## **Research Article**

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

#### Ehsan Akbari<sup>1</sup>, Assistant professor

<sup>1</sup> 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 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).

مقاله پژوهشی

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

احسان اکبری<sup>۱</sup>، استادیار

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

چکیده: بروز خطاهای مغتلف 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 مکان یابی خطا به صورت یکپارچه پیشنهاد میشود که تنها از سیگنالهای ولتاژ اندازه گیری شده روی یک ترمینال خط انتقال استفاده می کند. به منظور استخراج ویژگی از سیگنال اولیه از تبدیل موجک گابور استفاده شده و نتایج آن برای تشخیص و میگردد. علاوه بر این، به دلیل نصب جبرانساز توان رأکتیو در خط انتقال، عملکرد سیستم حفاظتی می بایست به روزرسانی شود. نتایج شبیهسازی عددی در محیط MATLAB نشاندهنده عملکرد دقیق الگوی پیشنهادی در تشخیص، دستهبندی و شود. نتایج شبیهسازی عددی در محیط MATLAB نشاندهنده عملکرد دقیق الگوی پیشنهادی در تشخیص، دستهبندی و میگردد. علاوه بر این، به دلیل نصب جبرانساز توان رأکتیو در خط انتقال، عملکرد سیستم حفاظتی می بایست به روزرسانی شود. نتایج شبیهسازی عددی در محیط AATLAB نشاندهنده عملکرد دقیق الگوی پیشنهادی در تشخیص، دستهبندی و میگردد. علوه بر این، به دلیل نصب جبرانساز توان رأکتیو در خط انتقال، عملکرد سیستم حفاظتی می بایست به روزرسانی شود. نتایج شبیه می می این در محیط AATLAB

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.

#### 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)، نصب تجهیزات مبتنی بر مبدل قدرت و بارهای غیرخطی مهمتر میشوند [۱]. روش مرسوم تشخیص خطا در خطوط انتقال استفاده از راههای دیستانس است. به طور کلی، عملکرد نادرست این راهها ناشی از نوسانات توان، افزایش بار و خطاهای امپدانس بالا (HIFs<sup>۲</sup>) 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<sup>۳</sup>) را برای شناسایی و دستهبندی خطاهای رخ داده در خطوط برق طراحی کردند. این الگوی حفاظتی از تکنیک استخراج ویژگی با تصویربرداری سری زمانی استفادہ می کند. تبدیل موجک گسسته (DWT<sup>۴</sup>) 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<sup>۵</sup>) در مدارهای موازی تک ترمینالی خطوط برق مجهز به جبرانساز سنکرون استاتیکی (<sup>۲</sup>STATCOM) برای تشخیص، مکانیابی و تعیین سکشن خطا و همچنین فازهای دچار خطا استفاده می کنند. 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 مركز خط طراحي شده است. بهمنظور تشخيص خطا از أناليز شكل موج جريان استفاده شده است. در [۶]، نویسندگان سه روش دستهبندی و رگرسیون مبتنی بر یادگیری عمیق (<sup>۷</sup>DL) را با استفاده از شبکههای عصبی بازگشتی عميق (^DRNN) براي شناسايي ناحيه خطا، دستهبندي نوع خطا و مكانيابي خطا طراحي كردهاند. اين مدلها از دادههاي 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) [۱۱] و تحلیل مؤلفههای اساسی (''PCA) [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<sup>1</sup>) [۱۳]، تبدیل فوریه سریع (FFT<sup>1</sup>۲) [۱۴]، تبدیل هیلبرت-هوانگ (HHT<sup>1۴</sup>) [۱۵] و تبدیل استاکول (ST<sup>1</sup><sup>۱</sup>) [۱۶]. در این میان، WHT تنها می تواند خطاهای خطوط انتقال را با توجه به سیگنالهای اندازه گیری شده جریان تشخیص دهد. FFT را می توان فقط برای تشخیص و مکان یابی سکشن خطا بر اساس سیگنال های جریان اندازه گیری شده در نزدیکی ترمینالهای شبکه استفاده کرد. علیرغم توانایی HHT در تشخیص، دستهبندی و مکانیابی خطا، این روش به دلیل بهره گیری از تکنیک تجزیه مود ذاتی (EMD<sup>14</sup>) با مشکلاتی نظیر اثرات انتهایی<sup>۱</sup>۶ و اختلاط مود<sup>۱۷</sup> مواجه است [۱۷]. در مقابل، تبدیل موجک (WT<sup>۱۸</sup>) به دلیل بهره گیری از ابزارهای آنالیز سیگنال در حوزه زمان و فرکانس، برای تشخیص و دستهبندی خطا در

