شوند. در شکل (۵)، نمایی از انواع خطوط موجود در کتابخانه نرم‌افزار متلب مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است در این کتابخانه سه مدل خط انتقال وجود دارد [۱۶-۱۸]. در شکل (۶)، نوار ابزار این مدل خط جهت وارد کردن فایل با فرمت mat و مشخصات کلی از خط انتقال نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۵- نمایی از انواع مدل‌های خط انتقال در نرم افزار متلب.



شکل ۶- بلوک تنظیمات کامل خط انتقال پارامتر وابسته به فرکانس در محیط شبیه‌ساز متلب.

پس از وارد کردن مشخصات خط متناسب با شکل (۶)، مطابق با اطلاعات ارائه شده در جدول (۱)، تنظیمات انجام

فرکانس فاز بر این اصل عمل می‌کند که وابستگی فرکانسی یک سیستم انتقال را می‌توان با دو تابع انتقال H (تابع انتشار) و Y_C (ادمیتانس مشخصه) نمایش داد. در شکل (۳)، ولتاژ و جریان یک خط انتقال در مدل وابسته به فرکانس فاز آورده شده است [۹].



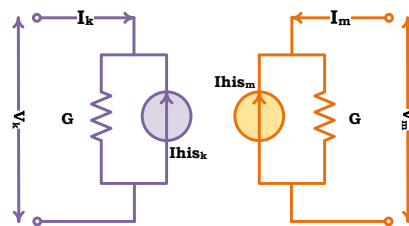
شکل ۳- دیاگرام ولتاژها و جریان‌ها در یک خط انتقال در مدل خط وابسته به فرکانس فاز.

با توجه به شکل (۳)، معادلات (۱۴) و (۱۵) را می‌توان به طور مستقیم از معادلات تلگراف استخراج کرد [۱۳-۱۵]:

$$Y_C \cdot V_k - I_k = 2 \cdot H^T \cdot I_{mv} = 2 \cdot I_{ki} \quad (14)$$

$$Y_C \cdot V_m - I_m = 2 \cdot H^T \cdot I_{kr} = 2 \cdot I_{mi} \quad (15)$$

که در آن $Y_C = Z^{-1} \cdot \sqrt{Z \cdot Y}$ و $H = e^{-\sqrt{XY} \ell}$ ماتریس تابع انتشار و ماتریس ادمیتانس مشخصه است. در این ساختار H و Y_C چندین بار توسط LCP در نقاط گسسته در حوزه زمان محاسبه و سپس تقریب زده شده و با توابع گویای مرتبه پایین معادل جایگزین می‌شوند. این روش امکان استفاده از روش‌های کانولوشن بازگشتی برای انتقال به حوزه زمان را میسر می‌کند که نسبت به انتگرال‌های کانولوشنی از لحاظ محاسباتی بسیار کارآمدتر هستند [۱۳]. مدل وابسته به فرکانس فاز با استفاده از یک مدار معادل نورتون که در شکل (۴)، نمایش داده شده است قابل توصیف است [۱۳].



شکل ۴- مدل خط انتقال در حوزه زمان مودال با پارامترهای وابسته به فرکانس فاز.

با توجه به شکل (۴)، از نظر زمانی، تزریق‌های قبلی منبع جریان یعنی I_{his_m} و I_{his_k} در هر گام زمانی بروزرسانی می‌شوند. زمانی که ولتاژهای گره یعنی V_k و V_m موجود باشند این مراحل به طور کامل توسط مدل نرم افزاری انجام می‌شود. معادله‌ی (۱۶)، مراحل کاملی که توسط مدل حوزه زمان خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس فاز توصیف می‌شود به صورت مرحله ای توصیف می‌کند [۱۵].

شکل (۶) وارد کرد تا بلوک خط انتقال موجود در محیط شبیه‌ساز بتواند به تنظیمات خط دسترسی پیدا کند. در جدول (۱)، مشخصات کلی خط اعم از طول خط، تعداد فازها، کامنت و توضیحات خط و ... نشان داده شده است.

شده را می‌بایست تایید کرد تا نتایج نهایی در بلوک شبیه‌سازی بارگذاری شوند. برای اجرای این فرآیند، نیاز است تا فایل مشخصات با فرمت mat با اسم معین در آدرس مشخص در سیستم ذخیره گردد. پس از ذخیره فایل با فرمت mat باید آدرس فایل را در نوار ابزار مشخص شده در

جدول ۱- تعاریف کامل تنظیمات خط انتقال مدل DPLFD متناسب با شکل ۶.

عنوان بلوک	شماره زیر بلوک	توضیحات
Description	1	محل نوشتن کامنت و توضیحات
General parameters	2	محل مشخص کردن واحد اندازه گیری مورد استفاده در پروژه
	3	محل مشخص کردن مقاومت زمین
	4	محل مشخص کردن فرکانس نامی سیستم
	5	محل تعیین محدوده فرکانسی سیستم (بدین صورت که اگر عدد اول $X1$ و عدد دوم $X2$ و عدد سوم n باشد n نقطه را به صورت لگاریتمی بین بازه $10e(x1)$ تا $10e(x2)$ ایجاد می‌کند)
Frequency dependent line parameters	6	محل وارد کردن طول خط
	7	محل وارد کردن تعداد فازهای سیستم
	8	محل مشخص کردن عنوان فازها
	9	محل مشخص کردن شماره برای فازها
	10	محل مشخص کردن آرایش فازها نسبت به محور عرضی (یک فاز را به عنوان فاز مرجع تعیین باید کرد و دو فاز دیگر را نسبت به آن باید تعیین نمود)
	11	محل تعیین ارتفاع فازها نسبت به سطح زمین
	12	محل تعیین حداقل ارتفاع فازها نسبت به زمین (معمولاً پارامتر ۱۱ و ۱۲ مساوی می‌باشد و میانگین ارتفاع وارد می‌شود)
	13	در این قسمت نوع هادی‌ها مشخص می‌شوند.
	14	محل وارد کردن تعداد فازهای خنثی
	15	
16		
17	در قسمت ۱۵ - ۲۰ دقیقاً تمام موارد انجام شده برای هادی‌های فاز، در این قسمت برای هادی‌های خنثی باید انجام شود.	
18		
19		
20		
Line geometry	21	در این قسمت عدد نهایی مجموع کل هادی‌های مختلف وارد می‌شود.
	22	سه گزینه برای مشخصات هادی‌ها وجود دارد، در صورت مشترک بودن هر یک از موارد از یک شماره بدون حرف استفاده می‌شود.
	23	محل وارد کردن قطر هادی
	24	در این قسمت اطلاعات کاتالوگ هادی باید وارد شود.
	25a	در این روش مورد استفاده نیست
	25b	محل وارد کردن شعاع متوسط هندسی هادی‌ها
	25c	محل وارد کردن راکتانس هادی‌ها
	26	محل وارد کردن مقاومت DC هادی
	27	در این روش مورد استفاده نیست
	28	محل وارد کردن تعداد هادی‌های باندل شده (در صورت باندل نبود عدد یک وارد شود)
29	محل وارد کردن کل قطر باندل (در صورت باندل نبود عدد صفر وارد شود)	
30	محل وارد کردن زاویه باندل	
Compute	31	اعمال تایید و انجام محاسبات کامل
	32	محل نمایش محاسبات
Computed parameters	33	محل تعیین آدرس ذخیره سازی مشخصات خط در سیستم کامپیوتری
	34	محل تایید و ارسال نهایی

$$Z_C = \sqrt{\frac{R+L(\partial/\partial t)}{G+C(\partial/\partial t)}} \quad (20)$$

ضرایب A_1 و A_2 توابعی فرضی و مستقل از x هستند. جهت ساده سازی می توان از تلفات خط انتقال صرف نظر کرد. در خطوط بدون تلفات اندوکتانس و کاپاسیتانس ثابت فرض شده و $R = G = 0$ در نظر گرفته می شود. در این صورت امپدانس مشخصه خط از معادله (۲۰) به صورت $Z_0 = Z_C = \sqrt{L/C}$ تعریف می شود. در چنین حالتی، امواج سیار بدون تغییر شکل در خط انتقال منتشر می شوند. با استفاده از معادلات فوق می توان معادله انتشار موج در خط بدون تلفات را به صورت معادله (۲۱) نوشت که در آن $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ سرعت انتشار موج سیار بوده و از معادله بدست می آید.

$$\begin{cases} u(x,t) = A_1(t)e^{\frac{x}{v}} + A_2(t)e^{-\frac{x}{v}} \\ i(x,t) = (-1/Z_0)(A_1(t)e^{\frac{x}{v}} - A_2(t)e^{-\frac{x}{v}}) \end{cases} \quad (21)$$

با اعمال بسط تیلور به معادله (۲۱) پاسخ عمومی معادلات ولتاژ و جریان موسوم به پاسخ دالامبرت به فرم معادله (۲۲) حاصل می شود که جمله اول معادله فوق موجی است که در جهت منفی محور مکان حرکت می کند و به موج پس رو معروف است. جمله دوم که در جهت مثبت حرکت می کند، موج پیش رو نامیده می شود [۹].

$$\begin{cases} u(x,t) = A_1\left(t + \frac{x}{v}\right) + A_2\left(t - \frac{x}{v}\right) \\ i(x,t) = (-1/Z_0)\left(A_1\left(t + \frac{x}{v}\right) + A_2\left(t - \frac{x}{v}\right)\right) \end{cases} \quad (22)$$

هنگامی که موج الکترومغناطیسی در یک خط انتقال با امپدانس مشخصه معین انتشار می یابد، معادله ثابتی بین امواج ولتاژ و جریان آن وجود دارد. اگر این موج به محل ناپیوستگی امپدانس که در آن امپدانس مشخصه تغییر می کند برسد، قسمتی از انرژی موج به محیط بعد منتقل شده و قسمتی از آن به محیط اول بازتاب می شود. امواج ولتاژ و جریان در چنین نقاطی پیوسته هستند.

