Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 2 – Summer 2024
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Fault Detection, Classification and Location in Compensated Transmission System Using Gabor Wavelet Transform and Traveling Wave Theory

Ehsan Akbari[1], *Assistant professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran, e.akbari@ustmb.ac.ir

Abstract:
The occurrence of various faults in the transmission lines is inevitable due to the power transmission lines' complexity and length. Detecting, classifying, and locating faults in these systems can prevent further damage to the power grid. Algorithms based on the traveling wave theory are often implemented based on signal processing methods and can determine only the location of the faults. Determining the type of fault due to the wide variety of possible faults in the transmission lines can help the protection system operate more reliably and faster. Accordingly, in this paper, an integrated fault detection, classification, and location model is proposed, which uses only the voltage signals measured on one terminal of the transmission line. In order to extract features from the primary signal, Gabor wavelet transformation is used and its results will be utilized for fault detection and classification. Next, the traveling wave concept is applied to determine the fault section and estimate its location. In addition, due to the installation of the reactive power compensator in the transmission line, the performance of the protection system must be updated. Simulation results in MATLAB demonstrate the accurate performance of the proposed model in fault detection, classification, and location. By employing the proposed strategy, the average accuracy of fault classification and location is 100% and 99.573%, respectively.

Keywords: Fault detection, classification and location, Compensated transmission system, Gabor wavelet transform, Traveling wave theory.

Received: 2 May 2024
Revised: 9 Jun. 2024
Accepted: 6 July 2024

*** Corresponding Author:** Dr. Ehsan Akbari

Citation: E. Akbari, “Fault Detection, Classification and Location in Compensated Transmission System Using Gabor Wavelet Transform and Traveling Wave Theory”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 2, pp. 1-17, September 2024 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

مقاله پژوهشی

تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا در سیستم انتقال جبران‌سازی شده به کمک تبدیل موجک گابور و تئوری امواج سیار

احسان اکبری[1]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، e.akbari@ustmb.ac.ir

چکیده: بروز خطاهای مختلف در سیستم انتقال به دلیل پیچیدگی ساختار و طولانی بودن خطوط انتقال نیرو، امری اجتناب ناپذیر است. تشخیص، دسته‌بندی و تعیین مکان خطا در این سیستم‌ها می‌تواند از بروز خسارت‌های بیشتر به شبکه قدرت جلوگیری کند. الگوریتم‌های مبتنی بر تئوری امواج سیار غالباً بر اساس روش‌های پردازش سیگنال پیاده‌سازی شده و قادرند تنها مکان بروز خطا را مشخص کنند. در حالی که تعیین نوع خطا به دلیل تنوع بالای خطاهای احتمالی در خطوط انتقال، به عملکرد بهتر و سریع‌تر سیستم حفاظتی کمک می‌کند. به همین منظور در این مقاله، یک الگوی تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا به صورت یکپارچه پیشنهاد می‌شود که تنها از سیگنال‌های ولتاژ اندازه‌گیری شده روی یک ترمینال خط انتقال استفاده می‌کند. به منظور استخراج ویژگی از سیگنال اولیه از تبدیل موجک گابور استفاده شده و نتایج آن برای تشخیص و دسته‌بندی خطا استفاده خواهد شد. در ادامه نیز تئوری امواج سیار به منظور تعیین سکشن خطا و مکان‌یابی آن اعمال می‌گردد. علاوه بر این، به دلیل نصب جبران‌ساز توان رأکتیو در خط انتقال، عملکرد سیستم حفاظتی می‌بایست به‌روزرسانی شود. نتایج شبیه‌سازی عددی در محیط MATLAB نشان‌دهنده عملکرد دقیق الگوی پیشنهادی در تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا است. به کمک استراتژی پیشنهادی، میانگین دقت دسته‌بندی خطا و مکان‌یابی خطا به ترتیب برابر ۱۰۰٪ و ۹۹,۵۷۳٪ به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا، سیستم انتقال جبران‌سازی شده، تبدیل موجک گابور، تئوری امواج سیار.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۶

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر احسان اکبری
نشانی نویسنده مسئول: بابل، دانشگاه علوم و فنون مازندران، دانشکده مهندسی برق.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

۱- مقدمه

در شبکه‌های انتقال نیرو به‌طور مداوم در حال گسترش بوده و ساختار آن‌ها پیچیده‌تر می‌شود، که این امر چالش‌هایی مانند حفاظت پیشرفته خطوط انتقال، پایداری سیستم قدرت، پایداری ولتاژ و کیفیت توان را در پی دارد. این چالش‌ها با نفوذ بالای انرژی تجدیدپذیر (RE[۱])، نصب تجهیزات مبتنی بر مبدل قدرت و بارهای غیرخطی مهم‌تر می‌شوند [۱]. روش مرسوم تشخیص خطا در خطوط انتقال استفاده از رله‌های دیستانس است. به‌طور کلی، عملکرد نادرست این رله‌ها ناشی از نوسانات توان، افزایش بار و خطاهای امپدانس بالا (HIFs[۲]) است [۲]. در حال حاضر، محققان و مهندسان قدرت بر روی بهبود تکنیک‌های شناسایی خطای خط انتقال با استفاده ازروش‌های پردازش سیگنال و تکنیک‌های هوشمند برای کاهش محدودیت‌های رله‌های معمولی تمرکز کرده‌اند. در [۳]، نویسندگان یک روش مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشن (CNN[۳]) را برای شناسایی و دسته‌بندی خطاهای رخ داده در خطوط برق طراحی کردند. این الگوی حفاظتی از تکنیک استخراج ویژگی با تصویربرداری سری زمانی استفاده می‌کند. تبدیل موجک گسسته (DWT[۴]) روش پردازش سیگنال دیگری است که به‌منظور نویز زدایی شکل موج‌های ولتاژ و جریان ثبت شده در حین خطا به کار می‌رود. در [۴]، نویسندگان تکنیک‌هایی را طراحی کردند که از داده‌های ثبت شده با استفاده از امواج سیار (TW[۵]) در مدارهای موازی تک ترمینالی خطوط برق مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی (STATCOM[۶]) برای تشخیص، مکان‌یابی و تعیین سکشن خطا و همچنین فازهای دچار خطا استفاده می‌کنند. عملکرد این روش در شرایط حضور یا عدم حضور STATCOM تغییری نکرده است. در [۵]، یک الگوریتم حفاظتی با استفاده از DWT برای تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا در یک خط انتقال جبران‌سازی شده به کمک STATCOM در مرکز خط طراحی شده است. به‌منظور تشخیص خطا از آنالیز شکل موج جریان استفاده شده است. در[۶]، نویسندگان سه روش دسته‌بندی و رگرسیون مبتنی بر یادگیری عمیق (DL[۷]) را با استفاده از شبکه‌های عصبی بازگشتی عمیق (DRNN[۸]) برای شناسایی ناحیه خطا، دسته‌بندی نوع خطا و مکان‌یابی خطا طراحی کرده‌اند. این مدل‌ها از داده‌های حالت گذرای سیکل‌های قبل و بعد از خطا در شکل موج جریان و ولتاژ در هر دو ترمینال خط استفاده می‌کنند. یک تکنیک بهینه‌سازی عملکرد روش تشخیص خطای خط انتقال با استفاده از ضرایب انتقال خط و ضریب تضعیف امواج ولتاژ و امواج جریان در [۷] پیشنهاد شده است. در [۸]، نویسندگان یک الگوی تشخیص خطا با استفاده از ضرایب همبستگی شکل موج جریان برای مدارهای موازی خطوط انتقال معرفی کرده‌اند. در [۹]، الگوریتم مبتنی بر منطق فازی برای تشخیص و دسته‌بندی خطاهای مختلف روی یک خط انتقال پیشنهاد شده است. این روش در تشخیص و دسته‌بندی انواع خطاهای سری در مکان‌های مختلف، با زوایای مختلف شروع خطا عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است. روش‌های پردازش سیگنال موجود برای تشخیص و مکان‌یابی خطاها در خطوط انتقال به روش‌های مبتنی بر امپدانس، مبتنی بر فرکانس بالا و مبتنی بر دانش طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰]. استراتژی‌های مبتنی بر امپدانس را روش‌های وابسته به داده نیز می‌نامند. این روش‌ها فقط از داده‌های موجود برای تشخیص خطا استفاده می‌کنند، در حالی که این داده‌ها ممکن است حاوی اطلاعات کافی در مورد خطا نباشند. از این رو، این داده‌ها به ویژگی‌های معنی‌دار تبدیل می‌شوند که به این روش، تکنیک استخراج ویژگی می‌گویند. تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA[۹]) [۱۱] و تحلیل مؤلفه‌های اساسی (PCA[۱۰]) [۱۲] از جمله این تکنیک‌ها هستند. به دلیل سادگی پیاده‌سازی، این روش‌ها را می‌توان به راحتی برای تخمین آنلاین به کار برد. از سوی دیگر، روش‌های تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی متعددی در مقالات ارائه شده‌اند، به‌عنوان مثال، تبدیل والش هادامارد (WHT[۱۱]) [۱۳]، تبدیل فوریه سریع (FFT[۱۲]) [۱۴]، تبدیل هیلبرت-هوانگ (HHT[۱۳]) [۱۵] و تبدیل استاکول (ST[۱۴]) [۱۶]. در این میان، WHT تنها می‌تواند خطاهای خطوط انتقال را با توجه به سیگنال‌های اندازه‌گیری شده جریان تشخیص دهد. FFT را می‌توان فقط برای تشخیص و مکان‌یابی سکشن خطا بر اساس سیگنال‌های جریان اندازه‌گیری شده در نزدیکی ترمینال‌های شبکه استفاده کرد. علیرغم توانایی HHT در تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا، این روش به دلیل بهره‌گیری از تکنیک تجزیه مود ذاتی (EMD[۱۵]) با مشکلاتی نظیر اثرات انتهایی[۱۶] و اختلاط مود[۱۷] مواجه است [۱۷]. در مقابل، تبدیل موجک (WT[۱۸]) به دلیل بهره‌گیری از ابزارهای آنالیز سیگنال در حوزه زمان و فرکانس، برای تشخیص و دسته‌بندی خطا در