خطوط انتقال نیرو گزینه مناسبی است [۱۸]. موجک گابور (۳<sup>۱</sup>GW) 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 به خصوص 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 [۳۳]. 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 اندازه گیری 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 تفکیک خطاهای زمین از خطاهای غیر زمین مورد استفاده قرار میگیرد. همچنین مؤلفه مودال ولتاژ نیز بهمنظور تفکیک خطاهای زمین از خطاهای غیر زمین مورد دقت استراتژی میگیرد. همچنین مؤلفه مودال ولتاژ نیز بهمنظور تفکیک خطاهای زمین از خطاهای غیر زمین مورد استفاده قرار میگیرد. همچنین مؤلفه مودال ولتاژ نیز بهمنظور تفکیک خطاهای زمین از خطاهای غیر زمین مورد استفاده قرار میگیرد. همچنین مؤلفه مودال ولتاژ نیز به منظور تعیین سکشن خطا و مکان دقیق آن به کار می ورد. دقت استراتژی

- ارائه یک الگوی یکپارچه بهمنظور تشخیص، دستهبندی، تعیین سکشن و مکانیابی خطا در سیستم انتقال
- بهره گیری از موجک گابور با رزولوشن بالا برای پردازش دقیق تر سیگنال اولیه و استخراج ویژگی های مفیدتر از آن
- معرفی شاخصهای جدید قابل استخراج از سیگنال گابور به منظور تشخیص خطا، تفکیک خطای زمین از غیر زمین،
   تعیین فازهای خطادار و تخمین مکان خطا
- ارائه استراتژی مکانیابی خطا مبتنی بر تئوری امواج سیار، به گونهای 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:

$$W(t,t_{0},\omega) = e^{-\sigma(t-t_{0})^{2}} e^{i\omega(t-t_{0})}$$
<sup>(1)</sup>

این یک تابع حوزه زمان-فرکانس است و نشان میدهد که افزایش زمان (بیشتر شدن تفاضل  $t_0$  و  $t_0$ ، تابع به صورت نمایی افزایش مییابد. در این رابطه،  $\sigma$  پارامتر کنترل نرخ افت تابع نمایی است و  $\omega$ نیز فرکانس است. با انتگرال گیری از حاصل ضرب (۱) در یک سیگنال زمانی مانند (x(t) برحسبt، تبدیل موجک گابور تکبعدی برای این سیگنال به صورت رابطه زیر به دست میآید:

$$C(x(t))(t_0,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) W(t,t_0,\omega) dt$$
<sup>(Y)</sup>

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

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

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 می شوند. 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 اندازه گیری 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 دسته بندی، تعیین سکشن و مکان یابی خطا را انجام داد. برای اعمال تبدیل موجک گابور می بایست یک فریم مشخص با تعداد نمونه های متناهی از سیگنال اصلی انتخاب شود. به این منظور یک دوره تناوب از سیگنال اولیه انتخاب می شود.

#### ۳- استراتژی پیشنهادی

در این بخش الگوی پیشنهادی تشخیص، دستهبندی، تعیین سکشن و مکانیابی خطا تشریح می گردد. در این الگو، پس از اندازه گیری 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 می گردد. علاوه بر این، مؤلفههای مودال ولتاژ نیز طبق رابطه (۴) برای سیگنالهای ولتاژ محاسبه شده و تبدیل موجک گابور برای دو مؤلفه ۷۵ و م۲ اعمال می گردد.

$\begin{pmatrix} V_0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}$	1	$1 \left[ V_a \right]$	
$\left  V_{\alpha} \right  = \frac{1}{3} \left  2 \right $	-1	$-1 \mid V_b \mid$	(۴)
$\left(V_{\beta}\right) \int 0$	$\sqrt{3}$	$-\sqrt{3}\left[V_{c}\right]$	