۳-۲- دیاگرام لتیس

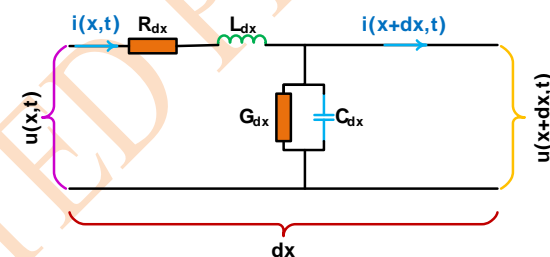
شکل (۸)، دیاگرام لتیس، نمایشی از انتشار امواج الکترومغناطیسی در سیستم های قدرت می باشد [۱۹]. سیستم های قدرت متشکل از خطوط انتقال هوایی و یا کابلی، ترانسفورماتورها، قطع کننده ها، جبران سازهای توان راکتیو و ... می باشند. دیاگرام لتیس را می توان برای تجزیه و تحلیل رفتار امواج متحرک در سیستم های قدرت و

۳- تئوری مکان یابی خط مبتنی بر امواج سیار

تبدیل موجک

۳-۱- تئوری امواج سیار

زمانی که یک خط در خط انتقال اتفاق می افتد، همانند اتصال یک منبع با ولتاژی عکس مقدار ولتاژ نقطه خطادار پیش از وقوع خطا تلقی می شود. جهش ناگهانی ولتاژ و جریان در لحظه وقوع خطا موجب ایجاد امواج گذرایی سوار بر موج فرکانس اصلی می گردد که با نام امواج سیار شناخته می شوند. این امواج با سرعتی نزدیک به سرعت نور از محل خطا به دو سمت خط انتقال منتشر شده و در نقاط ناپیوستگی امپدانس با ضرایب مشخصی انعکاس و انتقال می یابند. طبق شکل (۷)، معادلات دیفرانسیل حاکم بر مدار تحت خطا، معروف به معادلات تلگراف خط، به صورت معادله (۱۷)، قابل تعریف است [۹].



شکل ۷- مدل تکفاز خط انتقال.

این معادله دیفرانسیل به صورت مرتبه دوم، براساس جریان و ولتاژ خطوط به صورت معادلات مستقل تعریف می شود. در این رابطه γ ثابت انتشار می باشد که به صورت معادله (۱۸) می توان آن را توصیف کرد. در رابطه (۱۸)، مقادیر α و β ثابت های میرایی و فاز نامیده می شوند که به طور مستقیم روی دامنه و فاز موج سیار حاصل شده تاثیر گذار می باشند [۹].

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = \gamma^2 i(x,t) \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \gamma^2 u(x,t) \quad (18)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta$$

در نهایت با حل معادلات فوق، پاسخی به فرم معادله (۱۹) برای جریان و ولتاژ حاصل می شود [۹]:

$$\begin{cases} u(x,t) = A_1(t)e^{\gamma x} + A_2(t)e^{-\gamma x} \\ i(x,t) = \left(\frac{-1}{Z_c}\right)(A_1(t)e^{\gamma x} - A_2(t)e^{-\gamma x}) \end{cases} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، Z_C امپدانس مشخصه خط انتقال می باشد که از رابطه (۲۰) بدست می آید [۹].

که با در نظر گرفتن شرط تعامد توابع مقیاس، به طوری که $a_j(k)$ و $d_j(k)$ از معادلات $a_j(k) = \int f(x)\varphi(2^j x - k)dx$ و $d_j(k) = \int f(x)w(2^j x - k)dx$ بدست می‌آیند. با جایگذاری تابع مقیاس $\varphi(x)$ و تابع موجک $w(x)$ معادلات نهایی به صورت معادلات (۲۵) و (۲۶) تبدیل خواهند شد [۲۱].

$$a_j(k) = \frac{1}{2} \sum g_0(m - 2k)a_{j+1}(m) = \sum h_0(2k - m)a_{j+1}(m) \quad (25)$$

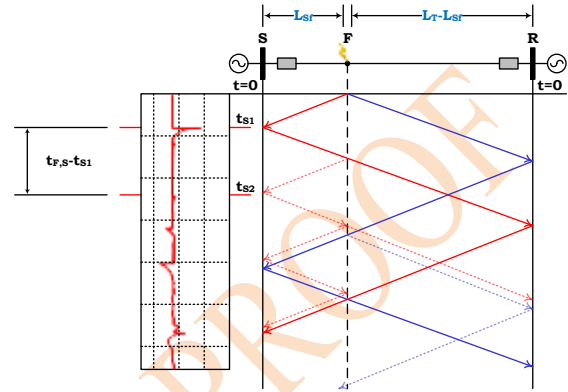
$$d_j(k) = \frac{1}{2} \sum g_1(m - 2k)a_{j+1}(m) = \sum h_1(2k - m)a_{j+1}(m) \quad (26)$$

این دو معادله بیان می‌کنند که هر مجموعه داده گسسته را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول جزئیات است که از عبور دادن اطلاعات از یک فیلتر بالا گذر بدست می‌آیند و دسته دوم تخمین است که از عبور دادن اطلاعات از یک فیلتر پائین گذر بدست می‌آیند. در معادلات (۲۵) و (۲۶) از مفهومی بنام تجزیه کردن، استفاده شده است [۲۲-۲۰]. از این مفهوم در بازسازی سیگنال‌هایی که ضرائب موجک آن‌ها در دسترس است استفاده می‌شود. با توجه به مفهومی که در تبدیل موجک بیان شده است M در تبدیل موجک گسته، عدد ۲ است. به عبارت دیگر معادله بین ورودی $(x(n))$ و خروجی $(y(n))$ به صورت $y(n) = x(2n)$ می‌توان بیان کرد و در نهایت می‌توان ساختار اساسی تبدیل موجک گسته را به صورت شکل (۹) نشان داد [۲۲-۲۰]. که در شکل (۹)، $u_a(k) = \sum h_1(k - n)a_{j+1}(n)(k)$ و $u_a(k) = \sum h_0(k - n)a_{j+1}(n)$ و همچنین $h_1(n)$ ضرایب فیلتر پائین گذر و بالا گذر تجزیه کننده می‌باشند و $d_j(k)$ و $a_j(k)$ از معادلات (۲۷) و (۲۸) بدست می‌آیند. اگر یک سیگنال دلخواه را با ضرایب فیلتر تجزیه کننده $(h_1(n))$ و $(h_0(n))$ تجزیه کنیم با استفاده از ضرایب فیلترهای بازسازی کننده $(g_1(n))$ و $(g_0(n))$ می‌توان سیگنال اصلی را ساخت [۲۲-۲۰].

$$D_j(k) = \sum h_1(2k - n)a_{j+1}(n) = \sum h_1(n)a_{j+1}(2k - n) \quad (27)$$

$$A_j(k) = \sum h_0(2k - n)a_{j+1}(n) = \sum h_0(n)a_{j+1}(2k - n) \quad (28)$$

شناسایی مشکلات احتمالی مانند بازتاب‌های امواج سیار استفاده کرد. در طول یک خط انتقال زمانی که یک خطایی اتفاق می‌افتد، امواج سیار طبق رابطه (۲۱) به دو موج جلو رونده و موج بازگشتی تقسیم می‌شود [۱۹]. تاخیر زمانی بین رسیدن موج رونده و موج بازگشتی از محل خطا تا منبع را می‌توان جهت محاسبه مکان وقوع خطا استفاده کرد.



شکل ۸- دیاگرام نردبانی انتشار موج رفت و برگشت ناشی از اتصال کوتاه در خط.

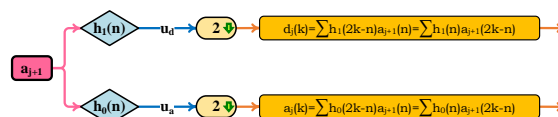
۳-۳- تشخیص موج سیار با استفاده از تبدیل موجک

تبدیل موجک یک ابزار ریاضی جهت آنالیز هم زمان حوزه فرکانس و زمان می‌باشد. این ابزار می‌تواند نشان دهد که چه فرکانسی در چه زمانی اتفاق افتاده است [۲۰]. این تبدیل ریاضی یک سیگنال را بر اساس موجک مادر و موجک دختر بسط می‌دهد به طوری که هر موجک دختر از مقیاس و انتقال دادن موجک مادر ساخته می‌شود. همانند سری فوریه اگر G_j ها را ضرائب موجک و $W_j(x)$ ها را مجموعه موجک مادر در نظر بگیریم، می‌توان تابع $f(x)$ را به صورت معادله (۲۳) بسط داد و در نهایت پس از اعمال توابع موجک در سطوح مختلف با فرض تابع مقیاس $\varphi(x)$ تساوی دوم $f(x)$ حاصل می‌گردد. فرض کنید که تابع $f(x)$ را در سطح ۱ با $\varphi_{j+k}(x)$ استفاده از توابع مقیاس $\varphi_{j+k}(x)$ بسط دهیم، به طوری که z شماره سطح و k موقعیت تابع مقیاس است. ضرایبی که بیانگر ارتباط بین تابع $f(x)$ و تابع $\varphi_{j,k}(x)$ است را با a که از کلمه تقریبی (approximation) گرفته شده است می‌توان طبق معادله (۲۴) نشان داد [۲۱].

$$f(x) = C_0\varphi(x) + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{2^i-1} C_{2^i+k} W(2^i x - k) \quad (23)$$

$$f(x) = \sum_k a_{j+1}(k)\varphi(2^{j+1}x - k) = \sum_k a_j(k)\varphi(2^j x - k) + \sum_k d_j(k)w(2^j x - k) \quad (24)$$

جهت مرجع ثابت نشان می‌دهد و مولفه بتا، تغییرات پایدار و نوسانات دینامیکی سیستم را بهتر نمایان می‌کند.