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

خطوط انتقال نیرو گزینه مناسبی است [۱۸]. موجک گابور (GW[۱۹]) یک موجک استثنایی در کاربردهای استخراج ویژگی است که برای پردازش سیگنال‌های تک‌بعدی و دوبعدی کاربرد دارد [۱۹]. ویژگی بارز این موجک، پردازش چند رزولوشنی است که به‌خصوص برای استخراج ویژگی از سیگنال‌های پیچیده مفید است [۲۰]. روش تلفیقی را برای تشخیص خطا استفاده کرده است [۲۲]. از روش ماشین بردار پشتیبان چند کلاسه برای تشخیص خطا بهره گرفته است [۲۳]. در این مقاله به‌منظور پردازش سیگنال‌های ثبت شده در سیستم انتقال، از تبدیل موجک گابور استفاده می‌شود. ویژگی‌های استخراجی از سیگنال گابور در ادامه برای تشخیص، دسته‌بندی، تعیین سکشن و مکان‌یابی خطا به کار می‌رود. این ویژگی‌های استخراجی شامل دامنه اولین پیک در سیگنال گابور و زمان متناظر با اولین پیک در سیگنال گابور است. در الگوی پیشنهادی، سیگنال‌های ولتاژ سه فاز روی یکی از ترمینال‌های سیستم انتقال اندازه‌گیری شده و به‌عنوان ورودی به تکنیک پردازش سیگنال اعمال می‌گردد. در روند دسته‌بندی خطا، مؤلفه توالی صفر ولتاژ به‌منظور تفکیک خطاهای زمین از خطاهای غیر زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین مؤلفه مودال ولتاژ نیز به‌منظور تعیین سکشن خطا و مکان دقیق آن به کار می‌رود. دقت استراتژی پیشنهادی با استفاده از مطالعات شبیه‌سازی تحت سناریوهای مختلف خطا ارزیابی خواهد شد. نوآوری‌های مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ارائه یک الگوی یکپارچه به‌منظور تشخیص، دسته‌بندی، تعیین سکشن و مکان‌یابی خطا در سیستم انتقال
- بهره‌گیری از موجک گابور با رزولوشن بالا برای پردازش دقیق‌تر سیگنال اولیه و استخراج ویژگی‌های مفیدتر از آن
- معرفی شاخص‌های جدید قابل استخراج از سیگنال گابور به‌منظور تشخیص خطا، تفکیک خطای زمین از غیر زمین، تعیین فازهای خطادار و تخمین مکان خطا
- ارائه استراتژی مکان‌یابی خطا مبتنی بر تئوری امواج سیار، به‌گونه‌ای که تنها سیگنال‌های یک ترمینال شبکه برای اجرای آن مورد نیاز است.

ادامه مقاله به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود. در بخش ۲ تکنیک استخراج ویژگی مبتنی بر موجک گابور تشریح می‌شود. جزئیات استراتژی پیشنهادی تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا در بخش ۳ ارائه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت مقاله در بخش ۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهد شد.

۲- موجک گابور

اندازه در موجک گابور اولین بار بر اساس توابع مختلط و به‌عنوان مبنایی برای تبدیل فوریه در کاربردهای تئوری اطلاعات مورد استفاده قرار گرفت ویژگی اصلی گابور نسبت به سایر موجک‌ها این است که انحراف استاندارد سیگنال اولیه را در حوزه زمان و فرکانس به حداقل می‌رساند. به عبارت دیگر عدم قطعیت در اطلاعات موجود در این موجک به حداقل رسیده است [۱۹]. موجک گابور تک‌بعدی از حاصل‌ضرب یک تابع مثلثاتی در یک تابع گاوسی بر اساس رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$W\left(t,t_0,\omega\right)=e^{-\sigma(t-t_0)^2}e^{i\omega(t-t_0)} \quad (۱)$$

این یک تابع حوزه زمان-فرکانس است و نشان می‌دهد که افزایش زمان (بیشتر شدن تفاضل t_0 و t)، تابع به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در این رابطه، σ پارامتر کنترل نرخ افت تابع نمایی است و ω نیز فرکانس است. با انتگرال‌گیری از حاصل‌ضرب (۱) در یک سیگنال زمانی مانند $x(t)$ برحسب t، تبدیل موجک گابور تک‌بعدی برای این سیگنال به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C\left(x\left(t\right)\right)\left(t_0,\omega\right)=\int_{-\infty}^{\infty}x\left(t\right)W\left(t,t_0,\omega\right)dt \quad (۲)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

با جایگذاری (۱) در (۲) و بسط تابع نمایی $e^{i\omega(t-t_0)}$ داریم:

$$C\left(x\left(t\right)\right)\left(t_0,\omega\right)=\int_{-\infty}^{\infty}x\left(t\right)e^{-\sigma\left(t-t_0\right)^2}\cos\left(\omega\left(t-t_0\right)\right)dt \\ +i\int_{-\infty}^{\infty}x\left(t\right)e^{-\sigma\left(t-t_0\right)^2}\sin\left(\omega\left(t-t_0\right)\right)dt \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، قسمت اول بخش حقیقی و قسمت دوم، بخش موهومی سیگنال گابور است. سیگنال گابور ارتباط میان متغیرهای فرکانسی و زمانی سیگنال اولیه را نشان می‌دهد. در شرایط نرمال، سیگنال‌های جریان و ولتاژ در شبکه سینوسی هستند، اما در صورت بروز هر نوع اغتشاش (ازجمله خطاهای مختلف خط انتقال) این سیگنال‌ها دچار اعوجاج می‌شوند. فرکانس نوسانات اعوجاج‌های ناشی از بروز خطا در سیستم در حالت عادی قابل سنجش نیست، اما به کمک تبدیل موجک گابور، می‌توان دامنه و فرکانس این نوسانات را اندازه‌گیری نمود. دامنه نوسانات سیگنال گابور و اختلاف زمانی بین اسپایک‌های مجاور حاوی اطلاعات مهمی در مورد خطا هستند. با استخراج این اطلاعات و مقایسه آن‌ها می‌توان دسته‌بندی، تعیین سکشن و مکان‌یابی خطا را انجام داد. برای اعمال تبدیل موجک گابور می‌بایست یک فریم مشخص با تعداد نمونه‌های متناهی از سیگنال اصلی انتخاب شود. به این منظور یک دوره تناوب از سیگنال اولیه انتخاب می‌شود.