در نهایت تبدیل موجک گابور برای سیگنالهای <sub>ا</sub>V<sub>o</sub> ،V<sub>o</sub> ،V<sub>o</sub> v<sub>a</sub> و v<sub>a</sub> به دست آمده و دو شاخص «دامنه اولین پیک (FPA<sup>۲۰</sup>)» و «زمان اولین پیک (FPT<sup>۲۱</sup>)» برای هر سیگنال گابور محاسبه می گردد. این دو مؤلفه در مرحله بعد مطابق با فلوچارت شکل (۱) برای دستهبندی، تعیین سکشن و مکانیابی خطا استفاده می شوند. لازم به ذکر است که مقادیر آستانه در سایر پارامترهای شبیه ازی در جدول (۱) ارائه شدهاند. لازم به ذکر است که شاخص به همراه سایر پارامترهای شبیه سازی در جدول (۱) ارائه شدهاند. لازم به ذکر است که شاخص برای تشخیص، دستهبندی و تفکیک خطای زمین از غیر زمین به کار می رود، در حالی که شاخص FPT به منظور تعیین سکشن خطا استفاده می شود. برای تعیین مکان دقیق خطا، اختلاف زمانی بین زمان اولین پیک یا همان FPT و زمان دومین پیک (<sup>۲۲۳</sup> محاسبه شده و به کمک تئوری امواج سیار، مکان خطا تعیین می گردد. با این روش تنها اندازه گیری 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.



شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی Figure (1): Flowchart of the proposed method

#### ۱-۳- تشخیص خطا

به منظور تشخیص خطا در سیستم انتقال، کافی است پارامتر FPA محاسبه شده برای سیگنال V<sub>α</sub> 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.

#### ۲-۳- 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. همان طور که قبلاً بیان شد، مؤلفه توالی صفر ولتاژ و سیگنال گابور متناظر با آن برای تفکیک خطای زمین از خطای غیر زمین یا شد، مؤلفه توالی صفر ولتاژ و سیگنال گابور متناظر با آن برای مؤلفه توالی صفر ولتاژ و سیگنال گابور متناظر با آن برای مؤلفه توالی صفر ولتاژ و سیگنال گابور متناظر با آن برای مؤلفه توالی صفر زمین باشد، پارامتر FPA در سیگنال گابور متانال گابور منول مؤلفه توالی صفر مقدار بزرگی خواهد داشت در حالی که برای خطاهای غیر زمین، این پارامتر بسیار کوچک و نزدیک به صفر 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، این پارامتر سیار کوچک و نزدیک به صفر خطادار، یک الگوی دستهبندی مجزا مورد نیاز است که در فلوچارت شکل (۱) در بلوک «الگوی دستهبندی خطا» تعریف شده است. پارامترهای APA متناظر با ولتاژهای سه فاز به عنوان ورودی به این الگو اعمال میگردد. در ادامه، طبق رابطه (۵) اندازه نده است. پارامتر بین کر در دار می مین میز این می در این می در این 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 APA متناظر با ولتاژهای سه فاز بهعنوان ورودی به این الگو اعمال میگردد. در ادامه، طبق رابطه (۵) اندازه میشود.

$$E_{1} = |FPA_{a} - FPA_{b}|$$

$$E_{2} = |FPA_{a} - FPA_{c}|$$

$$E_{3} = |FPA_{b} - FPA_{c}|$$

$$e_{1} = \frac{E_{1}}{\max(E_{1}, E_{2}, E_{3})}$$

$$e_{2} = \frac{E_{2}}{\max(E_{1}, E_{2}, E_{3})}$$

$$e_{3} = \frac{E_{3}}{\max(E_{1}, E_{2}, E_{3})}$$
(5)

در مرحله بعد، طبق فلوچارت شکل (۲)، دستهبندی خطا با مقایسه پارامترهای e<sub>1</sub> ، e<sub>2</sub> و e<sub>3</sub> را مقادیر آستانه از پیش تعریف شده، انجام خواهد شد. پارامتر ع 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، می ایست 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 معیار مناسبی برای تعیین سکشن خطا است. به این صورت که هر چه خطا به نقطه اندازه گیری نزدیکتر باشد، FPT متناظر با Vα) مقدار کوچک تری است. بنابراین با تعیین یک مقدار آستانه (Tα) و مقایسه FPT<sub>α</sub> با آن، می توان سکشـن خطـا را تعیین نمود. لازم به توضیح است که مقدار آستانه Tα، مقدار عددی پارامتر FPT<sub>α</sub> در محـل قرارگیـری جبـرانسـاز اسـت. بـه عبارت دیگر با شبیهسازی خطا در محل قرارگیری جبرانساز، و محاسبه FPT<sub>α</sub>، مقدار آستانه Tα 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 می گردد. مطابق با این تئوری، زمان پیکهای مشاهده شده در سیگنال گابور، متناسب با زمان برخورد جبهه موج ناشی از بروز خطا به ترمینال اندازه گیری 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  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$  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<sup>۲۳</sup>) ارتباط مستقیم خواهد داشت [۲۱]. TDOA از تفاضل  $t_{2s}$ -t<sub>1</sub>s 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 اندازه گیری (ترمینال T<sub>1</sub> در شکل (۳))، متناظر با زمان اولین پیک (FPT) و زمان دومین پیک (SPT) در سیگنال گابور است.