شکل ۹- تجزیه سیگنال به دو سطح.

۳-۵- تشریح مراحل کامل مکان‌یابی خطا

در قسمت‌های قبل تمام ابزار لازم جهت مکان‌یابی خطا با استفاده از تئوری امواج سیار آورده شده است. در این قسمت هدف تشریح کامل تمام مراحل مکان‌یابی خطا می‌باشد. مراحل کامل مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال با استفاده از داده‌های یک ترمینال به شرح ذیل است:

مرحله ۱: دریافت اطلاعات جریان سه فاز

در اولین مرحله، مقادیر لحظه‌ای جریان سه‌فاز از باس S دریافت می‌شود. این داده‌ها شامل مولفه‌های فاز A، فاز B و فاز C هستند که در یک بازه‌ی زمانی مشخص ثبت شده‌اند. هدف از این مرحله، فراهم‌سازی داده‌های اولیه برای پردازش سیگنال و تحلیل فرکانسی آنهاست. این داده‌ها باید دارای نرخ نمونه‌برداری کافی باشند تا اطلاعات فرکانسی دقیق در حوزه‌ی تبدیل ویولت قابل استخراج باشد.

مرحله ۲: اعمال تبدیل کلارک

پس از اندازه‌گیری جریان سه‌فاز، از تبدیل کلارک جهت بهره‌برداری بهتر از سیگنال جریان، استفاده شده است. پس از اعمال تبدیل کلارک، مولفه‌ی بتا جهت ادامه‌ی تحلیل انتخاب می‌شود. این انتخاب بر مبنای ویژگی‌های خاص مؤلفه‌ی بتا در حضور خطاهای نامتقارن در سیستم‌های سه‌فاز است. مطابق مطالعات انجام شده دلایل انتخاب مولفه بتا عدم کوپل‌شدگی با سایر مولفه‌ها در گذراهای نامتقارن، پایداری بیشتر نسبت به مؤلفه‌های دیگر در حضور خطا و سازگاری بهتر با تبدیل موجک می‌باشند.

مرحله ۳: اعمال تبدیل موجک بر روی سیگنال بتا

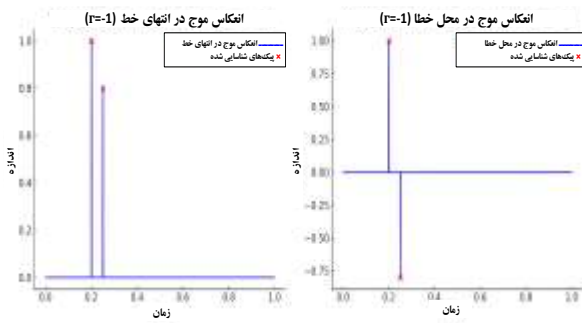
پس از استخراج مولفه β از تبدیل کلارک، برای تحلیل و تشخیص ویژگی‌های خطا، DWT روی این سیگنال اعمال می‌شود. DWT قادر است سیگنال را در سطوح مختلف تجزیه کند و اطلاعاتی راجع به تغییرات ناگهانی که نشان‌دهنده‌ی وقوع خطا هستند، ارائه دهد. در این مطالعه از Daubechies-4 (db4) جهت استخراج ویژگی‌های جریان خطا استفاده شده است. db4 دارای فیلترهایی با تعداد ضرایب مناسب است که باعث می‌شود در تشخیص تغییرات لحظه‌ای سیگنال، عملکرد بهتری نسبت به موجک‌های دیگر داشته باشد. برای شناسایی محل وقوع خطا در این مطالعه، از ضرایب جزئیات سطح ۱ استفاده می‌شود. دلیل

۳-۴- تبدیل مودال

در خطوط انتقال فشار قوی سه فاز به دلیل اینکه بین فازها تزویج الکترومغناطیسی وجود دارد، لذا تحلیل یک رخداد در سیستم قدرت با استفاده مستقیم از جریان و ولتاژ فازها در نتایج می‌تواند اثر مخرب داشته باشد [۲۳، ۲۴]. جهت حل این چالش از تبدیل مودال در راستای از بین بردن اثر مخرب تزویج و ایجاد یک استقلال بین فازها با هدف ایجاد یک فضای مشابه با تحلیل تک فاز می‌توان استفاده کرد. این تئوری اولین بار در سال ۱۹۶۳ جهت حل چالش‌های سیستم‌های چند فاز مطرح شده است. به طور کلی سه تبدیل معروف شامل، ودپول، کلارک و کارنبور تا کنون معرفی شده است. در تجزیه و تحلیل سیگنال‌های امواج سیار ناشی از خطا، تبدیل کلارک نسبت به دو تبدیل دیگر قوی‌تر می‌باشد. تبدیل کلارک قادر است سیگنال‌های سه فاز ولتاژ (جریان) را به صورت مختصات جدیدی منتقل کند که مولفه‌های حاصل از آن که به مدهای هوایی و زمینی موسومند به صورت مستقل از هم عمل می‌کنند. در معادله‌ی (۲۹)، مدل ماتریسی سیگنال جریان مبتنی بر ماتریس تبدیل کلارک نشان داده شده است [۲۳].

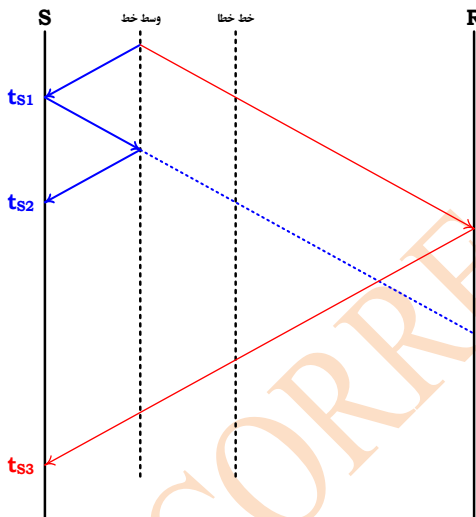
$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (29)$$

مدهای زمینی و هوایی در این سیستم را به ترتیب با m_0 ، m_α و m_β نمایش می‌دهند و به هرکدام از آنها مولفه مدال می‌گویند [۲۴]. مد زمین مسیر خود را از طریق سیستم زمین می‌بندد و بنابراین امپدانس مشخصه بزرگتری بر سر راه آن قرار دارد. به همین دلیل سرعت انتشار مد زمین کمتر از سرعت سیر مدهای هوایی در خط انتقال است. مدهای هوایی با سرعتی نزدیک به سرعت نور در خط انتقال منتشر می‌شوند. براساس اینکه چه نوع خطایی در شبکه رخ داده است، مولفه‌های مدال متفاوتی در سیستم جاری می‌شود. به طور کلی از نظر فیزیکی می‌توان دو مولفه مود هوایی، شامل آلفا و بتا را به این صورت تعریف کرد که، مولفه آلفا، مقدار ترکیب‌شده‌ی فازهای سه‌گانه را در یک



شکل ۱۰- نتایج خروجی تبدیل موجک اعمال شده بر مولفه بتای سیگنال جریان ناشی از خطا.

این الگوی بازتاب و نحوه‌ی نمایش آن در خروجی تبدیل موجک، مبنای اصلی تشخیص و مکان‌یابی دقیق خطا در خطوط انتقال است. مطابق با دیاگرام لیتیس ارائه شده در شکل (۱۱)، اگر پیک‌ها مخالف علامت باشند یعنی خطا در نیمه اول خط رخ داده است چرا که بازتاب موج از محل خطا تا شین S زودتر از بازتاب موج از شین R به شین S رسیده است پس خطا در نیمه اول رخ داده است.



شکل ۱۱- دیاگرام نردبانی موج سیار رفت و برگشت ناشی از اتصال کوتاه در نیمه اول خط انتقال.

در این حالت، فاصله مکان دقیق خطا نسبت به شین S از رابطه‌ی (۳۰)، بدست می‌آید.

$$L_{sf} = \frac{v_c(t_{s1} - t_{s2})}{2} \quad (30)$$

و طبق شکل (۱۲)، اگر پیک‌ها هم علامت باشند یعنی پیک دوم که بازتاب موج از شین R است زودتر از بازتاب موج از محل خطا به شین S رسیده است و این یعنی خطا در نیمه دوم خط رخ داده است.

انتخاب این سطح به این شرح است که، سطح اول جزئیات، بالاترین فرکانس‌های سیگنال را استخراج می‌کند که مرتبط با گذراهای ناگهانی ناشی از وقوع خطا هستند. همچنین در سطوح بالاتر، اطلاعات فرکانسی جزئیات کاهش یافته و ممکن است برخی از ویژگی‌های کلیدی خطا از بین بروند.