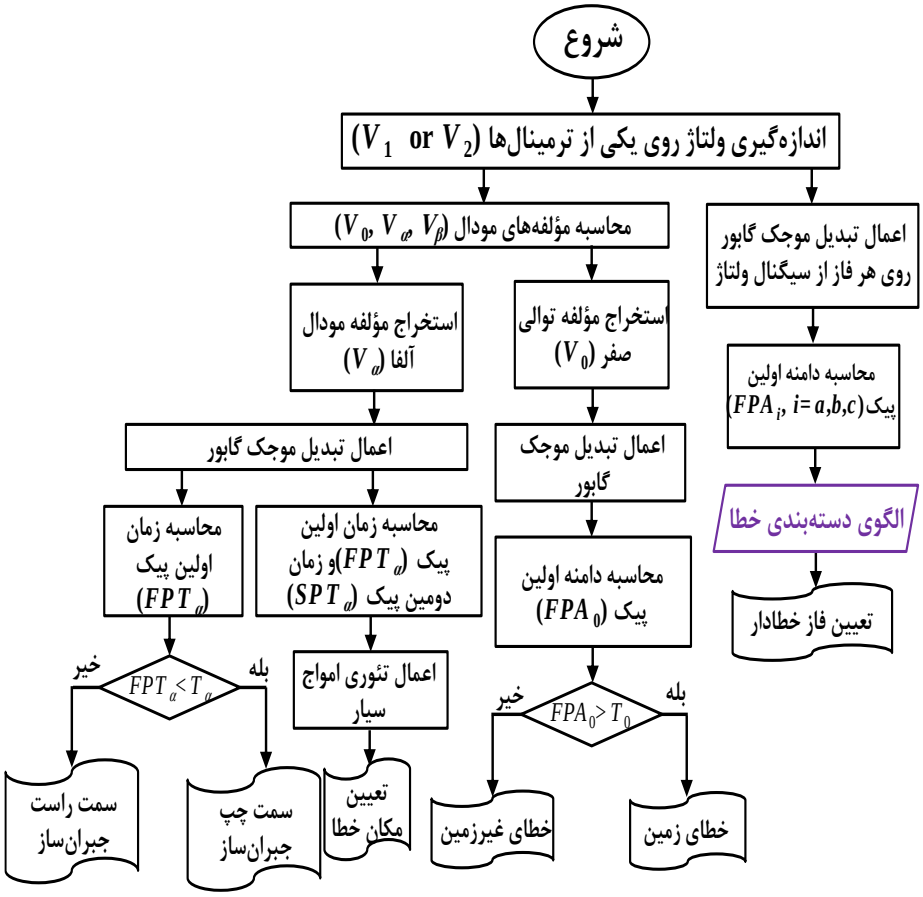
۳- استراتژی پیشنهادی

در این بخش الگوی پیشنهادی تشخیص، دسته‌بندی، تعیین سکشن و مکان‌یابی خطا تشریح می‌گردد. در این الگو، پس از اندازه‌گیری ولتاژهای سه فاز روی یکی از ترمینال‌های سیستم انتقال مورد مطالعه، تبدیل موجک گابور روی یک دوره تناوب (یک سیکل) از این سیگنال‌ها اعمال شده و مشخصه‌های آن استخراج می‌گردد. علاوه بر این، مؤلفه‌های مودال ولتاژ نیز طبق رابطه (۴) برای سیگنال‌های ولتاژ محاسبه شده و تبدیل موجک گابور برای دو مؤلفه V_0 و V_α اعمال می‌گردد.

$$\begin{pmatrix}V_0\\V_\alpha\\V_\beta\end{pmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1&1&1\\2&-1&-1\\0&\sqrt{3}&-\sqrt{3}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}V_a\\V_b\\V_c\end{pmatrix} \quad (۴)$$

در نهایت تبدیل موجک گابور برای سیگنال‌های V_a، V_b، V_c، V_0 و V_α به دست آمده و دو شاخص «دامنه اولین پیک (FPA[۲۰])» و «زمان اولین پیک (FPT[۲۱])» برای هر سیگنال گابور محاسبه می‌گردد. این دو مؤلفه در مرحله بعد مطابق با فلوچارت شکل (۱) برای دسته‌بندی، تعیین سکشن و مکان‌یابی خطا استفاده می‌شوند. لازم به ذکر است که مقادیر آستانه در فلوچارت شکل (۱) بر اساس روش آزمون و خطا و با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف خطا به دست می‌آیند. این مقادیر به همراه سایر پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که شاخص FPA برای تشخیص، دسته‌بندی و تفکیک خطای زمین از غیر زمین به کار می‌رود، در حالی که شاخص FPT به‌منظور تعیین سکشن خطا استفاده می‌شود. برای تعیین مکان دقیق خطا، اختلاف‌زمانی بین زمان اولین پیک یا همان FPT و زمان دومین پیک (SPT[۲۲]) محاسبه شده و به کمک تئوری امواج سیار، مکان خطا تعیین می‌گردد. با این روش تنها اندازه‌گیری ولتاژ روی یکی از ترمینال‌های سیستم انتقال مورد نیاز است. هر یک از اهداف تشخیص، دسته‌بندی، تعیین سکشن و مکان‌یابی خطا در ادامه توضیح داده خواهد شد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024



شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی

Figure (1): Flowchart of the proposed method

۳-۱- تشخیص خطا

به‌منظور تشخیص خطا در سیستم انتقال، کافی است پارامتر FPA محاسبه شده برای سیگنال V_α با مقدار آستانه از پیش تعریف شده‌ای مقایسه شود. در شرایط نرمال، FPA مقداری نزدیک به صفر است در حالی که در صورت بروز هر نوع خطا در سیستم انتقال، این پارامتر مقدار قابل توجهی خواهد داشت. مقدار آستانه برای تشخیص بروز خطا بر اساس روش آزمون و خطا قابل تعیین است.

۳-۲- دسته‌بندی خطا

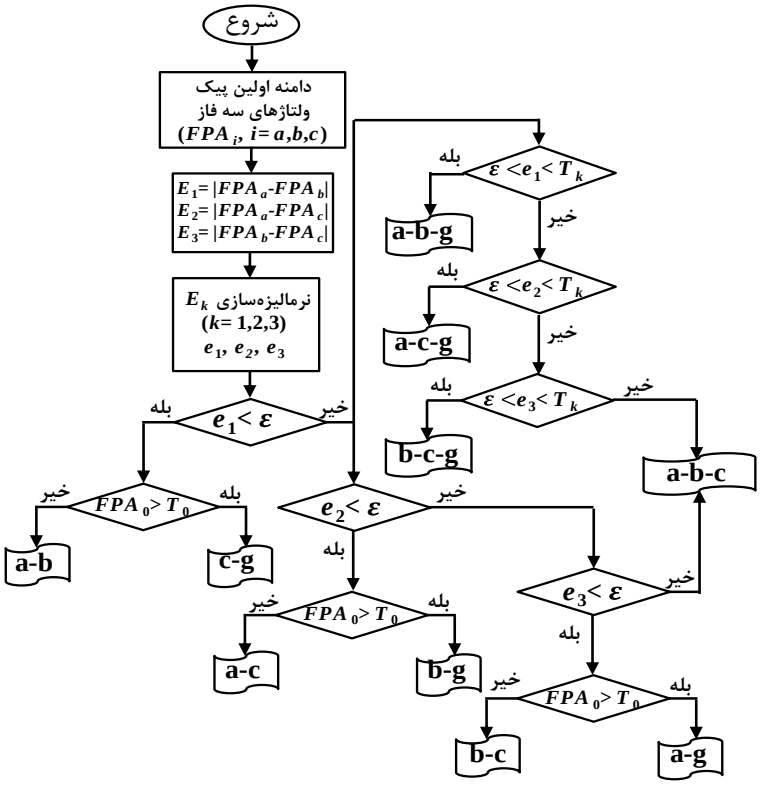
این دسته‌بندی خطا در استراتژی پیشنهادی شامل دو مرحله است: مرحله اول تفکیک خطای زمین از خطای غیر زمین و مرحله دوم، تعیین فازهای خطادار. همان‌طور که قبلاً بیان شد، مؤلفه توالی صفر ولتاژ و سیگنال گابور متناظر با آن برای تفکیک خطای زمین از خطای غیر زمین به کار می‌رود. در صورتی که خطا از نوع زمین باشد، پارامتر FPA در سیگنال گابور مؤلفه توالی صفر مقدار بزرگی خواهد داشت در حالی که برای خطاهای غیر زمین، این پارامتر بسیار کوچک و نزدیک به صفر است. لذا با مقایسه آن با یک مقدار آستانه می‌توان خطای زمین را از خطای غیر زمین تفکیک نمود. اما برای تعیین فازهای خطادار، یک الگوی دسته‌بندی مجزا مورد نیاز است که در فلوچارت شکل (۱) در بلوک «الگوی دسته‌بندی خطا» تعریف شده است. پارامترهای FPA متناظر با ولتاژهای سه فاز به‌عنوان ورودی به این الگو اعمال می‌گردد. در ادامه، طبق رابطه (۵) اندازه تفاضل دو به دو برای سه کمیت FPAi (i=a,b,c) محاسبه شده و مطابق رابطه (۶) نرمالیزه می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

$$E_1 = \left|FPA_a - FPA_b\right|$$
$$E_2 = \left|FPA_a - FPA_c\right| \quad (۵)$$
$$E_3 = \left|FPA_b - FPA_c\right|$$

$$e_1 = \frac{E_1}{\max\left(E_1, E_2, E_3\right)}$$
$$e_2 = \frac{E_2}{\max\left(E_1, E_2, E_3\right)} \quad (۶)$$
$$e_3 = \frac{E_3}{\max\left(E_1, E_2, E_3\right)}$$

در مرحله بعد، طبق فلوچارت شکل (۲)، دسته‌بندی خطا با مقایسه پارامترهای e_1، e_2 و e_3 را مقادیر آستانه از پیش تعریف شده، انجام خواهد شد. پارامتر ε در این فلوچارت مقدار بسیار کوچکی است و بدان معنی است که تفاضل نرمالیزه شده پارامترهای FPA متناظر با فازهای درگیر در خطا، مقدار ناچیزی است.



