

# شناسایی و طبقه‌بندی خطا در خطوط دو مداره در حضور TCSC با استفاده از روش

## ترکیبی هوشمند

زهرا مروج<sup>۱</sup>، علی خلیل زاده فرد<sup>۲</sup>، محمد پازکی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان، سمنان - ایران

zmoravej@semnan.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان، سمنان - ایران

khalilzadehfard.ali@gmail.com

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان - ایران

Pazoki.m@du.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، روش موثری جهت تشخیص و طبقه‌بندی خطا در یک خط انتقال دو مداره جبران‌سازی شده با TCSC پیشنهاد شده است. اثر تزویج خطوط انتقال موازی و استفاده از TCSC باعث تغییر در محتوای فرکانسی سیگنال‌های ورودی رله دیستانس می‌شود که در نتیجه شناسایی و طبقه‌بندی خطا را با چالش مواجه می‌کند. یکی از ابزارهای کارآمد برای تشخیص و طبقه‌بندی خطا در خطوط جبران‌سازی شده استفاده از روش‌های شناسایی الگو است. پیش‌نیاز استفاده بهینه از این روش‌ها، استخراج و انتخاب ویژگی‌های ورودی مناسب به الگوریتم‌های طبقه‌بندی کننده است. در این مقاله از ابزار پردازش سیگنال تبدیل موجک جهت استخراج ویژگی شده است. بدلیل تنوع موجک‌های مادر، در ابتدا با استفاده از روشی جدید بهترین موجک مادر شناسایی می‌شود و از ضرائب تجزیه شده حاصل از موجک مادر انتخاب شده، برای ساختن بردار ویژگی‌ها استفاده می‌شود. بعد از این مرحله، الگوریتم‌های طبقه‌بندی کننده درخت تصمیم‌گیری، ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم k-نزدیک‌ترین همسایه توسط بردار ویژگی‌های استخراج شده آموزش داده می‌شود. سپس، با استفاده از سناریوهای مختلف شبیه‌سازی میزان عملکرد صحیح هر یک از الگوریتم‌ها محاسبه و الگوریتمی که عملکرد بهتری نسبت به سایرین دارد، انتخاب می‌شود. در این مقاله، سیستم نمونه و روش پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: خطوط دو مداره، خط جبران‌سازی شده، طبقه‌بندی کننده خطا

# Fault Detection and Classification in Double-Circuit Transmission Line in Presence of TCSC Using Hybrid Intelligent Method

Zahra Moravej <sup>1</sup>, Ali Khalilzadeh fard <sup>2</sup>, Mohammad Pazoki <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, zmoravej@semnan.ac.ir

<sup>2</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, khalilzadehfard.ali@gmail.com

<sup>3</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, Damghan University, Damghan, Iran, Pazoki.m@du.ac.ir

**Abstract:** In this paper, an effective method for fault detection and classification in a double-circuit transmission line compensated with TCSC is proposed. The mutual coupling of parallel transmission lines and presence of TCSC affect the frequency content of the input signal of a distance relay and hence fault detection and fault classification face some challenges. One of the most effective methods for fault detection and classification in a compensated line is pattern-recognition methods. Prerequisites for the optimal using of these methods are the extraction and selection of appropriate features to feed the classifier. In this paper, wavelet transform as a signal processing tool to extract features is used. Due to variety of mother wavelets, firstly the best mother wavelet is identified by using a new method and the feature vector is made by the coefficients obtained from the best mother wavelet. After this stage, decision tree, support vector machines, and k-nearest neighbor as the classifiers are trained by feeding the feature vector. Then, their accuracies are evaluated against different simulation scenarios to select the best classifier which has the best performance among others. In this paper, the sample system and the proposed method is implemented in MATLAB environment.

**Keywords:** Double-Circuit Transmission Lines, Fault Classification, Compensated Transmission Line

## ۱. مقدمه

سیستم‌های انتقال متناوب انعطاف‌پذیر تحول بزرگی در صنعت برق به وجود آورده‌اند. یکی از این ادوات جبران ساز، خازن سری کنترل‌شده با تریستور (TCSC<sup>1</sup>) می‌باشد که با تنظیم درصدی از اندوکتانس القایی یک خط انتقال، منجر به بهبود پایداری حالت دائم و گذرای سیستم، تقسیم جریان بار بهتر بین مسیرهای موازی، توانایی تنظیم سطوح بارگذاری خط، کاهش تلفات انتقال، کاهش افت ولتاژ در سیستم در شرایط غیرطبیعی و حداکثر کردن توان انتقالی استفاده می‌کنند [۱]. حفاظت از خطوط انتقال مجهز به TCSC یکی از وظایف چالشی سیستم حفاظت شبکه است. به دلیل معکوس شدن ولتاژ و جریان، اعوجاج موج ولتاژ و جریان به علت تشدید زیر سنکرون و تغییر ناگهانی امپدانس خط سبب ایجاد جریان هارمونیک گردشی در خطوط موازی می‌شود. همچنین، استفاده از این ادوات در خطوط دو مداره با وجود امپدانس متقابل طرح حفاظتی را دچار مشکل می‌کند [۲-۴].

یکی از روش‌های کارآمد برای تشخیص و طبقه‌بندی خط در خطوط جبران سازی شده، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند طبقه‌بندی است. مقالات متعددی به بحث درباره طبقه‌بندی خط در خطوط جبران‌سازی شده و موازی پرداخته‌اند. در روش‌های مبتنی بر شناسایی الگو، روند استخراج ویژگی‌ها<sup>۲</sup> تأثیر بسزایی در دقت طبقه‌بندی کننده‌ها خواهد داشت. اگرچه سیگنال‌های جریان و ولتاژ شامل تمام اطلاعات خط هستند، اما استفاده از روش‌های استخراج ویژگی، با کاهش ابعاد داده‌های ورودی، کارایی الگوریتم‌های طبقه‌بندی خط را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش دقت و سرعت الگوریتم می‌گردد. در هنگام وقوع خط، محتوای فرکانسی سیگنال‌های جریان و ولتاژ به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کنند که در صورت شناسایی و تجزیه و تحلیل صحیح، تا حد زیادی به حفاظت از خطوط انتقال طی خط کمک می‌نماید [۵]. روش‌های گوناگونی برای تجزیه و تحلیل هارمونیک‌های سیگنال در حوزه فرکانس و در حوزه زمان-فرکانس مطرح شده است که به عنوان مثال می‌توان به دو روش تبدیل فوریه (FT<sup>3</sup>) و تبدیل موجک (WT<sup>4</sup>)، که در روش‌های تشخیص خط هم استفاده شده است، اشاره کرد.