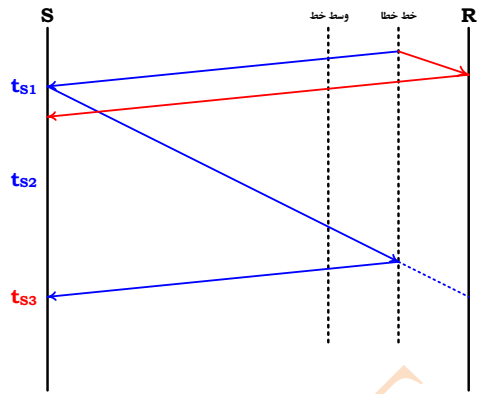
مرحله ۴: استخراج زمان رسیدن موج به ترمینال ابتدای خط

طبق تئوری امواج سیار در شرایط عادی، ولتاژ و جریان در خط انتقال به صورت متقارن منتشر می‌شوند، اما در لحظه‌ی وقوع یک خطا، تغییرات ناگهانی باعث تولید امواج سیار می‌شود که در دو جهت خط منتشر می‌شوند. بررسی نحوه‌ی حرکت این امواج، بازتاب آن‌ها از نقاط مختلف شبکه، و تاخیر زمانی آن‌ها، مبنای مکان‌یابی دقیق خطا است. با استخراج زمان‌های پیک موج سیار رسیده شده به ترمینال‌ها می‌توان فاصله دقیق مکان وقوع خطا را محاسبه کرد. هنگام رسیدن موج سیار به یک مرز امیدانسی (مانند انتهای خط، ترانسفورماتور، یا نقطه‌ی خطا)، بخشی از آن بازتاب می‌شود و بخشی دیگر از آن عبور می‌کند. مقدار بازتاب و عبور این موج توسط ضریب بازتاب و ضریب عبور تعیین می‌شود. طبق روابط ارائه شده در بخش امواج سیار، زمانی که یک موج به نقطه اتصال کوتاه می‌رسد، کل موج مورد نظر بازتاب می‌شود اما علامت موج مورد نظر منفی می‌باشد و زمانی که یک موج سیار به یک نقطه مدار باز می‌رسد، کل موج مورد نظر با همان علامت بازتاب می‌شود. به طور کلی موج سیار ناشی از خطا، بین نقطه خطا و ترمینال‌های دو سمت خط در حال انتشار و بازتاب است. با تعیین علامت موج سیار رسیده شده به ترمینال می‌توان زمان پیک موج‌های سیار را استخراج کرد و در نهایت فاصله مکان وقوع خطا نسبت به ترمینال ابتدای خط را محاسبه کرد. در شکل (۱۰)، نتایج خروجی تبدیل موجک اعمال شده بر مولفه بتای سیگنال جریان ناشی از خطا نشان داده شده است. در این شکل، پیک‌های هم علامت، نشان دهنده‌ی بازتاب از انتهای خط یا شین‌های با امیدانس بالا می‌باشند و پیک‌های مختلف علامت نشان دهنده‌ی بازتاب از محل خطا با نقاط کم امیدانس می‌باشد.

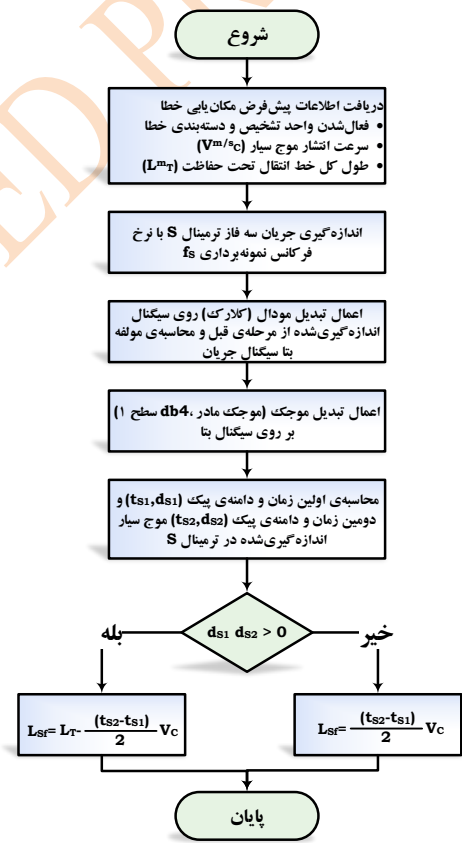
$$L_{sf} = L_T - \frac{v_c(ts_1 - ts_2)}{2} \quad (۳۱)$$

۳-۶- فلوجارت نهایی

در این قسمت هدف ارائه فلوجارت کامل الگوریتم مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال مبتنی بر روش امواج سیار با استفاده از دیتاهای جریان سه فاز یک ترمینال می‌باشد. در شکل (۱۳)، فلوجارت کامل الگوریتم پیشنهادی آورده شده است. این شکل شامل دو قسمت است، در قسمت الف، تصویر فلوجارت کامل الگوریتم مکان‌یابی خطا بیان شده در قسمت قبل آورده شده است و در قسمت ب، تصویر شبه کد این فلوجارت آورده شده است. شبه کد ارائه شده در این قسمت فرمت بسته الگوریتم مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار با استفاده از داده‌های جریان سه فاز یک ترمینال را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- دیاگرام نردبانی موج سیار رفت و برگشت ناشی از اتصال کوتاه در نیمه دوم خط انتقال. و در این حالت، فاصله مکان دقیق خطا نسبت به شین S از رابطه (۳۱)، بدست می‌آید.



(ب)

(الف)

شکل ۱۳- الف) فلوجارت نهایی الگوریتم مکان‌یابی خطا، ۱۳- ب) شبه کد فلوجارت الگوریتم مکان‌یابی خطا مبتنی بر روش امواج سیار اندازه‌گیری شده از یک ترمینال.

۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم افزاری مبتنی

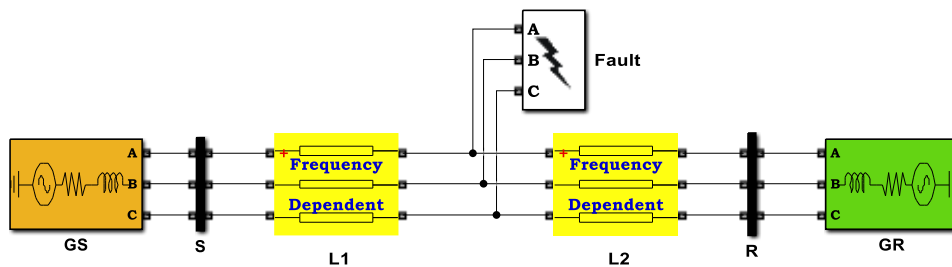
بر مدل‌های وابسته به فرکانس در نرم افزار متلب

در این قسمت هدف پیاده‌سازی کامل الگوریتم مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال مبتنی بر مدل وابسته به فرکانس خطوط انتقال در محیط شبیه‌سازی نرم افزار متلب می‌باشد. هدف اصلی ارائه نتایج حاصل از پیاده‌سازی سناریوهای مختلف شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد خط وابسته به فرکانس در دقت تخمین فاصله مکان وقوع خطا در نرم افزار متلب می‌باشد. مدل شبکه سه فاز شبیه‌سازی شده از خط

انتقال و منابع تونن در محیط شبیه‌ساز نرم افزار متلب در شکل (۱۴)، آورده شده است.

نرخ فرکانس نمونه برداری از سیگنال جریان در این مطالعه، به مقدار ۱۰۰ مگا هرتز در نظر گرفته شده است. همچنین در این مطالعه سرعت انتشار موج ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

همچنین اطلاعات کامل شبکه تحت مطالعه شامل منابع تونن و خط انتقال وابسته به فرکانس در شکل (۱۵) آورده شده است.



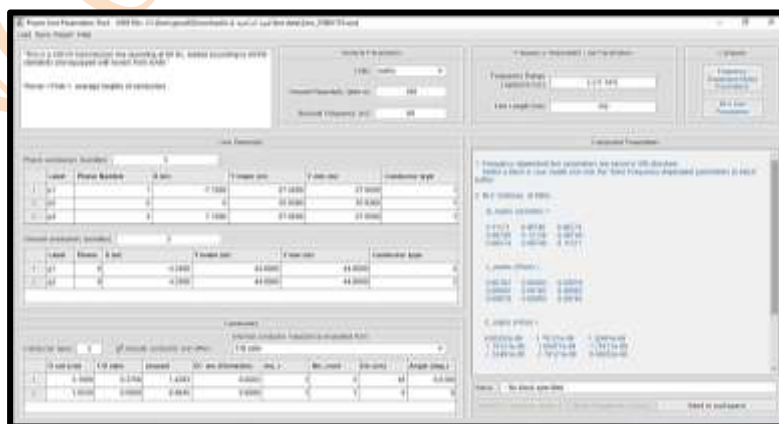
شکل ۱۴-دیگرام سه فاز شبکه تحت مطالعه پیاده‌سازی شده در محیط شبیه‌ساز نرم افزار متلب.



(ب)



(الف)

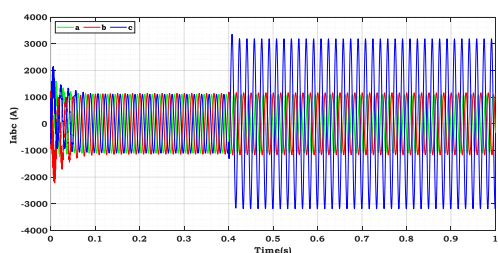


(ج)

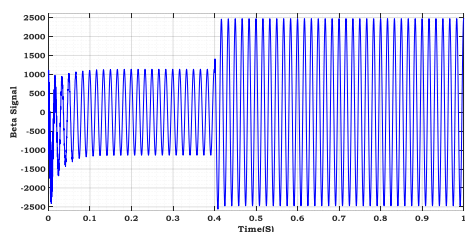
شکل ۱۵- تصاویر اطلاعات منابع تونن دو سمت خط و خط وابسته به فرکانس ارائه شده در شکل ۱۴.

(الف) اطلاعات منبع S، (ب) اطلاعات منبع T، (ج) اطلاعات خط وابسته به فرکانس.