شکل (۲): فلوچارت الگوی دسته‌بندی خطا

Figure (2): Flowchart of fault classification pattern.

۳-۳- تعیین سکشن خطا

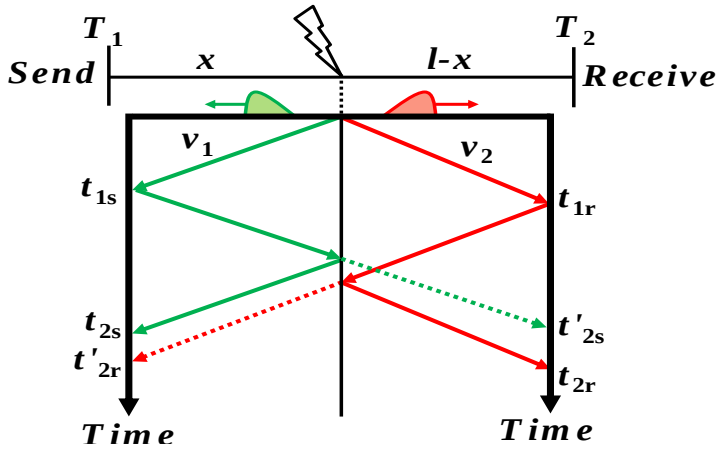
از آنجایی که سیستم انتقال مورد مطالعه در این مقاله، یک سیستم جبران‌سازی شده است، پیش از تعیین محل دقیق خطا، می‌بایست سکشن خطا مشخص گردد. خطا در چنین سیستم یا در سمت راست جبران‌ساز رخ می‌دهد و یا در سمت چپ آن، بنابراین با خروجی الگوی پیشنهادی یکی از این دو مورد خواهد بود. پارامتر زمان اولین پیک (FPT) مربوط به مؤلفه ولتاژ V_α معیار مناسبی برای تعیین سکشن خطا است. به این صورت که هر چه خطا به نقطه اندازه‌گیری نزدیک‌تر باشد، FPT متناظر با

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

V_α (FPT_α) مقدار کوچک‌تری است. بنابراین با تعیین یک مقدار آستانه (T_α) و مقایسه FPT_α با آن، می‌توان سکشن خطا را تعیین نمود. لازم به توضیح است که مقدار آستانه T_α، مقدار عددی پارامتر FPT_α در محل قرارگیری جبران‌ساز است. به عبارت دیگر با شبیه‌سازی خطا در محل قرارگیری جبران‌ساز، و محاسبه FPT_α، مقدار آستانه T_α به دست می‌آید.

۴-۳- تعیین مکان خطا

در این مقاله به‌منظور تعیین مکان دقیق خطا، تئوری امواج سیار به کار رفته است. در تئوری امواج سیار، بروز هر خطا در سیستم انتقال باعث انتشار موج‌های حالت گذرا در دو سمت محل خطا می‌گردد. مطابق با این تئوری، زمان پیک‌های مشاهده شده در سیگنال گابور، متناسب با زمان برخورد جبهه موج ناشی از بروز خطا به ترمینال اندازه‌گیری است. این زمان‌های برخورد در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): دیاگرام الگوی انتشار موج ناشی از بروز خطا در خط انتقال بر اساس تئوری امواج سیار

Figure (3): Diagram of the pattern of wave propagation caused by a fault in the transmission line based on the theory of traveling waves

اگر سرعت انتشار موج $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ باشد (که L و C به ترتیب اندوکتانس و ظرفیت خازنی خط انتقال هستند)، در این صورت مطابق با تئوری TW، همان‌طور که در رابطه (۷) تعریف شده است، مکان دقیق خطا با تفاضل زمان‌های برخورد موج (TDOA[۲۳]) ارتباط مستقیم خواهد داشت [۲۱]. TDOA از تفاضل t_{2s}-t_{1s} در شکل (۳) به دست می‌آید. از آنجایی که زمان‌های برخورد موج متناسب با زمان‌های پیک در سیگنال گابور است، لذا زمان برخورد اولین موج و دومین موج برگشتی به نقطه اندازه‌گیری (ترمینال T_1 در شکل (۳))، متناظر با زمان اولین پیک (FPT) و زمان دومین پیک (SPT) در سیگنال گابور است.

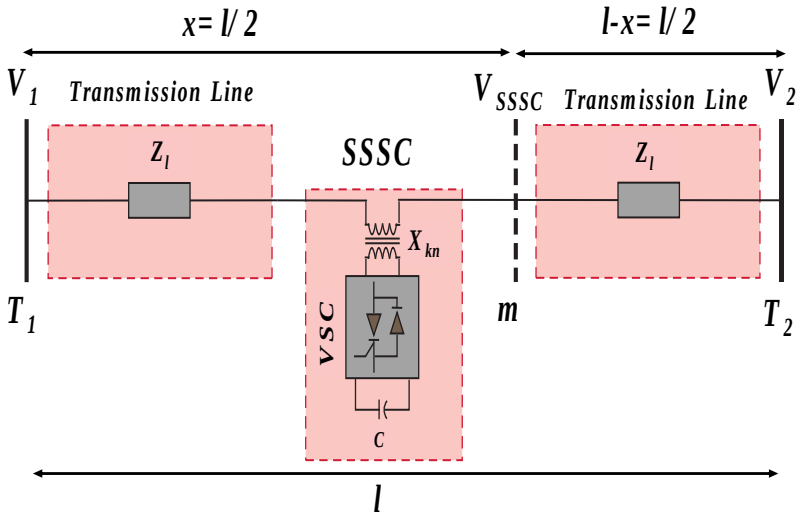
$$\begin{cases} \hat{d} = v \times \dfrac{SPT_\alpha - FPT_\alpha}{2} & if\ 0 \prec d \prec \dfrac{l}{2} \\ \hat{d} = l - (v \times \dfrac{SPT_\alpha - FPT_\alpha}{2}) & if\ \dfrac{l}{2} \prec d \prec l \end{cases} \qquad (۷)$$

در این رابطه، $\hat{d}$ مکان تخمینی خطا را نشان می‌دهد و l طول خط انتقال است. v نیز سرعت انتشار موج است. همان‌طور در (۷) مشخص است، مکان خطا از دو معادله مختلف محاسبه می‌شود که انتخاب معادله مربوطه بر اساس سکشن خطا خواهد بود. با این فرض که جبران‌ساز در وسط خط انتقال متصل شده باشد، اگر خطا در سمت چپ جبران‌ساز باشد، معادله اول در (۷) و اگر خطا در سمت راست جبران‌ساز رخ دهد، معادله دوم در (۷) استفاده می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، یک خط انتقال به طول $l = 200km$ در محیط MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده و یک جبران‌ساز توان رأکتیو از نوع جبران‌ساز سنکرون استاتیک سری (SSSC[۲۴]) در وسط خط متصل شده است. سیستم انتقال شبیه‌سازی شده در شکل (۴) ترسیم شده است. در این شکل فرض بر این است که نقطه m در وسط خط انتقال واقع است. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌ها در نسخه MATLAB R2021b و روی یک سیستم Core i7، رم ۸ Gb و پردازنده ۲۴۰۰ GHz انجام شده است. همچنین زمان شبیه‌سازی t=0.1s و نرخ نمونه‌برداری $T_s = 5\times10^{-6}s$ در نظر گرفته شده است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۱) لیست شده است. لحظه بروز خطا نیز t_f=0.06s است.