تبدیل موجک به عنوان یک روش در حوزه زمان-فرکانس برای تحلیل سیگنال‌های نایستا (مانند سیگنال خطا)، در مقایسه با روش‌های حوزه فرکانس، مانند تبدیل فوریه، کارایی بهتری دارد. تبدیل موجک قادر است محتوای فرکانسی سیگنال ورودی را در باندهای فرکانسی مختلف در قالب ضرائب جزئیات و تقریب نشان دهد [۴]. هنگام استفاده از تبدیل موجک گسسته (DWT) جهت استخراج ضرائب مناسب و متعاقباً استخراج ویژگی‌ها، باید درباره انتخاب موجک مادر و تعداد سطح تجزیه مناسب تصمیم‌گیری شود. در [۶]، یک مقایسه بر روی انواع موجک‌های مادر برای تشخیص و طبقه‌بندی خطا، در خط انتقال جبران سازی شده سری، انجام شده است. در مقاله مذکور، هفت موجک مادر HAAR, Daubechies, Reverse BiorSplines, BiorSplines, Coiflet, Symlets, (db) و Meyer families بر اساس نسبت انرژی سیگنال‌های جریان خطای تک فاز به زمین ارزیابی شده است که موجک مادر bior3.9 برای تشخیص خطا توصیه شده است. این مقاله، بدلیل عدم وجود روش سازماندهی شده‌ای، نتوانسته طیف وسیعی از موجک‌های مادر را ارزیابی کند. در [۲]، تنها با بررسی موجک مادر Meyer و استفاده از حداکثر مقدار ضرائب موجک به عنوان ورودی الگوریتم فازی، جهت طبقه‌بندی خطا در یک خط جبران‌سازی شده سری، استفاده شده است. در [۴] و [۷]، به شکل پیش‌فرض، موجک مادر db4 جهت استخراج شاخص و طبقه‌بندی خطا، مناسب تشخیص داده شده است. لذا در [۴]، با تعریف شاخصی از جنس انرژی، حاصل از ضرائب خروجی موجک مادر و در [۷] با تعریف شاخصی حاصل از انحراف معیار ضرائب خروجی موجک مادر، به طبقه‌بندی خطا در خط جبران‌سازی شده سری پرداخته شده است. در [۸] نیز تنها از موجک مادر db4 برای پردازش سیگنال‌های جریان استفاده شده و از ضرائب حاصل، بردار ورودی الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان ساخته شده است. روش شناسایی الگوی پیشنهادی، جهت شناسایی خطا در خطوط موازی پیشنهاد شده است و همچنین برخلاف شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان نیازی به تعداد زیاد داده‌های آموزشی ندارد. در [۹]، بر مبنای پردازش داده‌های نیم سیکل جریان سه فاز پس از وقوع خطا، با کمک تبدیل موجک گسسته db1 و استفاده از شبکه عصبی چیشف طبقه‌بندی خطا در خط انتقال جبران‌سازی شده با TCSC انجام شده است. در [۱۰]، جهت استخراج

1. Thyristor Controlled Series Capacitor
2. Extract features
3. Fast Fourier transform

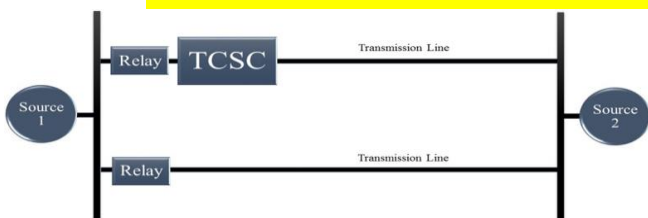
## 4. Wavelet Transform

این، استفاده از TCSC با اینکه دارای مزیت‌هایی می‌باشد اما باعث تغییر شرایط سیستم انتقال و در نهایت اختلال در تشخیص و طبقه‌بندی انواع خطا می‌شود. در این میان، امیدانس متقابل خطوط موازی نیز با تأثیر بر المان‌های خط در حالت خطا، شرایط پیچیده‌تری را به جهت تشخیص و طبقه‌بندی خطا به وجود می‌آورد. در این مقاله، ابتدا برای استخراج و انتخاب داده‌های ورودی مناسب، موجک‌های مادر مختلف توسط روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت بهترین موجک مادر انتخاب می‌گردد. سپس با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی مختلف به تشخیص و طبقه‌بندی خطا در سیستمی با خط انتقال موازی و دارای TCSC، پرداخته شده و نتایج هر یک از این الگوریتم‌ها به دست آمده است. در این مقاله، کارایی روش پیشنهادی نیز به ازای شرایط مختلفی ارزیابی شده است. از مهمترین ویژگی‌های روش پیشنهادی، ارزیابی ۸۵ موجک مادر و انتخاب مناسب‌ترین موجک بر اساس الگوریتم پیشنهادی است که همزمان با استخراج ویژگی‌های کارآمد، کارایی روش در سیستم جبران‌سازی شده در خط موازی با استفاده از سه روش طبقه‌بندی کننده بررسی شده است.

## ۲. روش پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی

### ۲.۱. سیستم تحت مطالعه

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، سیستم شامل خط انتقال موازی است که در ابتدای یکی از خطوط، TCSC قرار گرفته است. مدل TCSC جهت شبیه‌سازی برگرفته از [۱۸] است. طول خط ۴۰۰ کیلومتر و سطح ولتاژ سیستم ۵۰۰ کیلوولت می‌باشد. جزئیات مشخصات سیستم در جدول (۱) ذکر شده است. مطابق شکل (۲)، پس از ورود TCSC در مدار در لحظه  $0.15$  ثانیه، جریان و توان عبوری از خط انتقال شامل TCSC افزایش پیدا کرده و توان عبوری از خط انتقال فاقد TCSC، پس از نوسان، مقداری کاهش پیدا کرده که علت این امر وجود خاصیت القایی بین خطوط موازی می‌باشد.