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

در این رابطه، <sup>d</sup> مکان تخمینی خطا را نشان میدهد و I 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.

#### ۴- نتایج شبیهسازی



شکل (۴): سیستم انتقال شبیه سازی شده با جبران ساز SSSC

Figure (4): Simulated transmission system with SSSC

Table (1): Simulation parameters and default threshold values

دول (۱): پارامترهای شبیهسازی و مقادیر استانه پیشفرض	÷
---	---

مقدار	نماد	پارامتر	
1	σ	پارامتر کنترل نرخ افت تابع نمایی	
۰,۰۱	3	كران پايين مؤلفهke (k=1,2,3)	
• ,• ۶• ۴۶	$T_{\alpha}$	(s) V $a$ مقدار آستانه مؤلفه (s)	
1	To	مقدار آستانه مؤلفهV0	
۵, ۰	$T_k$	مقدار آستانه مؤلفه«k=1,2,3) (k=1,2,3)	
7	1	طول خط انتقال (km)	
۰,۹۳۳× <sup>۳-</sup> ۱۰	L	اندوكتانس خط (H/km)	
۳۵,۱۴۵× <sup>۹-</sup> ۱۰	С	ظرفیت خازنی خط (F/km)	
۶۰	f	فرکانس شبکهHz)	

# ۱-۴- سناریوی ۱

در سناریوی اول، یک خطای تکفاز به زمین روی فاز b-g) b) در سمت چپ جبران ساز و در فاصله d = 40km نسبت به نقطه اندازه گیری (ترمینال T<sub>1</sub>) با مقاومت  $R_{\rm g}=1\Omega$  و مقاومت زمین R<sub>g</sub>=0.1Ω رخ میدهد. در این حالت، ولتاژهای سه فاز اندازه گیری شده روی ترمینال T<sub>1</sub> در شکل (۵) ترسیم شدهاند.





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



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

شکل (۷) نشان میدهد که FPA متناظر با V<sub>b</sub> ،V<sub>a</sub> و V<sub>b</sub> ،V<sub>a</sub> و V<sub>b</sub> ،V<sub>a</sub> و ۵٫۹۱۳ م<sup>(1</sup>۰<sup>4</sup>) a<sup>(1</sup>۰<sup>4</sup>) a<sup>(1</sup>۰<sup>4</sup>) a<sup>(1</sup>۰<sup>4</sup>) a<sup>(1</sup>۰<sup>4</sup>) a<sup>(1</sup>−<sup>1</sup>) a<sup>(1</sup>−





Figure (8): (a) Voltage zero sequence component (V0), (b) Gabor signal corresponding to V0-scenario 1 از آنجایی که مؤلفه FPA<sub>0</sub> در شکل (۸) برابر ۲٫۵۴۸×۸۰۹ است، و با توجه به مقدار آستانه T<sub>0</sub>=1000، خطای زمین تشخیص داده میشود. در مرحله بعد، برای تعیین سکشن خطا، مؤلفه ۷<sub>α</sub> و سیگنال گابور متناظر با آن به دست میآید. این دو در شکل (۹) ترسیم شدهاند. برای تعیین سکشن خطا، مؤلفه FPT<sub>α</sub>=0.06008s با مقدار آستانه T<sub>α</sub>=0.06046s مقایسه میشود. همان طور که مشخص است، از آنجایی که FPT<sub>α</sub> < T<sub>α</sub> است، خطا در سمت چپ جبران ساز تشخیص داده میشود.