شکل (۴): سیستم انتقال شبیه‌سازی شده با جبران‌ساز SSSC

Figure (4): Simulated transmission system with SSSC

Table (1): Simulation parameters and default threshold values

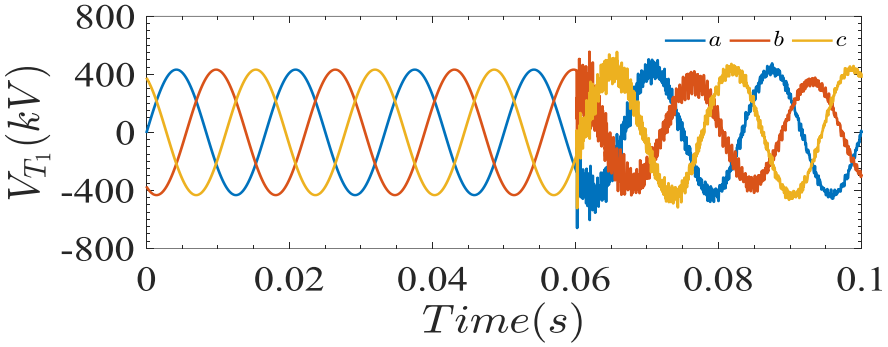
جدول (۱): پارامترهای شبیه‌سازی و مقادیر آستانه پیش‌فرض

پارامتر	نماد	مقدار
پارامتر کنترل نرخ افت تابع نمایی	σ	۱
کران پایین مؤلفه e_k (k=1,2,3)	ε	۰,۰۱
مقدار آستانه مؤلفه V_α (s)	T_α	۰,۰۶۰۴۶
مقدار آستانه مؤلفه V_0	T_0	۱۰۰۰
مقدار آستانه مؤلفه e_k (k=1,2,3)	T_k	۰,۵
طول خط انتقال (km)	l	۲۰۰
اندوکتانس خط (H/km)	L	۰,۹۳۳×۱۰$^{-۳}$
ظرفیت خازنی خط (F/km)	C	۳۵,۱۴۵×۱۰$^{-۹}$
فرکانس شبکه ac (Hz)	f	۶۰

۴-۱- سناریوی ۱

در سناریوی اول، یک خطای تکفاز به زمین روی فاز b (b-g) در سمت چپ جبران‌ساز و در فاصله $d = 40km$ نسبت به نقطه اندازه‌گیری (ترمینال T_1) با مقاومت R_f=1Ω و مقاومت زمین R_g=0.1Ω رخ می‌دهد. در این حالت، ولتاژهای سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال T_1 در شکل (۵) ترسیم شده‌اند.

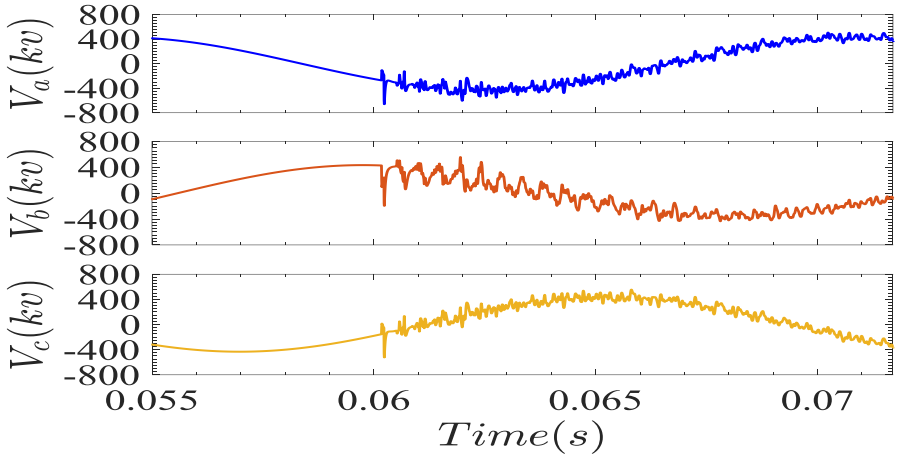
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024



شکل (۵): تنظیمات ولتاژهای سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال T_1- سناریوی ۱

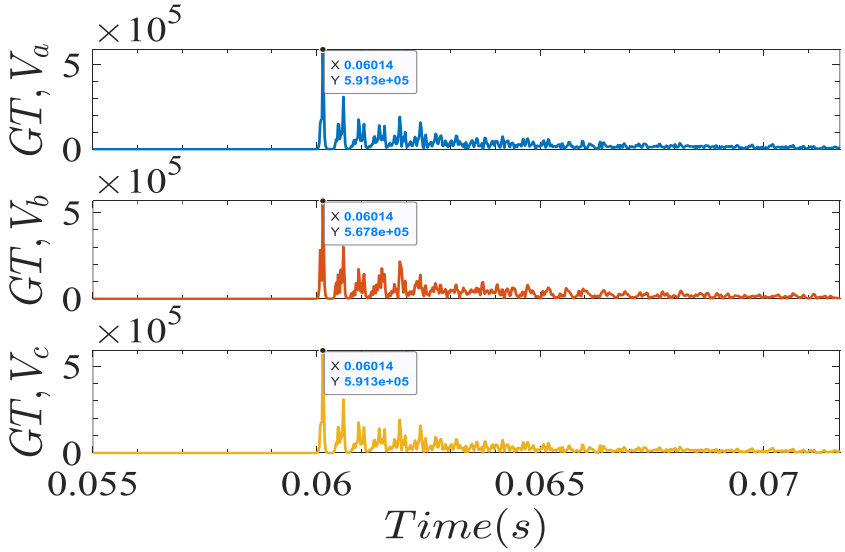
Figure (5): Settings of three-phase voltages measured on terminal T1-scenario 1

پنجره زمانی معادل یک سیکل از شکل موج‌های ولتاژ شکل (۵) انتخاب شده و به‌عنوان ورودی به الگوی استخراج ویژگی مبتنی بر تبدیل موجک گابور اعمال می‌گردد. این پنجره زمانی در شکل (۶) نشان داده شده است. با اعمال سیگنال‌های شکل (۶) به تبدیل موجک گابور، سیگنال‌های گابور مشابه شکل (۷) به دست می‌آید.



شکل (۶): ولتاژهای پنجره زمانی معادل یک سیکل شکل موج‌های ولتاژ شکل ۵- سناریوی ۱

Figure (6): Time window voltages equivalent to one cycle of voltage waveforms Figure 5- Scenario 1

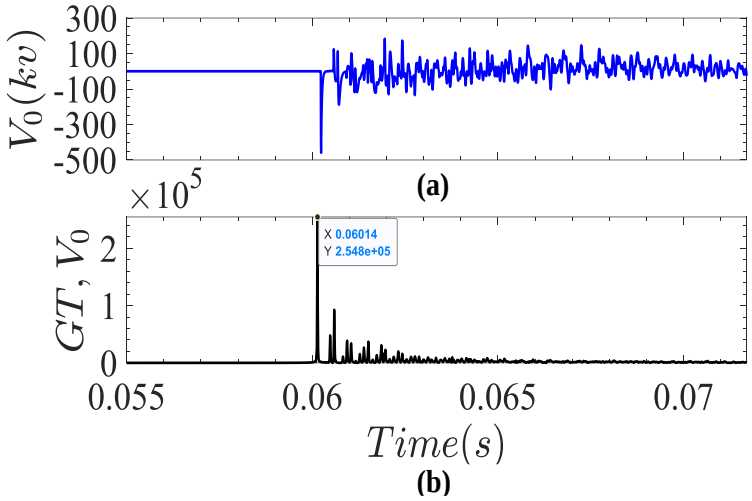


شکل (۷): سیگنال‌های گابور متناظر با شکل موج‌های شکل ۶- سناریوی ۱

Figure (7): Gabor signals corresponding to the waveforms of Figure 6 - Scenario 1