شکل (۱): سیستم نمونه شامل خط موازی جبران‌سازی شده با TCSC

ویژگی، پردازش یک سیکل جریان با استفاده از چهار تبدیل موجک db1-4 پیشنهاد شده است و در نهایت db4 به عنوان بهترین گزینه انتخاب گردید. ویژگی‌های انرژی و آنتروپی از ضرائب تجزیه شده به عنوان بردار ورودی استخراج شده است و آموزش و تست ماشین بردار پشتیبان، جهت طبقه‌بندی خطا در خط جبران‌سازی شده با TCSC، انجام شده است. در [۱۱]، شش ویژگی استخراج شده از ولتاژ و جریان خط به عنوان ورودی الگوریتم شبکه عصبی، جهت طبقه‌بندی خطا در خطوط موازی پیشنهاد شده است. در این مقاله، بصورت مستقیم از کمیت‌های الکتریکی به عنوان بردار ویژگی‌ها استفاده شده است. در [۱۲]، از داده‌های یک سیکل از جریان سه فاز پس از لحظه وقوع خطا، نمونه برداری شده و بدون هیچ پردازشی به عنوان ورودی درخت تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، طبقه‌بندی ده نوع خطا در خط انتقال جبران‌سازی شده با TCSC انجام شده است. در روش‌هایی که بدون پردازش سیگنال، بردار ورودی الگوریتم‌های هوشمند ساخته می‌شود، کارایی روش به تغییرات شرایط خطا و سیگنال حساس است. در [۳]، جهت طبقه‌بندی خطا در خطوط موازی، ده هارمونیک ابتدایی فرد سیگنال ولتاژ و جریان تا هارمونیک نوزده، از طریق تبدیل فوریه گسسته نیم-سیکل استخراج شده است. سپس، از الگوریتم جنگل تصادفی برای طبقه‌بندی خطا در این نوع خطوط استفاده شده است. در [۱۳]، از درخت تصمیم‌گیری و انتخاب ورودی آن بر مبنای سیگنال جریان برای تشخیص و طبقه‌بندی خطاها در خط جبران‌سازی شده سری استفاده شده است. در [۱۴]، نویسندگان با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی هارمونی جستجو، بهترین تبدیل موجک را برای شناسایی انواع خطا در خطوط انتقال تک مداره و بدون جبران‌ساز استفاده کرده‌اند. با توجه به چالش‌های خطوط دومداره با حضور TCSC در شناسایی خطا، در [۱۵]، روشی بر مبنای استخراج فازور دینامیکی و الگوریتم فازی، جهت طبقه‌بندی خطا در این نوع خطوط، پیشنهاد شده است که بطور کلی تعیین قوانین فازی بدون اطلاعات قبلی امکانپذیر نیست. در [۱۶]، در خط انتقال جبران‌سازی شده با TCSC، ویژگی‌هایی بر مبنای انحراف معیار ضرائب خروجی تبدیل موجک مادر db4، به عنوان ورودی درخت تصمیم‌گیری، جهت طبقه‌بندی خطا، پیشنهاد شده است. در [۱۷] نیز همچون برخی مقالات اشاره شده در این بخش، شاخصی بر مبنای ضرائب مستخرج از موجک مادر db4 جهت طبقه‌بندی خطا در خط موازی بکار گرفته شده است.

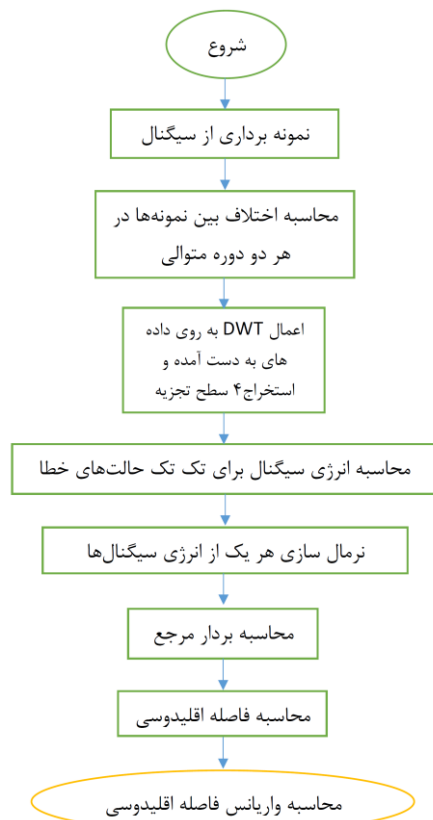
همان‌طور که در مرور مقالات مشهود است، نحوه انتخاب موجک مادر جهت استخراج بردار ویژگی‌ها همچنان چالش برانگیز است. علاوه بر

## جدول (۱): مشخصات خط انتقال دو مداره در حضور TCSC در ابتدای خط

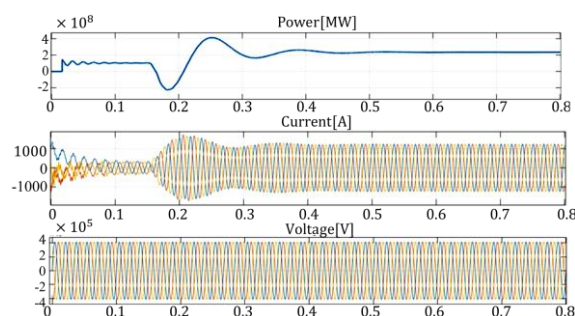
R ( $\Omega/\text{km}$ )	$R \begin{bmatrix} r_1 \\ r_0 \\ r_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.347 \\ 0.2983 \\ 0.263 \end{bmatrix}$
C (F/km)	$C \begin{bmatrix} c_1 \\ c_0 \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9/1210e^{-9} \\ 6/61e^{-9} \\ -2/5120e^{-9} \end{bmatrix}$
L (H/km)	$L \begin{bmatrix} l_1 \\ l_0 \\ l_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2813e^{-3} \\ 3/77571e^{-3} \\ 2/4944e^{-3} \end{bmatrix}$