شکل (۹): (a) مؤلفه مودال آلفا (Vα)، (b) سیگنال گابور متناظر با Vα–سناریوی ۱

Figure (9): (a) modal alpha component (V<sub>a</sub>), (b) Gabor signal corresponding to V<sub>a</sub>-scenario 1 در شکل (۹)، پارامترهای FPT<sub>α</sub> و SPT<sub>4</sub> به ترتیب ۰٫۰۶۰۰۸ و ۰٫۰۶۰۵۴ ثانیه هستند، بنابراین پارامتر TDOA برابر ۴٫۶×۴٫۶ ثانیه خواهد شد. در این حالت مطابق با رابطه (۷) (معادله اول)، مکان دقیق خطا برابر می شود با:

$$\hat{d} = v \times \frac{SPT_{\alpha} - FPT_{\alpha}}{2}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{9.33 \times 10^{-3} \times 35.145 \times 10^{-9}}} \times$$

$$\frac{4.6 \times 10^{-4}}{2} = 40.1657 km$$

$$\hat{d} = 40.1657 km$$

$$\hat{d} = 40.1657 km , \quad \lambda = 10^{-4} + 10^{-4}$$

در سناریوی دوم، یک خطای دو فاز به زمین (a-c-g) در فاصله d = 154km نسبت به نقطه اندازه گیری بدون تغییر در پارامترهای R<sub>f</sub> و R<sub>f</sub> رخ میدهد. در این حالت، مؤلفه V<sub>a</sub> و سیگنال گابور متناظر با آن مشابه شکل (۱۰) به دست میآید.



شکل (۱۰): (a) مؤلفه مودال آلفا ( $V_{\alpha}$ )، (b) سیگنال گابور متناظر با  $V_{\alpha}$ -سناریوی ۲

Figure (10): (a) modal alpha component (V<sub>a</sub>), (b) Gabor signal corresponding to V<sub>a</sub>-scenario 2 با توجه به شکل (۱۰)،  $FPT_{\alpha} \in SPT_{\alpha}$  و  $SPT_{\alpha} \in SPT_{\alpha}$  و ۲۰،۶۰۰ ثانیه هستند، بنابراین پارامتر TDOA برابر <sup>۴</sup>-۲۰×۵۲ ثانیه خواهد شد. در این سناریو،  $T\alpha = FPT\alpha$  است، به همین دلیل الگوی پیشنهادی، سکشن خطا را در سمت راست جبران ساز تشخیص خواهد داد. به همین دلیل برای تعیین مکان تخمینی خطا، معادله دوم در رابطه (۲) استفاده می شود،

$$\hat{d} = l - (v \times \frac{SPT_{\alpha} - FPT_{\alpha}}{2})$$

$$= 200 - (\frac{1}{\sqrt{9.33 \times 10^{-3} \times 35.145 \times 10^{-9}}} \times \frac{5.2 \times 10^{-4}}{2}) = 154.5953 km$$
(9)

با توجه به اینکه d = 154km و d = 154.5953km است، خطای تخمین و دقت تخمین برای سناریوی ۲ به ترتیب d = 154km رو ۹۹٬۶۱٪ به دست خواهد آمد.

#### ۳-۴- سناريوي ۳

 $m R_{f}=50\Omega$  در سناریوی سوم، یک خطای دو فاز به هم (b-c) در فاصله d=73km نسبت به نقطه اندازه گیریبا مقاومت خطای  $m R_{f}=50\Omega$  در سناریوی سوم، یک خطای  $m T_{1}$  در شکل (۱۱) ترسیم رخ میدهد. پنجره زمانی با طول یک سیکل برای ولتاژهای سه فاز اندازه گیری شده روی ترمینال  $m T_{1}$  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



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<sub>0</sub>=17.85 است که از مقدار آستانه T<sub>0</sub>=1000 کمتر است. بنابراین خطا از نوع غیر زمین تشخیص داده میشود. از سوی دیگر به توجه به شکل ۱۲، شاخص <sub>e</sub>3  $e_3 = \frac{E_3}{\max(E_1, E_2, E_3)}$ و  $e_3 = \frac{E_3}{\max(E_1, E_2, E_3)}$ مقداری نزدیک به صفر است (به این معنی که ٤٤ه)، بنابراین بر اساس فلوچارت شکل (۲)، نوع خطا b-c تشخیص داده می شود.