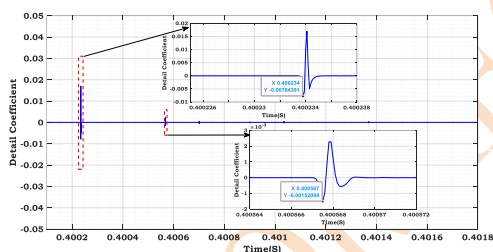
شکل‌های (۱۹) الی (۲۱) آورده شده است. طبق شکل (۲۱)، زمان و دامنه اولین و دومین پیک موج سیار رسیده شده به شین S در اثر این خطا به ترتیب $0/400234$ ثانیه، $-0/00784391$ ، $0/400567$ ثانیه و $-0/00152099$ می‌باشد. مقدار فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S طبق فلوجارت ارائه شده در شکل (۱۳)، برابر با $70/05$ کیلومتر می‌باشد.



شکل ۱۹- جریان سه فاز اندازه گیری شده از ترمینال S در حین پیاده‌سازی سناریوی ۲.



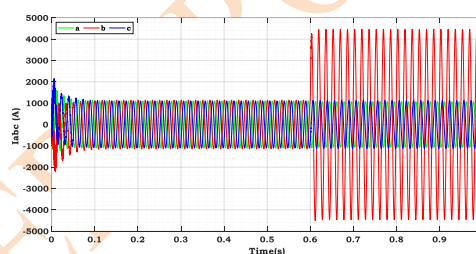
شکل ۲۰- سیگنال مولفه بتا محاسبه شده در سناریوی ۲.



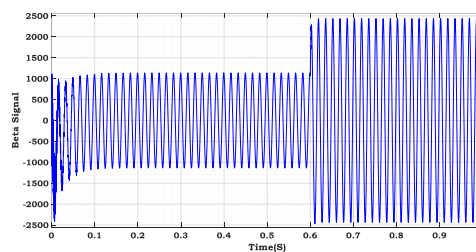
شکل ۲۱- سیگنال حاصل از پیاده‌سازی تبدیل موجک روی مولفه بتا در سناریوی ۲.

سناریوی ۳: در این سناریو فرض شده است که یک خطای BC در فاصله 90 کیلومتری از ترمینال S در خط انتقال در زمان $0/8$ ثانیه با مقدار مقاومت 1 اهم رخ داده است. نتایج اندازه گیری جریان سه فاز ترمینال S، سیگنال مولفه بتا، تبدیل موجک پیاده شده روی سیگنال بتا به ترتیب در شکل‌های (۲۲) الی (۲۴) آورده شده است. طبق شکل (۲۴)، زمان و دامنه اولین و دومین پیک موج سیار رسیده شده به شین S در اثر این خطا به ترتیب $0/800301$ ثانیه، $-0/00059239$ می‌باشد. مقدار فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S طبق فلوجارت ارائه شده در شکل (۱۳)، برابر با 90 کیلومتر می‌باشد.

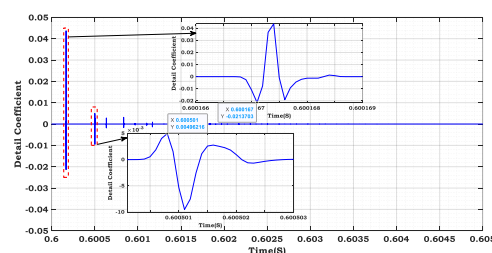
در ادامه هفت سناریو به طور موردی بررسی شده‌اند. **سناریوی ۱:** در این سناریو فرض شده است که یک خطای BG در فاصله 50 کیلومتری از ترمینال S در خط انتقال در زمان $0/6$ ثانیه با مقدار مقاومت 10 اهم رخ داده است. نتایج اندازه گیری جریان سه فاز ترمینال S، سیگنال مولفه بتا، تبدیل موجک پیاده شده بر روی سیگنال بتا به ترتیب در شکل‌های (۱۶) الی (۱۸) آورده شده است. طبق شکل (۱۸)، زمان و دامنه اولین و دومین پیک موج سیار رسیده شده به شین S در اثر این خطا به ترتیب $0/600167$ ثانیه، $-0/00496216$ ، $0/600501$ ثانیه و $-0/00213703$ می‌باشد. مقدار فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S طبق فلوجارت ارائه شده در شکل (۱۳)، برابر با $50/1$ کیلومتر می‌باشد.



شکل ۱۶- جریان سه فاز اندازه گیری شده از ترمینال S در حین پیاده‌سازی سناریوی ۱.

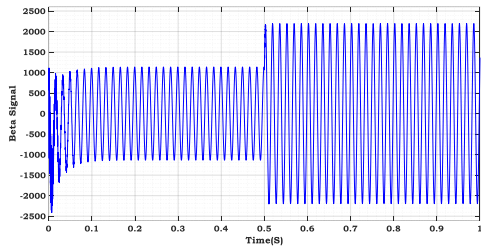


شکل ۱۷- سیگنال مولفه بتا محاسبه شده در سناریوی ۱.

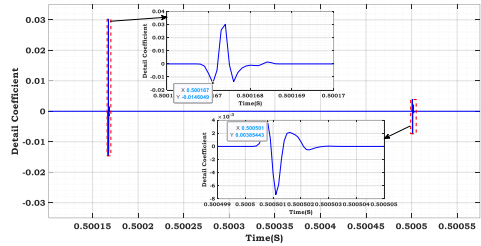


شکل ۱۸- سیگنال حاصل از پیاده‌سازی تبدیل موجک روی مولفه بتا در سناریوی ۱.

سناریوی ۲: در این سناریو فرض شده است که یک خطای CG در فاصله 70 کیلومتری از ترمینال S در خط انتقال در زمان $0/4$ ثانیه با مقدار مقاومت 20 اهم رخ داده است. نتایج اندازه گیری جریان سه فاز ترمینال S، سیگنال مولفه بتا، تبدیل موجک پیاده شده روی سیگنال بتا به ترتیب در

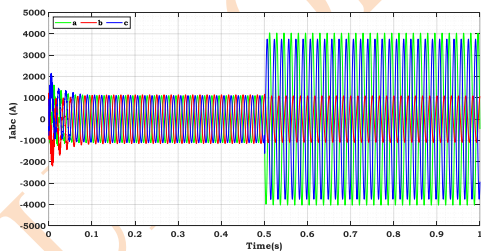


شکل ۲۶- سیگنال مولفه بتا محاسبه شده در سناریو ۴.

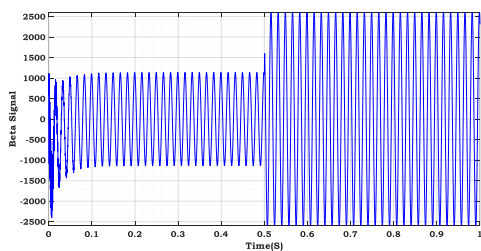


شکل ۲۷- سیگنال حاصل از پیاده‌سازی تبدیل موجک روی مولفه بتا در سناریو ۴.

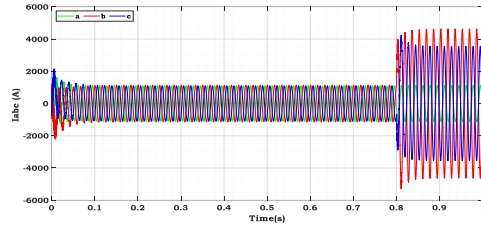
سناریو ۵: در این سناریو فرض شده است که یک خطای ACG در فاصله ۱۵ کیلومتری از ترمینال S در خط انتقال در زمان ۰/۵ ثانیه با مقدار مقاومت ۵۰ اهم رخ داده است. نتایج اندازه‌گیری جریان سه فاز ترمینال S، سیگنال مولفه بتا، تبدیل موجک پیاده شده بر روی سیگنال بتا به ترتیب در شکل‌های (۲۸) تا (۳۰) آورده شده است. طبق شکل (۳۰)، زمان و دامنه اولین و دومین پیک موج سیار رسیده شده به شین S در اثر این خطا به ترتیب ۰/۵۰۰۵ ثانیه، ۰/۰۹۴۹۲۷-، ۰/۵۰۰۱۵ و ۰/۰۱۸۶۷۹ می‌باشد. مقدار فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S طبق فلوجارت ارائه شده در شکل (۱۳)، برابر با ۱۵ کیلومتر می‌باشد.



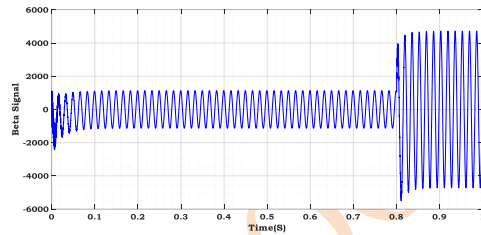
شکل ۲۸- جریان سه فاز اندازه‌گیری شده از ترمینال S در حین پیاده‌سازی سناریو ۵.



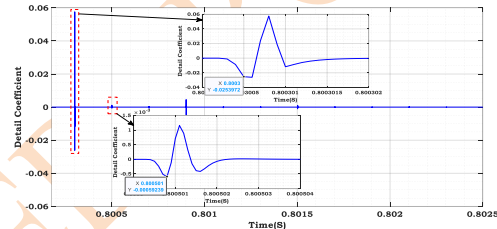
شکل ۲۹- سیگنال مولفه بتا محاسبه شده در سناریو ۵.



شکل ۲۲- جریان سه فاز اندازه‌گیری شده از ترمینال S در حین پیاده‌سازی سناریو ۳.

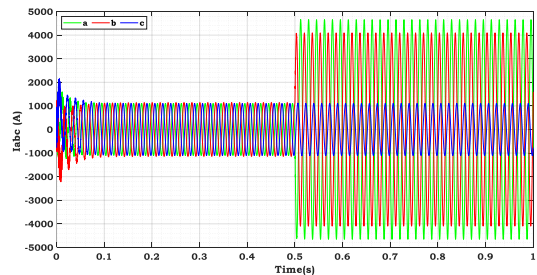


شکل ۲۳- سیگنال مولفه بتا محاسبه شده در سناریو ۳.