### ۲.۲.۱. یافتن موجک مادر بهینه

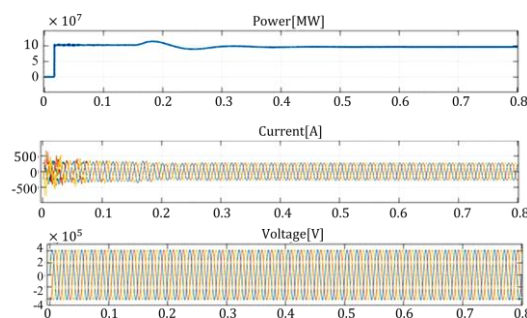
مقالات بسیاری با استفاده از تبدیل موجک به استخراج ویژگی‌های سیگنال خطا پرداخته‌اند، اما مطالعات محدودی در حوزه مقایسه بین موجک‌های مادر و نحوه یافتن بهترین موجک مادر در سیستم انتقال جریان سازی شده دو مداره انجام شده است. در این مقاله، در ابتدا بین موجک‌های مادر مقایسه‌ای انجام شده تا مناسب‌ترین آن‌ها انتخاب گردد و از آن موجک مادر جهت استخراج ویژگی‌ها استفاده شده است. لازمه طبقه‌بندی خطا، تشخیص خطاست که این موضوع با استفاده از شاخص میانگین حاصل جمع جریان سه فاز، در هر یک از خطوط، میسر شده است. بدین صورت که میانگین جریان‌های سه فاز هر خط، در هر لحظه محاسبه می‌شود. اگر این میانگین برابر با صفر باشد بیانگر عملکرد سیستم انتقال بدون خطا است و لحظه‌ای که این مقدار مخالف صفر شود، بیانگر لحظه وقوع خطا است. الگوریتم استخراج ویژگی‌ها در شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل (۳): الگوریتم پیشنهادی برای استخراج ویژگی‌های داده‌ها



(الف)



(ب)

شکل (۲): الف) مشخصه‌های مدار شامل TCSC به ترتیب از بالا: توان حقیقی، جریان سه فاز، ولتاژ سه فاز ب) مشخصه‌های مدار فاقد TCSC به ترتیب از بالا: توان حقیقی، جریان سه فاز، ولتاژ سه فاز

### ۲.۲. روش پیشنهادی

طبقه‌بندی خطا یکی از مشکلات چالش‌برانگیز در خطوط انتقال می‌باشد. در این مقاله با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی کننده به حل این مشکل پرداخته شده است؛ اما مسئله موجود، ویژگی‌هایی هستند که به‌عنوان ورودی به این الگوریتم‌ها داده می‌شوند. سیگنال‌های جریان و ولتاژ حاوی اطلاعات هارمونیک‌ها هستند که با استفاده از تبدیل موجک می‌توان اطلاعات موجود در سیگنال‌ها را استخراج کرد و به‌عنوان ورودی الگوریتم‌های طبقه‌بندی در نظر

محاسبه می‌شود. سپس یک بردار مرجع، با استفاده از اعمال تبدیل موجک گسسته بر هر سه فاز سیگنال ولتاژ و جریان در حالت سالم (بدون خطا)، ایجاد می‌گردد. سپس انرژی ضرایب موجک در حالت سالم،  $E_h$ ، محاسبه و با استفاده از رابطه (۴)،  $Z_{Eh}$  تعیین می‌گردد. در این مرحله، فاصله اقلیدسی،  $ED$ ، با محاسبه اختلاف بین بردار به دست آمده از رابطه (۴) و بردار  $Z_{Eh}$  توسط رابطه (۵) تعیین می‌شود:

$$ED = \sqrt{\sum_y [Z_E(y) - Z_{Eh}(y)]^2} \quad (5)$$

شاخص  $y = 1, 2, \dots, 15$  برای نشان دادن تعداد المان‌های ایجادکننده بردار انرژی  $Z_E$ ، متناظر با انواع خطا، استفاده می‌شود. تمام مقادیر فاصله اقلیدوسی، برای انواع خطاهای مختلف، در یک بردار  $Dis$ ، مطابق با رابطه (۶) ذخیره می‌شود:

$$Dis = [ED_{AG} \quad ED_{BG} \quad ED_{CG} \quad ED_{AB} \quad ED_{AC} \quad ED_{BC} \quad ED_{ABG} \quad ED_{BCG} \quad ED_{ACG} \quad ED_{ABC} \quad ED_{ABCG}] \quad (6)$$

واریانس بردار فاصله  $Dis$ ، از طریق رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{Dis}^2 = \frac{\sum (Dis(p) - \mu(Dis))^2}{p} \quad (7)$$

که در آن شاخص  $p = 1, 2, \dots, 11$  برای نشان دادن تعداد عناصر ایجادکننده بردار انرژی  $Dis$ ، به طول ۱۱ عنصر، متناظر با ۱۱ نوع خطا است.

در ادامه پس از به کارگیری یکی از انواع موجک مادر، سیگنال‌های ولتاژ و جریان پردازش خواهد شد. پس از محاسبه اختلاف نمونه‌ها، در دو دوره متوالی، با اعمال تبدیل موجک، سطوح تجزیه هر یک از سیگنال‌ها به دست خواهد آمد و طبق روش پیشنهادی،  $\sigma_{Dis}^2$  محاسبه خواهد شد. این محاسبات به ازای هر موجک مادر تکرار خواهد شد. علاوه بر این، این روش برای هر یک از خطوط (مدار شامل TCSC و مدار فاقد TCSC) به صورت جداگانه اعمال خواهد شد. در انتها حالتی که دارای بیشترین مقدار  $\sigma_{Dis}^2$  است، از آن برای استخراج ویژگی مرتبط به هر یک از خطوط به صورت جداگانه استفاده خواهد شد. بدین ترتیب، تعداد ۸۵ موجک مادر ارزیابی شده است که در جدول‌های (۲) و (۳)، برای هر یک از خطوط، ارزیابی پنج موجک برتر، جهت نمونه، نمایش داده شده است. موجک مادر db1 به عنوان مناسب‌ترین موجک مادر و اطلاعات سطح چهارم