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

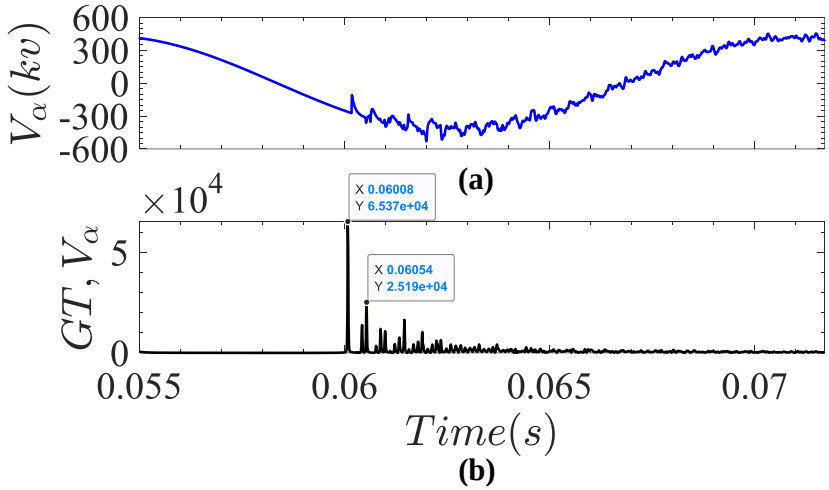
شکل (۷) نشان می‌دهد که FPA متناظر با V_a، V_b و V_c به ترتیب $۵,۹۱۳\times۱۰^{۵}$، $۵,۶۷۸\times۱۰^{۵}$ و $۵,۹۱۳\times۱۰^{۵}$ است. از آنجایی که خطا روی فاز b رخ داده است، اندازه تفاضل FPA_a و FPA_c نزدیک به صفر است. بنابراین مطابق با فلوچارت شکل (۲)، e_2 از مقدار ε کمتر بوده و از آنجایی که خطا از نوع خطای زمین تشخیص داده شده است، نوع خطا b-g خواهد بود. به‌منظور تشخیص خطای زمین، مؤلفه توالی صفر ولتاژ (V_0) محاسبه شده و سیگنال گابور متناظر با آن تحلیل می‌شود. این مؤلفه ولتاژ و سیگنال گابور متناظر با آن در شکل (۸) قابل مشاهده است.



شکل (۸): (a) مؤلفه توالی صفر ولتاژ (V_0)، (b) سیگنال گابور متناظر با V_0-سناریوی ۱

Figure (8): (a) Voltage zero sequence component (V0), (b) Gabor signal corresponding to V0-scenario 1

از آنجایی که مؤلفه FPA_0 در شکل (۸) برابر $۲,۵۴۸\times۱۰^{۵}$ است، و با توجه به مقدار آستانه T_0=1000، خطای زمین تشخیص داده می‌شود. در مرحله بعد، برای تعیین سکشن خطا، مؤلفه V_α و سیگنال گابور متناظر با آن به دست می‌آید. این دو در شکل (۹) ترسیم شده‌اند. برای تعیین سکشن خطا، مؤلفه FPT_α=0.06008s با مقدار آستانه T_α=0.06046s مقایسه می‌شود. همان‌طور که مشخص است، از آنجایی که $FPT_\alpha < T_\alpha$ است، خطا در سمت چپ جبران‌ساز تشخیص داده می‌شود.



شکل (۹): (a) مؤلفه مودال آلفا ($V\alpha$)، (b) سیگنال گابور متناظر با $V\alpha$-سناریوی ۱

Figure (9): (a) modal alpha component (V_α), (b) Gabor signal corresponding to V_α-scenario 1

در شکل (۹)، پارامترهای FPT_α و SPT_α به ترتیب ۰,۰۶۰۰۸ و ۰,۰۶۰۵۴ ثانیه هستند، بنابراین پارامتر TDOA برابر $۴,۶\times۱۰^{-۴}$ ثانیه خواهد شد. در این حالت مطابق با رابطه (۷) (معادله اول)، مکان دقیق خطا برابر می‌شود با:

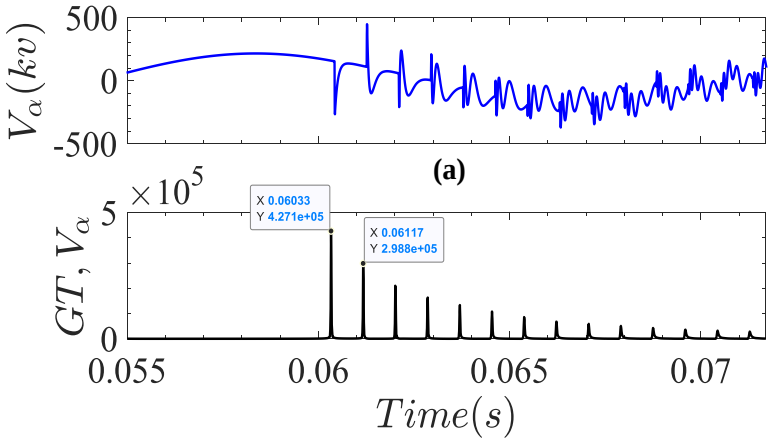
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

$$\hat{d} = v \times \frac{SPT_\alpha - FPT_\alpha}{2} = \frac{1}{\sqrt{9.33\times10^{-3}\times35.145\times10^{-9}}}\times \frac{4.6\times10^{-4}}{2} = 40.1657km \quad (۸)$$

فاصله واقعی خطا $d = 40km$ است و فاصله تخمینی خطا بـه کمـک الگـوی پیشـنهادی، $\hat{d} = 40.1657km$ بـه دسـت می‌آید، که خطای تخمین ۰٫۴۱۴۲٪ و دقت تخمین ۹۹٫۵۸٪ را نتیجه می‌دهدکنید.

۲-۴- سناریوی ۲

در سناریوی دوم، یک خطای دو فاز به زمین (a-c-g) در فاصله $d = 154km$ نسبت به نقطه اندازه‌گیری بدون تغییر در پارامترهای R_f و R_g رخ می‌دهد. در این حالت، مؤلفه V_αو سیگنال گابور متناظر با آن مشابه شکل (۱۰) به دست می‌آید.



شکل (۱۰): (a) مؤلفه مودال آلفا (V_α)، (b) سیگنال گابور متناظر با V_α-سناریوی ۲

Figure (10): (a) modal alpha component (V_α), (b) Gabor signal corresponding to V_α-scenario 2

با توجه به شکل (۱۰)، FPT_α و SPT_α به ترتیب ۰٫۰۶۰۵۷ و ۰٫۰۶۱۰۹ ثانیه هستند، بنابراین پارامتر TDOA برابر $5{,}2\times10^{-4}$ ثانیه خواهد شد. در این سناریو، $FPT\alpha > T\alpha$ است، به همین دلیل الگوی پیشنهادی، سکشن خطا را در سمت راست جبران‌ساز تشخیص خواهد داد. به همین دلیل برای تعیین مکان تخمینی خطا، معادله دوم در رابطه (۷) استفاده می‌شود،

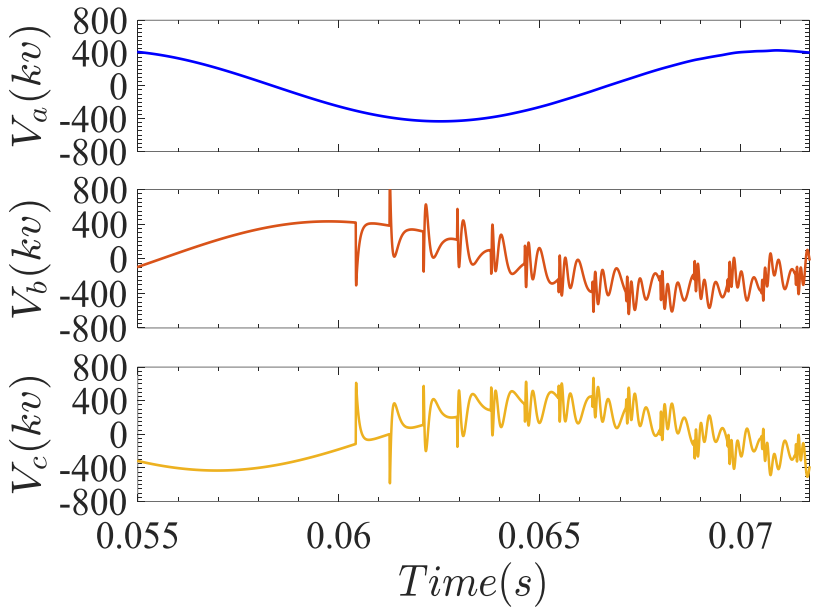
$$\hat{d} = l - (v \times \frac{SPT_\alpha - FPT_\alpha}{2}) = 200 - (\frac{1}{\sqrt{9.33\times10^{-3}\times35.145\times10^{-9}}}\times \frac{5.2\times10^{-4}}{2}) = 154.5953km \quad (۹)$$

با توجه به اینکه $d = 154km$ و $\hat{d} = 154.5953km$ است، خطای تخمین و دقـت تخمـین بـرای سـناریوی ۲ بـه ترتیـب ۰٫۳۸۶۶٪ و ۹۹٫۶۱٪ به دست خواهد آمد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