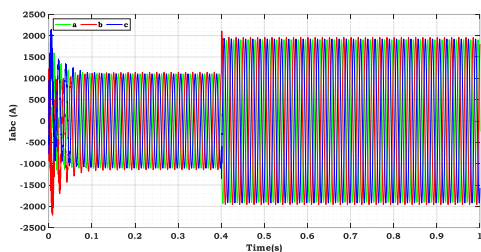
شکل ۲۴- سیگنال حاصل از پیاده‌سازی تبدیل موجک روی مولفه بتا در سناریو ۳.

سناریو ۴: در این سناریو فرض شده است که یک خطای AB در فاصله ۵۰ کیلومتری از ترمینال S در خط انتقال در زمان ۰/۵ ثانیه با مقدار مقاومت ۲۰ اهم رخ داده است. نتایج اندازه‌گیری جریان سه فاز ترمینال S، سیگنال مولفه بتا، تبدیل موجک پیاده شده بر روی سیگنال بتا به ترتیب در شکل‌های (۲۵) تا (۲۷) آورده شده است. طبق شکل (۲۷)، زمان و دامنه اولین و دومین پیک موج سیار رسیده شده به شین S در اثر این خطا به ترتیب ۰/۵۰۰۱۶۷ ثانیه، ۰/۰۱۴۶۰۴۹-، ۰/۵۰۰۵۰۱ و ۰/۰۳۸۵۴۴۳ می‌باشد. مقدار فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S طبق فلوجارت ارائه شده در شکل (۱۳)، برابر با ۵۰/۱ کیلومتر می‌باشد.

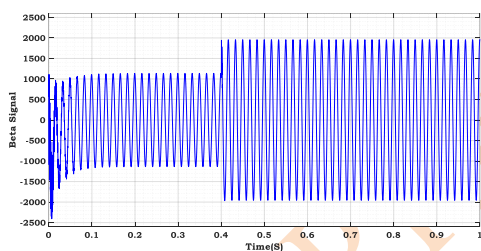


شکل ۲۵- جریان سه فاز اندازه‌گیری شده از ترمینال S در حین پیاده‌سازی سناریو ۴.

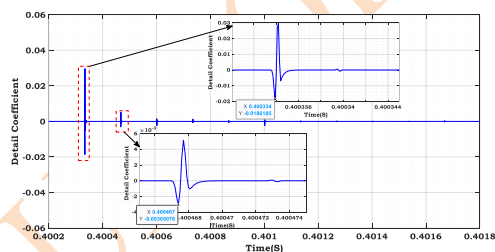
سناریو ۷: در این سناریو فرض شده است که یک خطای ABC در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از ترمینال S در خط انتقال در زمان $0/4$ ثانیه با مقدار مقاومت 50 اهم رخ داده است. نتایج اندازه گیری جریان سه فاز ترمینال S، سیگنال مولفه بتا، تبدیل موجک پیاده شده بر روی سیگنال بتا به ترتیب در شکل‌های (۳۴) تا (۳۶) آورده شده است. طبق شکل (۳۶)، زمان و دامنه اولین و دومین پیک موج سیار رسیده شده به شین S در اثر این خطا به ترتیب $0/4003334$ ثانیه، $0/186185$ ، $-0/0467$ ، $-0/00305076$ می-باشد. مقدار فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S طبق فلوجارت ارائه شده در شکل (۱۳)، برابر با $100/05$ کیلومتر می‌باشد.



شکل ۳۴- جریان سه فاز اندازه گیری شده از ترمینال S در حین پیاده‌سازی سناریوی ۷.

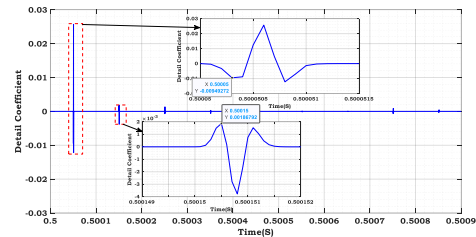


شکل ۳۵- سیگنال مولفه بتا محاسبه شده در سناریوی ۷.



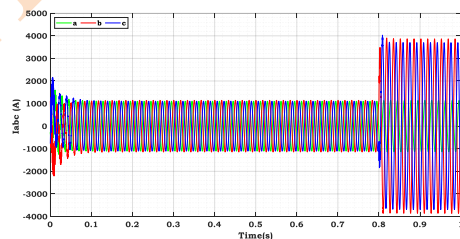
شکل ۳۶- سیگنال حاصل از پیاده‌سازی تبدیل موجک بر روی مولفه بتا در سناریوی ۷.

در جدول (۲)، نتایج نهایی حاصل از پیاده‌سازی ۴۰ سناریو آورده شده است. در این سناریوها، زمان وقوع خطا، مکان وقوع خطا، فاز و یا فازهای تحت خطا و نوع اتصال کوتاه به عنوان شاخص‌های متغیر در نظر گرفته شده است. در جدول (۲)، مقدار خطای هر تخمین فاصله از فرمول (۳۲)، محاسبه شده است. طبق نتایج ارائه مقدار میانگین خطای

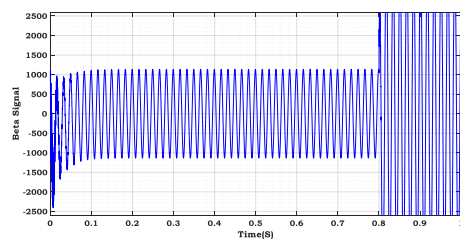


شکل ۳۰- سیگنال حاصل از پیاده‌سازی تبدیل موجک بر روی مولفه بتا در سناریوی ۵.

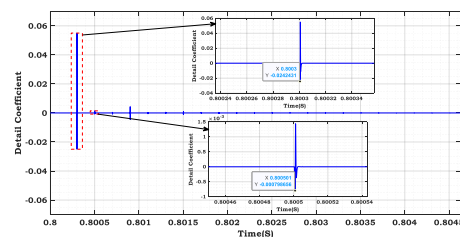
سناریو ۶: در این سناریو فرض شده است که یک خطای BCG در فاصله ۹۰ کیلومتری از ترمینال S در خط انتقال در زمان $0/8$ ثانیه با مقدار مقاومت 10 اهم رخ داده است. نتایج اندازه گیری جریان سه فاز ترمینال S، سیگنال مولفه بتا، تبدیل موجک پیاده شده بر روی سیگنال بتا به ترتیب در شکل‌های (۳۱) الی (۳۳) آورده شده است. طبق شکل (۳۳)، زمان و دامنه اولین و دومین پیک موج سیار رسیده شده به شین S در اثر این خطا به ترتیب $0/8003$ ثانیه، $0/242431$ ، $-0/00798656$ می-باشد. مقدار فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S طبق فلوجارت ارائه شده در شکل (۱۳)، برابر با 90 کیلومتر می‌باشد.



شکل ۳۱- جریان سه فاز اندازه گیری شده از ترمینال S در حین پیاده‌سازی سناریوی ۶.



شکل ۳۲- سیگنال مولفه بتا محاسبه شده در سناریوی ۶.



شکل ۳۳- سیگنال حاصل از پیاده‌سازی تبدیل موجک بر روی مولفه بتا در سناریوی ۶.

شده توسط الگوریتم مکان‌یابی خطا و طول کل خط انتقال تحت حفاظت می‌باشد.

محاسبه شده متناسب با پیاده‌سازی این ۴۰ سناریو زیر ۰/۰۱ درصد می‌باشد. در این رابطه L_{Sf-acu} ، L_{Sf-cal} و L_T به ترتیب فاصله واقعی وقوع خطا، فاصله تخمین زده

$$Error\% = \frac{|L_{Sf-acu} - L_{Sf-cal}|}{L_T} \times 100 \quad (32)$$

جدول ۲- نتایج حاصل از پیاده‌سازی سناریوهای مختلف.

نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی						اطلاعات سناریو				سناریو
خطای ناشی از تخمین فاصله مکان وقوع خطا (برحسب درصد)	فاصله مکان خطای محاسبه شده از ترمینال S (کیلومتر)	دامنه پیک دومین سیگنال	دامنه پیک اولین سیگنال	زمان رسیدن دومین پیک موج سیار به ترمینال S (ثانیه)	زمان رسیدن اولین پیک موج سیار به ترمینال S (ثانیه)	فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S (کیلومتر)	مقاومت خطا (اهم)	فاز تحت خطا	زمان وقوع خطا (ثانیه)	
۰/۰۸۳۳%	۹/۹	-۰/۰۰۰۰۱۷۳۹۵۹	۰/۰۰۰۸۸۵۹۶۸	۰/۵۰۰۱	۰/۵۰۰۰۳۴	۱۰	۱	AG	۰/۵	۱
۰/۰۸۳۳	۲۰/۱	-۰/۰۰۰۰۲۴۲۴۱۸	۰/۰۰۱۱۴۸۴۷	۰/۷۰۰۲۰۱	۰/۷۰۰۰۶۷	۲۰	۲۵	AG	۰/۷	۲
.	۳۰	۰/۰۰۰۶۹۴۷۷۴	-۰/۰۰۲۴۵۷۵۱	۰/۶۰۰۳۰۱	۰/۶۰۰۰۱۰	۳۰	۱۰	BG	۰/۶	۳
۰/۰۴۱۶	۴۰/۵	۰/۰۰۷۰۷۹۲۴	-۰/۰۲۲۳۱۵۶	۰/۸۰۰۴۰۱	۰/۸۰۰۱۳۴	۴۰	۲۰	BG	۰/۸	۴
۰/۰۸۳۳%	۵۰/۱	۰/۰۰۰۶۱۲۸۴	-۰/۰۰۰۸۳۷۲۱۱	۰/۴۰۰۵۰۱	۰/۴۰۰۱۶۷	۵۰	۵۰	CG	۰/۴	۵
۰/۱۲۵	۳۰/۱۵	۰/۰۰۱۳۴۵۸۶	-۰/۰۱۰۷۷۲۲	۰/۷۰۰۳۰۱	۰/۷۰۰۰۱	۳۰	۴۰	CG	۰/۷	۶
۰/۰۴۱۶%	۱۹/۹۵	۰/۰۱۵۶۰۶	-۰/۰۳۱۲۴۵۸	۰/۳۰۰۲	۰/۳۰۰۰۶۷	۲۰	۱	ABG	۰/۳	۷
۰/۱۲۵	۳۰/۱۵	۰/۰۰۸۱۵۳۵۸	-۰/۰۲۴۲۹۷۱	۰/۲۰۰۳۰۱	۰/۲۰۰۰۱	۳۰	۲۰	ABG	۰/۲	۸
۰/۰۴۱۶%	۴۰/۵	۰/۰۰۱۰۹۹۱۹	-۰/۰۰۰۸۹۳۶۲۶	۰/۸۰۰۴۰۱	۰/۸۰۰۱۳۴	۴۰	۵۰	ACG	۰/۸	۹
۰/۰۴۱۶	۱۹/۹۵	۰/۰۰۲۱۹۱۵۱	-۰/۰۱۰۸۷۵۷	۰/۳۰۰۲	۰/۳۰۰۰۶۷	۲۰	۶۰	ACG	۰/۳	۱۰
۰/۰۴۱۶%	۵۵/۵	۰/۰۰۳۶۸۸۲	-۰/۰۲۲۳۵۳۴	۰/۹۰۰۵۵۱	۰/۹۰۰۱۸۴	۵۵	۱۰۰	BCG	۰/۹	۱۱
۰/۰۴۱۶	۴۰/۵	۰/۰۰۹۲۴۶۹	-۰/۰۲۹۸۰۴۸	۰/۷۰۰۴۰۱	۰/۷۰۰۰۳۴	۴۰	۸۰	BCG	۰/۷	۱۲
.	۶۰	۰/۰۰۱۷۵۰۱۶	-۰/۰۱۲۸۴۲۹	۰/۴۰۰۶۰۱	۰/۴۰۰۰۲۰۱	۶۰	۱	AB	۰/۴	۱۳
۰/۰۸۳۳	۵۰/۱	-۰/۰۰۸۹۲۲۰۳	-۰/۰۱۶۰۷۲۷	۰/۶۰۰۵۰۱	۰/۶۰۰۱۶۷	۵۰	۵	AB	۰/۶	۱۴
۰/۰۸۳۳%	۹/۹	۰/۰۰۱۷۱۵۷۴	-۰/۰۰۵۱۳۲۸۹	۰/۵۰۰۱	۰/۵۰۰۰۳۴	۱۰	۲۰	AC	۰/۵	۱۵
۰/۰۴۱۶	۱۹/۹۵	۰/۰۰۲۳۶۷۶۶	-۰/۰۰۵۸۵۵۰۸	۰/۴۰۰۲	۰/۴۰۰۰۶۷	۲۰	۴۰	AC	۰/۴	۱۶
۰/۰۴۱۶%	۴/۹۵	۰/۰۱۷۱۶۸۴	-۰/۰۴۱۴۹۶	۰/۵۰۰۰۵	۰/۵۰۰۰۱۷	۵	۵۰	BC	۰/۵	۱۷
۰/۰۸۳۳	۲۰/۱	۰/۰۲۱۷۳۳۴	-۰/۰۴۷۶۷۹۱	۰/۷۰۰۲۰۱	۰/۷۰۰۰۶۷	۲۰	۳۰	BC	۰/۷	۱۸
۰/۰۸۳۳%	۵۰/۱	۰/۰۰۹۵۸۱	-۰/۰۳۵۱۸۹۶	۰/۶۰۰۵۰۱	۰/۶۰۰۱۶۷	۵۰	۳۰	ABC	۰/۶	۱۹
۰/۱۲۵	۳۰/۱۵	۰/۰۱۵۶۴۷۵	-۰/۰۴۳۲۰۶۷	۰/۵۰۰۳۰۱	۰/۵۰۰۰۱	۳۰	۲۰	ABC	۰/۵	۲۰
۰/۰۴۱۶%	۱۱۵/۵	-۱/۲۵۶۲۲۰۵	-۴/۳۲۸۳۶۰۵	۰/۷۰۰۴۱۷	۰/۷۰۰۰۳۸۴	۱۱۵	۱	AG	۰/۷	۲۱
۰/۰۴۱۶	۱۰۰/۵	-۲/۳۸۲۸۷۰۵	-۳/۷۱۵۸۰۶	۰/۴۰۰۴۶۷	۰/۴۰۰۰۳۳۴	۱۰۰	۵	AG	۰/۴	۲۲
.	۷۵	-۰/۰۳۱۲۹۹	-۰/۰۱۲۵۰۳	۰/۸۰۰۵۵۱	۰/۸۰۰۰۵۱	۷۵	۵۰	BG	۰/۸	۲۳
۰/۰۴۱۶	۷۹/۹۵	-۰/۰۰۲۸۷۹۶۷	-۰/۰۱۰۵۱۵۶	۰/۷۰۰۵۳۴	۰/۷۰۰۰۲۶۷	۸۰	۸۰	BG	۰/۷	۲۴
.	۶۰	-۰/۰۰۰۶۲۵۰۲۷	-۰/۰۰۵۹۱۸۱۴	۰/۶۰۰۶۰۱	۰/۶۰۰۰۲۰۱	۶۰	۱۰۰	CG	۰/۶	۲۵
۰/۰۴۱۶	۷۹/۹۵	-۰/۰۰۱۳۷۰۲۸	-۰/۰۰۶۵۷۹۶۹	۰/۶۰۰۵۳۴	۰/۶۰۰۰۲۶۷	۸۰	۶۰	CG	۰/۶	۲۶
۰/۰۴۱۶%	۷۹/۹۵	-۰/۰۰۱۸۱۲۹۸	-۰/۰۱۶۱۰۱۳	۰/۸۰۰۵۳۴	۰/۸۰۰۰۲۶۷	۸۰	۱	ABG	۰/۸	۲۷
.	۹۰	-۰/۰۰۱۶۳۶۹۶	-۰/۰۱۳۷۴۶۶	۰/۵۰۰۵۰۱	۰/۵۰۰۰۳۰۱	۹۰	۱۰	ABG	۰/۵	۲۸
۰/۰۴۱۶%	۱۰۰/۵	-۰/۰۰۱۷۵۵۵۱	-۰/۰۰۶۰۴۲۹۲	۰/۶۰۰۴۶۷	۰/۶۰۰۰۳۳۴	۱۰۰	۲۰	ACG	۰/۶	۲۹
۰/۰۴۱۶	۱۰۹/۹۵	-۰/۰۰۱۳۶۱۷۶	-۰/۰۰۵۱۱۸۶۲	۰/۷۰۰۴۳۴	۰/۷۰۰۰۳۶۷	۱۱۰	۵۰	ACG	۰/۷	۳۰
.	۹۰	-۰/۰۰۲۰۷۳۹۲	-۰/۰۱۹۸۱۸۶	۰/۸۰۰۵۰۱	۰/۸۰۰۰۳۰۱	۹۰	۵۰	BCG	۰/۸	۳۱
۰/۰۴۱۶	۷۹/۹۵	-۰/۰۰۳۰۵۶۸۶	-۰/۰۱۹۶۸۸۵	۰/۵۰۰۵۳۴	۰/۵۰۰۰۲۶۷	۸۰	۷۰	BCG	۰/۵	۳۲
۰/۰۴۱۶%	۸۵/۵	-۰/۰۰۰۷۳۱۶۰۵	-۰/۰۰۹۸۶۸۹۹	۰/۶۰۰۵۱۷	۰/۶۰۰۰۲۸۴	۸۵	۱	AB	۰/۶	۳۳
.	۹۰	-۰/۰۰۱۰۲۶۶۸	-۰/۰۰۸۹۶۲۶۴	۰/۴۰۰۵۰۱	۰/۴۰۰۰۲۰۱	۹۰	۶	AB	۰/۴	۳۴
۰/۰۴۱۶%	۶۴/۹۵	-۴/۵۴۶۶۰۵	-۰/۰۰۴۲۸۶۴۱	۰/۹۰۰۵۸۴	۰/۹۰۰۰۲۱۷	۶۵	۱۰	AC	۰/۹	۳۵
۰/۰۴۱۶	۷۹/۹۵	-۰/۰۰۰۲۴۲۱۷۳	-۰/۰۰۲۹۱۲۵۹	۰/۷۰۰۵۳۴	۰/۷۰۰۰۲۶۷	۸۰	۷۰	AC	۰/۷	۳۶
۰/۰۴۱۶%	۱۰۰/۵	-۰/۰۰۳۰۱۶۲۱	-۰/۰۱۸۲۷۷	۰/۶۰۰۴۶۷	۰/۶۰۰۰۳۳۴	۱۰۰	۵۰	BC	۰/۶	۳۷
.	۹۰	-۰/۰۰۳۱۲۴۹۶	-۰/۰۱۶۳۱۶	۰/۴۰۰۵۰۱	۰/۴۰۰۰۳۰۱	۹۰	۹۰	BC	۰/۴	۳۸
۰/۰۴۱۶%	۱۰۹/۹۵	-۰/۰۰۲۸۰۳۶	-۰/۰۱۵۵۳۳۵	۰/۵۰۰۴۳۴	۰/۵۰۰۰۳۶۷	۱۱۰	۹۰	ABC	۰/۵	۳۹
۰/۰۴۱۶	۱۰۰/۵	-۰/۰۰۳۷۲۶۲۴	-۰/۰۱۴۷۸۷۷	۰/۳۰۰۴۶۷	۰/۳۰۰۰۳۳۴	۱۰۰	۱۰۰	ABC	۰/۳	۴۰