در ابتدا سیگنال‌های ولتاژ و جریان سه فاز با فرکانس  $3/8$  کیلوهرتز نمونه برداری می‌شوند. طول این سیگنال یک سیکل بوده که با دانستن لحظه وقوع خطا، شروع آن نیم سیکل قبل از وقوع خطا و پایان آن نیم سیکل پس از وقوع خطا است. پس از آن، اختلاف بین نمونه‌ها در هر دو دوره متوالی، با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$x_y^D(j) = x_y(j+n) - x_y(j), j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

که در آن  $x$  نشان دهنده نوع سیگنال ولتاژ یا جریان،  $y$  فاز  $A, B$  و  $C$  و  $n$  تعداد نمونه‌های موجود در سیگنال گسسته است. در ادامه، تبدیل موجک گسسته به اختلاف سیگنال‌های نمونه برداری شده ( $x_y^D$ ) از ولتاژ و جریان اعمال می‌شود و پس از آن، با توجه به رابطه (۲)، می‌توان انرژی سیگنال‌های هر یک از بخش‌های خروجی تبدیل موجک را محاسبه نمود:

$$E_{Aj} = \sum b |A_j(b)|^2 \quad (2)$$

$$E_{Dj} = \sum b |D_j(b)|^2$$

از خروجی تبدیل موجک، یک بردار حاوی انرژی ضرائب موجک تقریب (EA4) و یک بردار حاوی انرژی ضرائب جزئیات (ED1-ED4) متناظر با سیگنال ولتاژ یا جریان استخراج می‌گردد.

جهت یافتن سطح تجزیه مناسب، حداکثر تعداد سطح تجزیه چهار در نظر گرفته می‌شود که این مقدار حداکثر، در صورتی که ارزیابی سطوح بالاتر نیز مطلوب باشد قابل افزایش است. با در نظر گرفتن سطح چهارم جهت تجزیه، تبدیل موجک دارای ۱۵ المان در خروجی برای هر نوع خطا خواهد بود. عدد ۱۵ حاصل ضرب تعداد فازها (سه فاز) در تعداد سطوح تجزیه شده (یک سطح تقریب و چهار سطح جزئیات) است. برای مثال، متناظر با خطای فاز  $A$  به زمین بردار

انرژی ضرایب به فرم (۳) است:

$$EAG = \begin{bmatrix} ED_1A_1 & ED_2A_1 & ED_3A_1 & ED_4A_1 & EAA_1 \\ ED_1B_1 & ED_2B_1 & ED_3B_1 & ED_4B_1 & EAB_1 \\ ED_1C_1 & ED_2C_1 & ED_3C_1 & ED_4C_1 & EAC_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در گام بعدی، از آنجائیکه مقادیر انرژی ضرائب تقریب، به طور قابل توجهی، بزرگ‌تر از مقادیر انرژی ضرائب جزئیات است، لذا بردار حاوی انرژی ضرایب موجک نرمال‌سازی می‌شود. برای مثال، بردار انرژی ضرایب (EAG) مرتبط با خطای فاز  $A$ ، با استفاده از رابطه (۴) نرمال می‌شود:

$$Z_{EAG}(k) = [E_{AG}(k) - \mu(E_{AG})] / \sigma(E_{AG}) \quad (4)$$

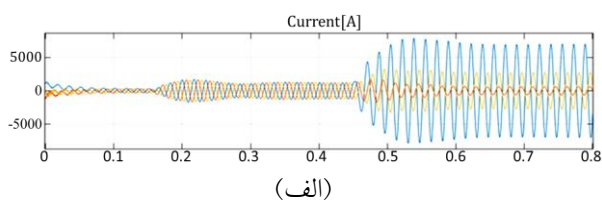
که  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار را نشان می‌دهند. ضرایب انرژی نرمال شده، برای سایر خطاها، بطور مشابه



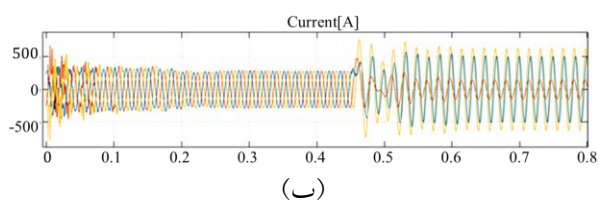
جدول ۴: شبیه‌سازی خطاهای درون مداری و بین مداری به ازای شرایط

مختلف شبیه‌سازی

پارامتر	آموزش	تست
مقاومت خطا ( $\Omega$ )	۱۰ تا ۱۰۰ اهم با گام ۱۰ اهمی	۱۵ تا ۹۵ اهم با گام ۱۰ اهمی
مکان خطا (درصد از طول خط)	۱۰ درصد تا ۹۰ درصد با گام ۱۰ درصدی	۱۵ درصد تا ۸۵ درصد با گام ۱۰ درصدی
زاویه ی وقوع خطا (درجه)	۰، ۱۲۰ و ۲۴۰	۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰

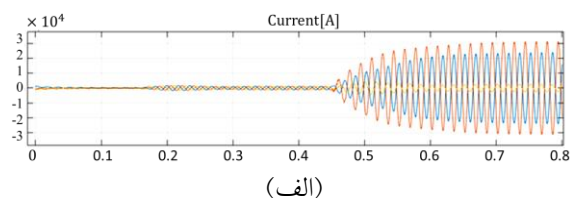


(الف)

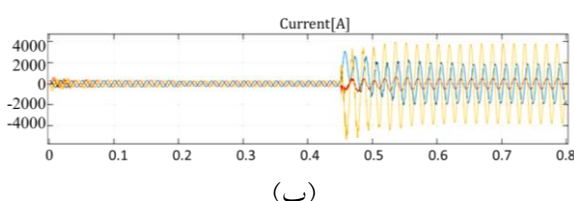


(ب)

شکل (۴): (الف) جریان خط انتقال شامل TCSC در خطای تک فاز به زمین (ب) جریان خط انتقال فاقد TCSC در خطای تک فاز به زمین



(الف)



(ب)

شکل (۵): (الف) جریان خط انتقال شامل TCSC در خطای دو فاز از خط انتقال شامل TCSC فاقد TCSC با دو فاز از خط انتقال شامل TCSC (ب) جریان خط انتقال شامل TCSC فاقد TCSC در خطای دو فاز از خط انتقال شامل TCSC فاقد TCSC با دو فاز از خط انتقال شامل TCSC