شکل (۱۳): (a) مؤلفه توالی صفر ولتاژ (V<sub>0</sub>)، (b) سیگنال گابور متناظر با V<sub>0</sub>-سناریوی ۳

Figure (13): (a) Voltage zero sequence component (V<sub>0</sub>), (b) Gabor signal corresponding to V<sub>0</sub>-scenario 3

در نهایت با محاسبه مؤلفه Vα 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 (۷۵)، (b) سیگنال گابور متناظر با Vo-سناریوی ۳

Figure (14): (a) Voltage zero sequence component (V<sub>0</sub>), (b) Gabor signal corresponding to V<sub>0</sub>-scenario 3 با توجه به مقادیر FPTα=0.06033s و SPTα=0.06117s در شکل ۱۹(b)، اولاً FPTα<Tα است، بنابراین خطا در سمت چپ جبرانساز رخ داده است. ثانیاً TDOA=8.4×10<sup>-4</sup>s به دست میآید. با جایگذاری در معادله اول رابطه (Y) داریم،

$$\hat{d} = v \times \frac{SPT_{\alpha} - FPT_{\alpha}}{2} = \frac{1}{\sqrt{9.33 \times 10^{-3} \times 35.145 \times 10^{-9}}} \times (1 \cdot ) \frac{8.4 \times 10^{-4}}{2} = 73.3460 km$$

از این رو، d = 73.8m و دقت تخمین ۹۹٫۵۹٪ را d = 73.3460 km و دقت تخمین ۹۹٫۵۹٪ و دقت تخمین ۹۹٫۵۹٪ را برای سناریوی ۳ نتیجه می دهد. همچنین این نتایج نشان می دهد 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 قابل استفاده است. می نگر بر انترای پیشنهادی محان محال در مکانهای مختلف و با امپدانسهای متفاوت قابل استفاده است. می آید که عمین می نشان می دهد که افزایش امپدانس خطا (۵۰ برابر) محان محال دو مکانیابی خطا ندارد. بنابراین استراتژی پیشنهادی برای سه سناریوی مورد مطالعه ۴۲۷٫۰۷ و دقت الگوی امپدانسهای متفاوت قابل استان می دهد. می محتلف و با امپدانسهای متفاوت قابل استفاده است. می محتل محمین مکان خطا برای سه سناریوی مورد مطالعه ۹٫۴۲۷ و دقت الگوی مکانیابی نیز ۹۹٫۵۷۳٪ به دست می آید که عملکرد برتر الگوی پیشنهادی را نشان می دهد.

#### ۵- نتیجهگیری

در این مقاله، یک الگوی تشخیص، دستهبندی، تعیین سکشن و مکانیابی خطا برای خط انتقال جبرانسازی شده به کمک تبدیل SSSC پیشنهاد شد. سیگنالهای ولتاژ سه فاز روی یکی از ترمینالهای سیستم انتقال اندازه گیری شده و به کمک تبدیل موجک گابور، ویژگیهای مختلف این مؤلفههای ولتاژ استخراج گردید. به منظور تفکیک خطای زمین از خطای غیر زمین، مؤلفه توالی صفر ولتاژ (V0) و برای تعیین سکشن و مکانیابی خطا نیز مؤلفه مودال آلفا (Vα) از مؤلفههای ولتاژ سه فاز اولیه استخراج شد. با محاسبه سه شاخص دامنه اولین پیک (FPA)، زمان اولین پیک (TPT) و زمان دومین پیک (SPT) از روی سیگنالهای گابور متناظر با پنج مؤلفه ولتاژ (د V<sub>0</sub>، V<sub>0</sub> V<sub>0</sub>)، زمان اولین پیک (FPT) و زمان دومین پیک (SPT) از روی 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، به گونهای که دقت دستهبندی خطا نشاندهنده دقت بالای الگوریتم پیشنهادی در دستهبندی و مکانیابی خطا است، به گونهای که دقت مقاله تحت سناریوی مختلف مطادار (دستهبندی خطا)، تعیین سکشن خطا و تخمین مکان خطا برآورده شد. نتایج شبیهسازی تحت سه مناریوی مختلف خطا نشاندهنده دقت بالای الگوریتم پیشنهادی در دستهبندی و مکانیابی خطا است، به گونهای که دقت مقاله تحت سناریوهای مختلف شامل خطاهای حالت گذرا، وجود نویز و اغتشاش خارجی (ناشی از اثر زمین) در سیگنالهای ولتاژ اندازه گیری شده و تغییر مکان جبرانساز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

#### References

#### مراجع

- 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 narallel 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).

- [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-linebased 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 JET 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).

زيرنويسها:

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

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