۵- بحث و مقایسه نتایج

در این قسمت هدف مقایسه نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خطا با استفاده از مدل خط DPLFD، DPL و TPPISL در قسمت شبیه‌ساز نرم افزار متلب می‌باشد. در جدول (۳)، نتایج حاصل از پیاده‌سازی آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، خط انتقال مدل TPPISL به دلیل استفاده از پارامترهای فشرده به طور کامل قادر به تشخیص موج سیار ناشی از خطا نمی‌باشد و

قابل استفاده در مطالعات امواج سیار نیست. همچنین میانگین خطای تخمین فاصله مکان وقوع خطا نسبت به مقدار واقعی آن برای ۱۰ سناریوی شبیه‌سازی شده برای مدل DPLFD به دلیل استفاده از پارامترهای وابسته به فرکانس نسبت به مدل DPL با پارامترهای ثابت کمتر می‌باشد. این مقایسه نشان دهنده‌ی دقت مدل جدید ارائه شده در نرم افزار متلب جهت مطالعات حالت‌های گذرا و مکان‌یابی خطا با استفاده از روش‌های مبتنی بر تئوری حالت‌های گذرای امواج سیار می‌باشد.

جدول ۳- نتایج حاصل پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خطا مبتنی بر تئوری امواج سیار با استفاده از نوع مدل خط انتقال موجود در کتابخانه نرم افزار متلب.

مقدار خطای تخمین فاصله مکان وقوع خطا نسبت به مقدار واقعی برای مدل‌های خط انتقال مختلف در محیط شبیه‌ساز نرم افزار متلب			اطلاعات سناریو				شماره سناریو
TPPISL	DPL	DPLFD	فاصله مکان وقوع خطا از ترمینال S (کیلومتر)	مقاومت خطا (اهم)	فاز تحت خطا	زمان وقوع خطا (ثانیه)	
قابل محاسبه نیست	۱/۳۳	۰/۰۸۳۳	۵۰	۱	BG	۰/۴	۱
قابل محاسبه نیست	۱/۱۶	۰/۰۴۱۶	۸۰	۲۰	CG	۰/۳	۲
قابل محاسبه نیست	۰/۱۶۶	۰/۰۴۱۶	۱۱۰	۱۰۰	CG	۰/۸	۳
قابل محاسبه نیست	۰/۴۵۸۳	۰/۰۸۳۳	۱۰۰	۱۰۰	BCG	۰/۵	۴
قابل محاسبه نیست	۱/۱۶	۰/۰۴۱۶	۸۰	۸۰	ABG	۰/۶	۵
قابل محاسبه نیست	۱/۱۶	۰/۰۴۱۶	۴۰	۴۰	ACG	۰/۵	۶
قابل محاسبه نیست	۰/۷	۰/۰۴۱۶	۲۰	۵۰	AB	۰/۸	۷
قابل محاسبه نیست	۰/۸۷۵	۰	۹۰	۹۰	AC	۰/۴	۸
قابل محاسبه نیست	۰/۸۷۵	۰/۱۲۵	۳۰	۴۰	BC	۰/۶	۹
قابل محاسبه نیست	۱/۳۷	۰	۷۵	۳۰	ABC	۰/۹	۱۰

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مراحل کامل و دقیق پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خطا با استفاده از تئوری امواج سیار در نرم افزار متلب مبتنی بر خط انتقال با پارامترهای وابسته به فرکانس آورده شده است. در این مقاله با جزئیات دقیق روش پیاده‌سازی مدل خط مورد نظر در بستر شبیه‌سازی نرم افزار متلب آورده شده است. قسمت‌های مختلف تنظیمات خط DPLFD جهت پیاده‌سازی در قسمت شبیه‌ساز نرم افزار توضیح داده شده است. جهت تست و ارزیابی عملکرد هر سه مدل خط مورد نظر در کتابخانه نرم افزار متلب نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خطا با استفاده از روش امواج سیار در قسمت شبیه‌سازی آورده شده است. طبق نتایج بدست آمده، در فرکانس‌های چندین مگاهرتز، زمانی که از مدل TPPISL استفاده می‌گردد، موج‌های سیار ناشی از خطا قابل استخراج نمی‌باشند لذا این مدل به دلیل فشرده بودن پارامترها در فرکانس‌های بالا قابل استفاده نمی‌باشد، اما زمانی که از مدل توزیع شده با پارامترهای ثابت استفاده می‌شود موج‌های ناشی از خطا قابل استخراج

می‌باشند اما دقت تخمین فاصله مکان خطا نسبت به مدل خط انتقال توزیع شده با پارامترهای وابسته به فرکانس کمتر می‌باشد. طبق نتایج ارائه شده در قسمت شبیه‌سازی و مقایسه این مقاله دقت الگوریتم مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار با استفاده از مدل خط DPLFD نسبت به مدل‌های دیگر خط در کتابخانه این نرم افزار دقیق تر و با کمترین خطا می‌باشد. میانگین خطای تخمین فاصله در نظر گرفته شده در الگوریتم مکان‌یابی خطا با استفاده از مدل پیشنهادی برای ۴۰ سناریوی پیاده‌سازی شده زیر ۰/۰۱ درصد محاسبه شده است. نتایج موفقیت آمیز حاصل از پیاده‌سازی نرم افزاری برای ۷ سناریو موردی و برای ۴۰ سناریو به صورت عمومی موید عملکرد دقیق الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله هیچ گونه تعارض منافع وجود ندارد.
نایب‌دیه اخلاقی: نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ کنفرانس و مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مراجع

- [1] M. Abasi, M. Joorabian, A. Saffarian, and S. G. Seifossadat, "A Comprehensive Review of Various Fault Location Methods for Transmission Lines Compensated by FACTS Devices and Series Capacitors," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* 9, no. 3 (2021): 213-225.
- [2] N. M. Khoa, M. V. Cuong, H. Q. Cuong, and N. T. T. Hieu, "Performance Comparison of Impedance-Based Fault Location Methods for Transmission Line," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications* 11, no. 3 (2022): 234-241.
- [3] D. Wang et al., "Frequency Modification Algorithm-Based Traveling Wave Fault Location Approach for Overhead Transmission Lines with Structural Changes," *Protection and Control of Modern Power Systems* 10, no. 2(2025): 1–12.
- [4] M. Davoudi, J. Sadeh, and E. Kamyab, "Parameter-free fault location for transmission lines based on optimisation," *IET Generation, Transmission and Distribution* 9, no. 11(2015): 1061-1068.
- [5] G. Wang, C. Zhuang, J. Deng, and Z. Xie, "A Fault Location Method Based on Electromagnetic Transient Convolution Considering Frequency-Dependent Parameters and Lossy Ground," *IEEE Transactions on Power Delivery* 39, no. 2(2024): 1012-1022.
- [6] A. Elnozahy, K. Sayed, and M. Bahyeldin, "Artificial Neural Network Based Fault Classification and Location for Transmission Lines," In IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy, CPERE 2019, 2019.
- [7] Ö. Özdemir, R. Köker, and N. Pamuk, "Fault Classification and Precise Fault Location Detection in 400 kV High-Voltage Power Transmission Lines Using Machine Learning Algorithms" *Processes* 13, no. 2(2025):1-20.
- [8] A. Naresh Kumar, C. Sanjay, and M. Chakravarthy, "Adaptive neuro fuzzy inference system-based fault location technique in double circuit transmission line against simultaneous faults" *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design* 3, no. 2(2020): 143-150.
- [9] C. Christopoulos, Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility, Second Edition. 2007.
- [10] N. Tleis, Power systems modelling and fault analysis: Theory and practice. 2019.
- [11] J. D. Glover, T. Overbye, and M. S. Sarma, Power system analysis & design. Cengage Learning, 2017.
- [12] H. W. Dommel, "Numerical modelling of frequency-dependent transmission-line parameters in an electromagnetic transients program" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 93, no. 5(1974): 1401-1409.
- [13] A. Dabuleanu, "Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 94, no. 2(1975): 561-571.
- [14] J. R. Marti, "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 101, no. 1(1982): 147-157.
- [15] B. Gustavsen, G. Irwin, R. Mangelrød, D. Brandt, and K. Kent, "Transmission line models for the simulation of interaction phenomena between parallel AC and DC overhead lines" International Conference on Power System Transients, vol 99, 1999.
- [16] "<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pisectionline.html>."
- [17] "<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/distributedparametersline.html>."
- [18] "<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/distributedparameterslinefrequencydependent.html>."
- [19] F. Deng, X. Zeng, X. Tang, Z. Li, Y. Zu, and L. Mei, "Travelling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission lines using three-dimensional absolute grey incidence degree" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 114, (2020).
- [20] R. S. Pathak, The Wavelet Transform, vol. 4. Paris: Atlantis Press, 2009.
- [21] D. F. Walnut, An Introduction to Wavelet Analysis. Boston, MA: Birkhäuser Boston, 2004.
- [22] C. M. Akujuobi, Wavelets and Wavelet Transform Systems and Their Applications. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [23] F. H. Magnago and A. Abur, "Fault location using wavelets" *IEEE Transactions on Power Delivery* 13, no. 4(1998): 1475-1480.
- [24] S. M. Torabi, "Fault location and classification in distribution systems using clark transformation and neural network," In 16th Electrical Power Distribution Conference, EPDC 2011, 2011.