خطا و عدم وجود خطا در خط انتقال. با توجه به اینکه داده‌های به دست آمده از جنس انرژی می‌باشند و صرفاً یک عدد است و تنها دارای یک بعد می‌باشند، به جهت مشاهده‌ی بهتر میزان تداخل داده‌ها، در حالت خطا و عدم وجود خطا، از محور

جزئیات جریان خط انتقال، به عنوان بهترین ترکیب برای هر دو خط انتقال شامل و فاقد TCSC تعیین شده‌اند. در جدول (۲) و (۳) اگر ستون I شامل عدد ۱ باشد بدین معناست که جریان خطوط به عنوان ورودی به موجک مادر داده شده است و اگر سلولی از جدول‌های (۲) و (۳) دارای عدد صفر باشد بدین معناست که در نظر گرفتن آن ترکیب، تأثیر بسزایی در محاسبه  $\sigma_{Dis}^2$  نخواهد داشت و بالعکس، عدد یک بیانگر تأثیر زیاد آن ترکیب در محاسبه  $\sigma_{Dis}^2$  است.

به عنوان مثال، در سطر ۲، جدول ۲، بخش چهارم جزئیات سیگنال جریان دارای بیشترین تغییر در هنگام بروز خطا می‌باشد و مابقی اجزای سیگنال جریان، به انضمام تمام سطوح تجزیه شده‌ی سیگنال ولتاژ، تغییر محسوسی پس از بروز خطا نخواهند داشت. در این مقاله، فرمت نام گذاری سطوح تجزیه سیگنال‌های ولتاژ و جریان به فرمت XnY می‌باشد که در آن Y بیانگر نوع سیگنال (ولتاژ=V، جریان=I)، n=۱،۴،...، و X بیانگر بخش جزئیات (D) و یا بخش تقریب (A) سیگنال تبدیل یافته را نشان می‌دهد.

## ۲.۲.۲. طبقه‌بندی خطا و نتایج شبیه‌سازی

پس از یافتن بهترین موجک مادر و نوع سیگنال برای تجزیه و تحلیل، در سیستم نمونه طبقه‌بندی خطا انجام شده است. در این مقاله، با استفاده از مقایسه میان انواع الگوریتم‌ها، میزان دقت هر یک را سنجیده و بهترین الگوریتم انتخاب می‌شود. مطابق جدول (۴)، انواع خطاهای درون مداری و بین مداری، به ازای مقاومت خطاهای مختلف، مکان‌های مختلف خطا و زوایای مختلف وقوع خطا شبیه‌سازی شده است. همچنین، در جدول (۴)، داده‌های آموزش و تست الگوریتم‌های طبقه‌بندی به تفکیک مشخص شده‌اند. شکل‌های (۴) و (۵)، به عنوان نمونه، سیگنال خطا از فازهای A در هر دو مدار را نشان می‌دهد.

انرژی بخش چهارم جزئیات سیگنال جریان در هر یک از فازها، که از نیم سیکل قبل از وقوع خطا تا نیم سیکل بعد از خطا، با استفاده از موجک مادر db1، استخراج شده‌اند به عنوان ویژگی در بخش طبقه‌بندی استفاده خواهند شد. این ویژگی‌ها، جهت طبقه‌بندی دو کلاس خروجی استفاده می‌شوند: وجود

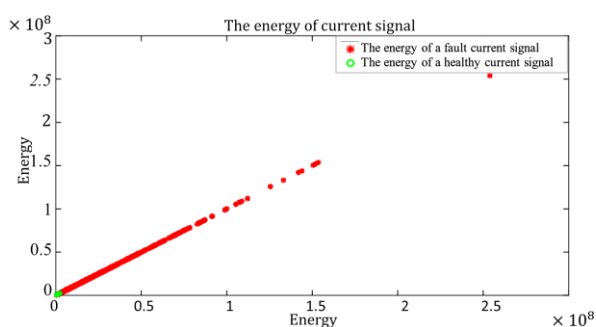
جدول (۲): ۵ موجک مادر برتر و بخش‌های مناسب از سطوح تجزیه برای طبقه‌بندی خطا در مدار شامل TCSC

I	V	D1I	D2I	D3I	D4I	A4I	D1V	D2V	D3V	D4V	A4V	$\sigma_{Dis}^2$	موجک مادر
۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۱۰۷۶۶۷۲۲	'db1'
۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۰۵۲۲۸۳۸۵	'bior1.1'
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۴۵۰۳۱۸۵	'db1'
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۴۲۷۸۰۲۵	'bior1.1'
۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۲۶۱۲۵۶۳	'db2'

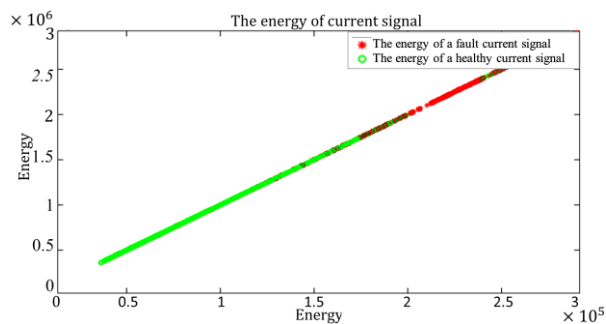
جدول (۳): ۵ موجک مادر برتر و بخش‌های مناسب از سطوح تجزیه برای طبقه‌بندی خطا در مدار فاقد TCSC

I	V	D1I	D2I	D3I	D4I	A4I	D1V	D2V	D3V	D4V	A4V	$\sigma_{Dis}^2$	موجک مادر
۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۲۵۹۸۳	db1'
۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۱۹۶۸۳	'sym2'
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۵۷۰۹	'bior3.1'
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۵۰۴۷	'bior3.3'
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۴۱۷۴	'bior3.5'

خطا ظاهر شود که جزو تداخل داده‌ها محسوب شده و درصد حضور آن‌ها در هر فاز بیان می‌شود. با مقایسه درصد حضور داده‌های حالت خطادار سیستم در ناحیه عملکرد بدون خطای سیستم (سطر دوم جدول (۵)) پیداست که حضور TCSC، به‌مراتب باعث افزایش