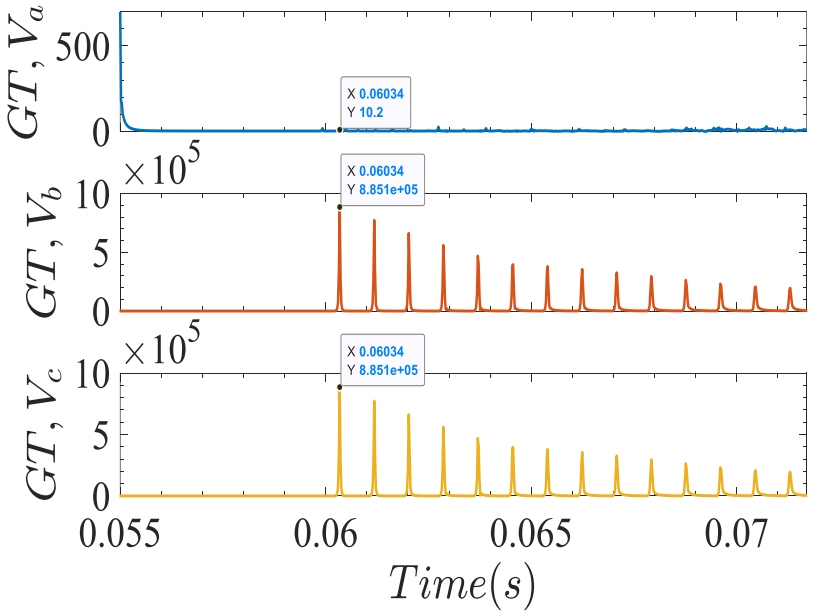
۳-۴- سناریوی ۳

در سناریوی سوم، یک خطای دو فاز به هم (b-c) در فاصله $d = 73km$ نسبت به نقطه اندازه‌گیریبا مقاومت خطای R_f=50Ω رخ می‌دهد. پنجره زمانی با طول یک سیکل برای ولتاژهای سه فاز اندازه‌گیری شده روی ترمینال T_1 در شکل (۱۱) ترسیم شده است. سیگنال‌های گابور معادل با این مؤلفه‌های ولتاژ سه فاز نیز در شکل (۱۲) قابل مشاهده هستند.



شکل (۱۱): پنجره زمانی معادل یک سیکل شکل موج‌های ولتاژ- سناریوی ۳

Figure (11): Time window equivalent to one cycle of voltage waveforms - scenario 3



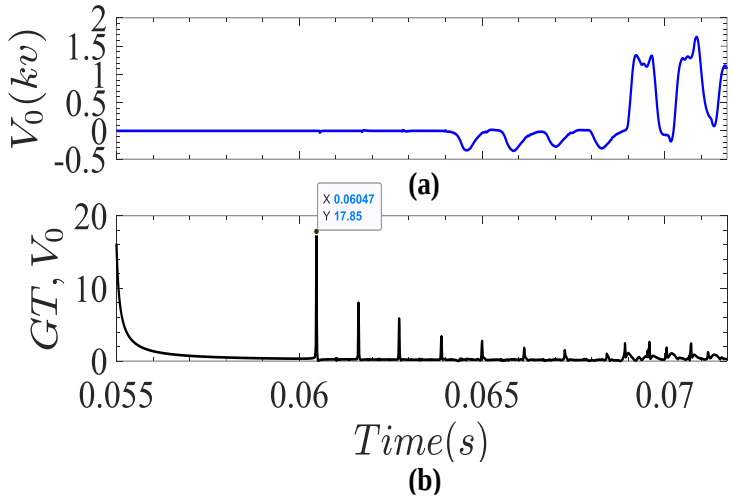
شکل (۱۲): سیگنال‌های گابور متناظر با شکل موج‌های شکل ۱۱- سناریوی ۳

Figure (12): Gabor signals corresponding to the waveforms of Figure 11- Scenario 3

در مرحله بعد، مؤلفه توالی صفر ولتاژ را برای سناریوی ۳ به دست آورده و سیگنال گابور متناظر با آن را به دست می‌آوریم. نتایج در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. مشخص است که FPA_0=17.85 است که از مقدار آستانه T_0=1000 کمتر است. بنابراین خطا از نوع غیر زمین تشخیص داده می‌شود. از سوی دیگر به توجه به شکل ۱۲، شاخص e_3

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

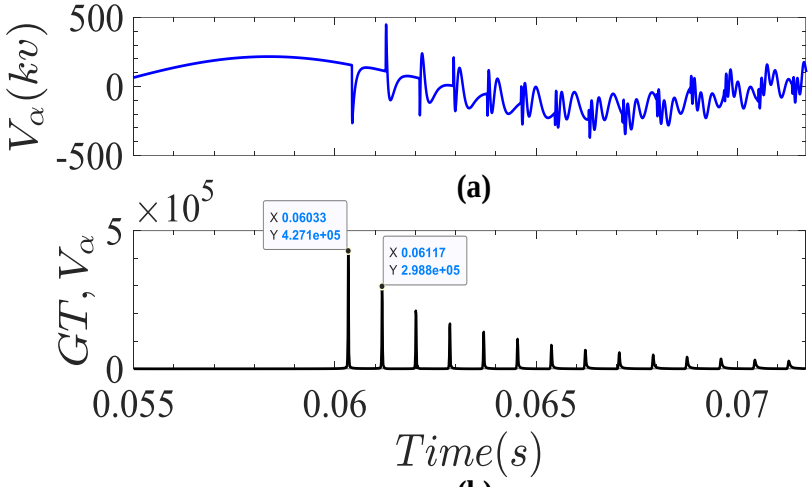
$E_3 = |FPA_b - FPA_c|$ و $e_3 = \frac{E_3}{\max(E_1, E_2, E_3)}$) مقداری نزدیک به صفر است (به این معنی که e3<ε)، بنابراین بر اساس فلوچارت شکل (۲)، نوع خطا b-c تشخیص داده می‌شود.



شکل (۱۳): (a) مؤلفه توالی صفر ولتاژ (V_0)، (b) سیگنال گابور متناظر با V_0-سناریوی ۳

Figure (13): (a) Voltage zero sequence component (V_0), (b) Gabor signal corresponding to V_0-scenario 3

در نهایت با محاسبه مؤلفه V_α و سیگنال گابور متناظر با آن (چنانکه در شکل (۱۴) نشان داده شده است)، تعیین سکشن و تخمین مکان خطا انجام می‌شود.



شکل (۱۴): (a) مؤلفه توالی صفر ولتاژ (V_0)، (b) سیگنال گابور متناظر با V_0-سناریوی ۳

Figure (14): (a) Voltage zero sequence component (V_0), (b) Gabor signal corresponding to V_0-scenario 3

با توجه به مقادیر FPT_α=0.06033s و SPT_α=0.06117s در شکل ۱۴(b)، اولاً FPTα<Tα است، بنابراین خطا در سمت چپ جبران‌ساز رخ داده است. ثانیاً $TDOA=8.4\times10^{-4}$s به دست می‌آید. با جایگذاری در معادله اول رابطه (۷) داریم،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

$$\hat{d} = v \times \frac{SPT_{\alpha} - FPT_{\alpha}}{2} = \frac{1}{\sqrt{9.33\times10^{-3}\times35.145\times10^{-9}}}\times \frac{8.4\times10^{-4}}{2} = 73.3460km \quad (۱۰)$$

از این رو، $d = 73km$ و $\hat{d} = 73.3460km$ به دست می‌آید؛ که خطای تخمین ۰,۴۷۱۷٪ و دقت تخمین ۹۹,۵۳٪ را برای سناریوی ۳ نتیجه می‌دهد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که افزایش امپدانس خطا (۵۰ برابر) تأثیری بر دقت الگوی پیشنهادی دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا ندارد. بنابراین استراتژی پیشنهادی برای همه انواع خطا، در مکان‌های مختلف و با امپدانس‌های متفاوت قابل‌استفاده است. میانگین خطای تخمین مکان خطا برای سه سناریوی مورد مطالعه ۰,۴۲۷٪ و دقت الگوی مکان‌یابی نیز ۹۹,۵۷۳٪ به دست می‌آید که عملکرد برتر الگوی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک الگوی تشخیص، دسته‌بندی، تعیین سکشن و مکان‌یابی خطا برای خط انتقال جبران‌سازی شده به کمک SSSC پیشنهاد شد. سیگنال‌های ولتاژ سه فاز روی یکی از ترمینال‌های سیستم انتقال اندازه‌گیری شده و به کمک تبدیل موجک گابور، ویژگی‌های مختلف این مؤلفه‌های ولتاژ استخراج گردید. به‌منظور تفکیک خطای زمین از خطای غیر زمین، مؤلفه توالی صفر ولتاژ (V_0) و برای تعیین سکشن و مکان‌یابی خطا نیز مؤلفه مودال آلفا (V_α) از مؤلفه‌های ولتاژ سه فاز اولیه استخراج شد. با محاسبه سه شاخص دامنه اولین پیک (FPA)، زمان اولین پیک (FPT) و زمان دومین پیک (SPT) از روی سیگنال‌های گابور متناظر با پنج مؤلفه ولتاژ (V_a، V_b، V_c، V_0 و V_α)، اهداف مختلف شامل تفکیک خطای زمین از غیر زمین، تعیین فازهای خطادار (دسته‌بندی خطا)، تعیین سکشن خطا و تخمین مکان خطا برآورده شد. نتایج شبیه‌سازی تحت سه سناریوی مختلف خطا نشان‌دهنده دقت بالای الگوریتم پیشنهادی در دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا است، به‌گونه‌ای که دقت دسته‌بندی خطا ۱۰۰٪ و دقت مکان‌یابی خطا ۹۹,۵۷۳٪ به دست می‌آید. در مطالعه بعدی، عملکرد الگوی پیشنهادی در این مقاله تحت سناریوهای مختلف شامل خطاهای حالت گذرا، وجود نویز و اغتشاش خارجی (ناشی از اثر زمین) در سیگنال‌های ولتاژ اندازه‌گیری شده و تغییر مکان جبران‌ساز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