(الف)



(ب)

شکل (۶): (الف) نمایش دوبعدی انرژی سیگنال جریان فاز A در مدار شامل TCSC بین  $0$  تا  $2/5 \times 10^8 J$  در شرایط با و بدون خطا (ب) بزرگنمایی بخش (الف) شامل انرژی سیگنال جریان فاز A در مدار شامل TCSC بین  $0$  تا  $2/5 \times 10^5 J$

مختصات دوبعدی استفاده شده است. ویژگی‌های استخراج شده از فازهای A هر یک از دو مدار، به‌عنوان نمونه در شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده شده‌اند. داده‌های سبزرنگ ویژگی‌های استخراج شده در حالت بدون خطا و داده‌های قرمز رنگ ویژگی‌های استخراج شده در حالت وجود خطا در خط انتقال را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود، ویژگی استخراج شده از فاز دچار خطا با ویژگی استخراج شده از فاز سالم متناظر با حالات مختلف شبیه‌سازی شده با یکدیگر تداخل دارند. به دلیل اینکه در بخش (الف) شکل‌های (۶) و (۷)، انرژی تا سطح  $2500$  میلیون ژول نمایش داده شده است و قسمت سبز رنگ به درستی قابل رؤیت نبوده، لذا با بزرگنمایی قسمت تداخلی، بخش (ب) شکل‌ها تا سطح انرژی  $2/5$  میلیون ژول به نمایش در آمده است. اگر بیشترین مقدار انرژی متناظر با فاز سالم، به‌عنوان معیار جداسازی داده‌های فاز سالم از فاز خطادار در نظر گرفته شود، میزان تداخل ویژگی استخراجی از فاز بدون خطا با ویژگی استخراجی از همان فاز ولی در شرایط دارای خطا، در هریک از مدارهای شامل TCSC و مدار فاقد TCSC، در سطر اول جدول (۵) قابل مشاهده است. در جدول (۵)، درصد تداخل داده‌های استخراجی از سیستم سالم با داده‌های استخراجی از سیستم دارای خطا برای هر یک از فازها ارائه شده است. معیار تفکیک‌کنندگی، حداکثر اندازه انرژی داده‌ها در حالت سیستم بدون خطا است. به‌بیان دیگر، بیشترین مقدار انرژی متناظر با جریان‌های سه فاز، در هر یک از خطوط در شرایط بدون خطا، به‌عنوان مرز جداکننده شرایط بدون خطا و شرایط خطادار استفاده خواهد شد. بنابراین ممکن است، داده‌های انرژی هر فاز مربوط به دسته خطا در دسته داده‌های بدون



جدول (۵): درصد وجود ویژگی‌های حالت خط‌آدار سیستم در ناحیه‌ی عملکرد بدون خطا سیستم

	A1	B1	C1	A2	B2	C2
وجود خطا	۱۰/۴۶۸۳	۱۱/۷۲۶۴	۱۲/۸۱۹۱	۵/۳۴۴۴	۱۰/۳۹۴۹	۵/۹۷۸
L1G	۴/۳۸۶	۲/۳۴۹۶	۴/۲۹۸	۰	۰	۰
L2G	۰	۰	۰	۸/۵۹۱۱	۲/۶۵۰۲	۵/۲۲۲۷
LL1	۰/۸۷۷۲	۱/۵۶۶۲	۴/۲۹۸	۰	۰	۰
LL2	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۵۳۶۱
LL1G	۰/۸۷۷۲	۳/۱۳۲۳	۲/۸۶۵۳	۰	۰	۰
LL2G	۰	۰	۰	۱/۷۱۸۲	۲/۶۵۰۲	۳/۰۷۲۲
LLL1	۱/۷۵۴۴	۰/۷۸۳۱	۰/۷۱۶۳	۰	۰	۰
LLL2	۰	۰	۰	۰	۱/۷۶۶۸	۰
LLL1G	۱/۷۵۴۴	۰/۷۸۳۱	۰/۷۱۶۳	۰	۰	۰
LLL2G	۰	۰	۰	۰	۱/۷۶۶۸	۰
L1-L2	۸/۷۷۱۹	۱۰/۹۶۳۲	۱۰/۰۲۸۷	۱۷/۱۸۲۱	۱۰/۶۰۰۷	۱۸/۴۳۳۲
L1-L2G	۶/۱۴۰۴	۸/۵۳۵۶	۸/۵۹۶	۱۰/۹۹۶۶	۸/۶۵۷۲	۱۲/۲۸۸۸
LL1-L2	۸/۷۷۱۹	۱۰/۱۸۰۱	۹/۳۱۲۳	۸/۵۹۱۱	۶/۱۸۳۷	۹/۲۱۶۶
L1-LL2	۷/۰۱۷۵	۸/۶۱۳۹	۷/۸۷۹۷	۵/۱۵۴۶	۷/۹۵۰۵	۷/۶۸۰۵
LL1-L2G	۷/۸۹۴۷	۷/۰۴۷۸	۷/۸۷۹۷	۳/۴۳۶۴	۶/۱۸۳۷	۴/۶۰۸۳
L1-LL2G	۷/۰۱۷۵	۶/۸۹۱۲	۷/۸۷۹۷	۳/۰۹۲۸	۷/۹۵۰۵	۷/۶۸۰۵
LLL1-L2	۳/۵۰۸۸	۳/۱۳۲۳	۲/۸۶۵۳	۶/۸۷۲۹	۱/۷۶۶۸	۱/۵۳۶۱
L1-LLL2	۳/۵۰۸۸	۰	۱/۴۳۲۷	۳/۴۳۶۴	۱/۷۶۶۸	۱/۵۳۶۱
LLL1-L2G	۳/۵۰۸۸	۳/۱۳۲۳	۲/۸۶۵۳	۳/۴۳۶۴	۱/۲۳۶۷	۱/۵۳۶۱
L1-LLL2G	۰	۱/۵۶۶۲	۱/۴۳۲۷	۰	۱/۷۶۶۸	۱/۵۳۶۱
LL1-LL2	۷/۸۹۴۷	۹/۳۹۷	۹/۳۱۲۳	۱۰/۳۰۹۳	۷/۹۵۰۵	۷/۶۸۰۵
LL1-LL2G	۷/۸۹۴۷	۷/۸۳۰۹	۷/۱۶۳۳	۶/۸۷۲۹	۷/۹۵۰۵	۷/۲۱۹۷
LLL1-LL2	۴/۳۸۶	۳/۱۳۲۳	۲/۱۴۹	۰	۳/۵۳۳۶	۱/۵۳۶۱
LLL1-LL2G	۴/۳۸۶	۳/۱۳۲۳	۲/۵۷۸۸	۰	۳/۵۳۳۶	۱/۵۳۶۱
LL1-LLL2	۲/۶۳۱۶	۱/۵۶۶۲	۱/۴۳۲۷	۱/۷۱۸۲	۲/۶۵۰۲	۱/۵۳۶۱
LL1-LLL2G	۲/۶۳۱۶	۱/۵۶۶۲	۱/۴۳۲۷	۱/۷۱۸۲	۲/۶۵۰۲	۱/۵۳۶۱
LLL1-LLL2	۱/۷۵۴۴	۰/۷۸۳۱	۰/۷۱۶۳	۰	۱/۷۶۶۸	۰
LLL1-LLL2G	۱/۷۵۴۴	۰/۷۸۳۱	۰/۷۱۶۳	۰	۱/۷۶۶۸	۰