References

مراجع

[1] K. A. Kharusi, A. E. Haffar, and M. Mesbah, "Adaptive Machine-Learning-Based transmission line fault detection and classification connected to Inverter-Based generators," Energies, vol. 16, no. 15, p. 5775, 2023 (doi: 10.3390/en16155775).

[2] J. C. H. Paye et al., "High Impedance Fault Models for Overhead Distribution Networks: A Review and Comparison with MV Lab Experiments," Energies, vol. 17, no. 5, p. 1125, 2024 (doi: 10.3390/en17051125).

[3] S. R. Fahim, Y. Sarker, S. K. Sarker, Md. R. I. Sheikh, and S. K. Das, "Self attention convolutional neural network with time series imaging based feature extraction for transmission line fault detection and classification," Electric Power Systems Research, vol. 187, p. 106437, 2020 (doi:10.1016/j.epsr.2020.106437).

[4] I. Mousaviyan, S. G. Seifossadat, and M. Saniei, "Traveling wave-based algorithm for fault detection, classification, and location in STATCOM-Compensated parallel transmission lines," Electric Power Systems Research, vol. 210, p. 108118, 2022 (doi: 10.1016/j.epsr.2022.108118).

[5] P. Mundra, A. Arya, S. K. Gawre, S. Biswal, F. V. Lopes, and O. P. Malik, "Taylor series based protection starting element for STATCOM compensated transmission line," Electric Power Systems Research, vol. 204, p. 107700, 2022 (doi:10.1016/j.epsr.2021.107700).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

[6] S. Belagoune, N. Bali, A. Bakdi, B. Baadji, and K. Atif, "Deep learning through LSTM classification and regression for transmission line fault detection, diagnosis and location in large-scale multi-machine power systems," Measurement, vol. 177, p. 109330, 2021 (doi: 10.1016/j.measurement.2021.109330).

[7] T. N. Hu, Y. F. Zeng, K. Peng, H. Hu, H. M. Wang, and K. F. Liu, "Improvement of transmission-line-based fault locating for typical traveling-wave accelerator with constant-gradient structures," Nuclear Engineering and Technology, vol. 56, no. 6, pp. 2011-2018, 2024 (doi: 10.1016/j.net.2024.01.008).

[8] S. R. Ola, A. Saraswat, S. K. Goyal, S. K. Jhajharia, B. Rathore, and O. P. Mahela, "Wigner distribution function and alienation coefficient-based transmission line protection scheme," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 14, no. 10, pp. 1842-1853, 2020 (doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1414).

[9] B. Chatterjee and S. Debnath, "Cross correlation aided fuzzy based relaying scheme for fault classification in transmission lines," Engineering Science and Technology, an International Journal, vol. 23, no. 3, pp. 534–543, 2020 (doi:10.1016/j.jestch.2019.07.002).

[10] P. Stefanidou-Voziki, N. Sapountzoglou, B. Raison, and J. L. Dominguez-Garcia, "A review of fault location and classification methods in distribution grids," Electric Power Systems Research, vol. 209, p. 108031, 2022 (doi: 10.1016/j.epsr.2022.108031).

[11] G. T. De Alencar, R. C. D. Santos, and A. Neves, "A fault recognition method for transmission systems based on independent component analysis and convolutional neural networks," Electric Power Systems Research, vol. 229, p. 110105, 2024 (doi: 10.1016/j.epsr.2023.110105).

[12] A. Mukherjee, P. K. Kundu, and A. Das, "Application of Principal Component Analysis for Fault Classification in Transmission Line with Ratio-Based Method and Probabilistic Neural Network: A Comparative Analysis," Journal of the Institution of Engineers (India) SeriesB, vol. 101, no. 4, pp. 321–333, 2020 (doi: 10.1007/s40031-020-00466-5).

[13] G. Kapoor, V. Soni, and J. Yadvendra, "FAST Walsh–Hadamard Transform-Based Artificial Intelligent Technique for transmission line fault detection and faulty phase recognition," in Algorithms for intelligent systems, pp. 141–149, 2020 (doi: 10.1007/978-981-15-1059-5_17).

[14] K. O. M. Touati, M. Boudiaf, L. Mazouz, and L. Cherroun, "Efficient hybrid strategy based on FFT and fuzzy logic techniques applied to fault diagnosis in power transmission line," Soft Computing, 2023 (doi: 10.1007/s00500-023-09089-6).

[15] X. Guo, C. Tao, T. Li, Q. Zhuo, and X. Bai, "Fault location of multi-point hybrid transmission line based on HHT," Journal of Applied Science and Engineering, vol. 26, no. 12,pp. 1731-1738, 2023 (doi: 10.6180/jase.202312_26(12).0005).

[16] R. Arranz, Á. Paredes, A. Rodríguez, and F. Muñoz, "Fault location in Transmission System based on Transient Recovery Voltage using Stockwell transform and Artificial Neural Networks," Electric Power Systems Research, vol. 201, p. 107569, 2021(doi: 10.1016/j.epsr.2021.107569).

[17] U. B. De Souza, J. P. L. Escola, and L. Da Cunha Brito, "A survey on Hilbert-Huang transform: Evolution, challenges and solutions," Digital Signal Processing, vol. 120, p. 103292, 2022(doi: 10.1016/j.dsp.2021.103292).

[18] B. Sundararaman and P. Jain, "Fault Detection and Classification in Electrical Power Transmission System Using Wavelet Transform," Engineering Proceedings, vol. 59, no. 1, p. 71, 2023 (doi: 10.3390/engproc2023059071).

[19] Z. Li, "Gabor wavelet transform combined with area CNN in appearance intelligent detection of stayed cables," Journal of Vibro engineering, vol. 25, no. 8, pp. 1465–1479, 2023 (doi: 10.21595/jve.2023.23231).

[20] A. K. Samantaray and A. D. Rahulkar, "New design of adaptive Gabor wavelet filter bank for medical image retrieval," IET Image Processing, vol. 14, no. 4, pp. 679–687, 2020 (doi: 10.1049/iet-ipr.2019.1024).

[21] D. Rezaei, M. Gholipour, and F. Parvaresh, "A novel traveling wave arrival time detection method in power system," IET Generation Transmission & Distribution, vol. 16, no. 6, pp. 1151–1165, 2021 (doi: 10.1049/gtd2.12357).

[22] A. Sayahi, H. Barati, " Determining the location of the ground fault in the static excitation system of the synchronous machine ", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 3, no. 2, pp. 10-18, autumn 2014 (in Persian).

[23] A. Ranjbar, A. Rahmani, "Fault diagenosis by using the multi-class support vector machine", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 8, no. 3, pp. 27-36, autumn 2020 (in Persian).

زیرنویس‌ها:

[1] Renewable energy
[2] High impedance fault
[3] Convolutional neural network
[4] Discrete wavelet transform
[5] Traveling wave
[6] Static synchronous compensator
[7] Deep learning
[8] Deep recurrent neural network
[9] Independent component analysis

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[10] Principal component analysis
[11] Walsh Hadamard transform
[12] Fast Fourier transform
[13] Hilbert–Huang transform
[14] Stockwell transform
[15] Empirical mode decomposition
[16] End effects
[17] Mode mixing
[18] Wavelet transform
[19] Gabor wavelet
[20] First peak amplitude
[21] First peak time
[22] Second peak time
[23] Time difference of arrival
[24] Static synchronous series compensator

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]