است. ردیف انتهایی این جدول برابر با میانگین درصد صحت عملکرد الگوریتم طبقه‌بندی کننده می‌باشد. با توجه به این نتایج، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بهترین عملکرد را داشته و به‌عنوان الگوریتم طبقه‌بندی کننده انتخاب می‌شود. این الگوریتم، داده‌ها را با میانگین ۹۴/۷۸ درصد تفکیک کرده است؛ اما داده‌هایی که به نادرستی تفکیک شده‌اند را می‌توان به ۲ دسته تقسیم کرد: ۱. داده‌های فاز آسیب‌نندیده را خط‌آدار و ۲. داده‌های فاز آسیب‌دیده را سالم تشخیص داده است. درصد حضور هر یک از این داده‌ها در دسته‌ی مقابل خود در جدول (۷) ذکر شده است. علاوه بر این، در جدول (۸) عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط سیگنال به نویز ۴۰ و ۳۰

تداخل داده‌های حالت خط‌آدار سیستم در ناحیه داده‌های بدون خطای سیستم شده و در عمل طبقه‌بندی خطا را با پیچیدگی بیشتری همراه ساخته است. در جدول‌های (۵) و (۶)، شکل بیان هر یک از فازها به فرمت LN است که در آن L بیانگر فاز (A, B و C) و N بیانگر مدار (مدار شامل TCSC) و یا مدار ۲ (مدار فاقد TCSC) است.

با توجه به تداخل داده‌ها، از سه نوع الگوریتم درخت تصمیم‌گیری، ماشین بردار پشتیبان و k-نزدیک‌ترین همسایه جهت طبقه‌بندی استفاده می‌شود و با مقایسه میان نتایج به‌دست‌آمده، بهترین الگوریتم جهت طبقه‌بندی، انتخاب می‌شود. درصد عملکرد هر یک از الگوریتم‌ها در هر یک از شش فاز، مطابق با جدول (۶)، قابل مشاهده

جدول (۷) درصد عملکرد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در

طبقه‌بندی خطا

فاز	دقت طبقه‌بندی	حالت بدون خطا که خطا طبقه‌بندی شده	حالت خطا که بدون خطا طبقه‌بندی شده
A1	٪۹۶/۴۰	٪۱/۹۶	٪۱/۶۴
B1	٪۹۲/۶۵	٪۵/۲۷	٪۲/۰۶
C1	٪۹۳/۹۷	٪۳/۵۵	٪۲/۴۷
A2	٪۹۶/۴۰	٪۲/۵۸	٪۱/۰۱
B2	٪۹۳/۲۴	٪۵/۲۰	٪۱/۵۴
C2	٪۹۶/۰۷	٪۲/۵۸	٪۱/۳۴

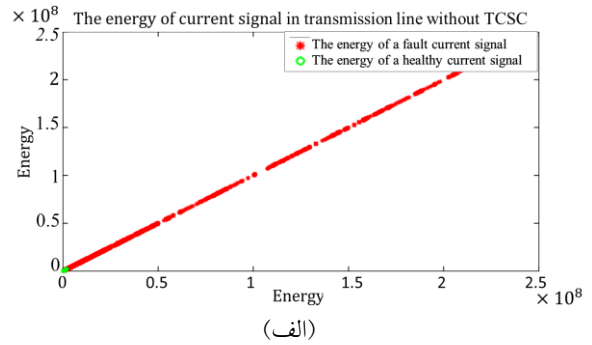
کامپیوتری که پردازش را اجرا کرده است عبارتست از: Core(TM) Intel(R) i5-8250U CPU @ 1.60 GHz

۳. مقایسه نتایج مطالعه با مقالات دیگر

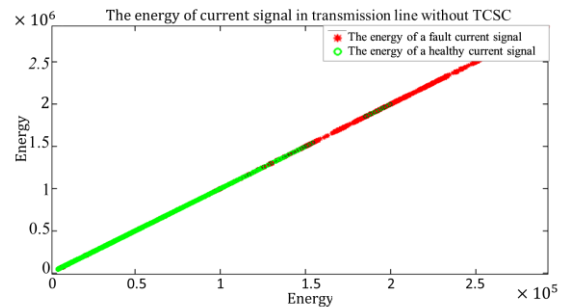
در [۱۴]، هدف تعیین بهترین موجک و سطح تجزیه موجک مادر برای طبقه‌بندی خطا در خطوط انتقال است. نوع سیگنال (مثلاً ولتاژ، جریان یا هر دو) که برای تجزیه و تحلیل مورد نیاز است نیز در این مطالعه تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که در [۱۴]، به دلیل شبیه‌سازی در خط انتقال تک مدار، تنها یازده نوع خطا را بررسی کرده است؛ اما در مقاله حاضر به دلیل وجود خط انتقال دو مدار، علاوه بر خطاهای درون مداری، خطاهای بین مداری نیز بررسی شده

است که تعداد آن‌ها بالغ بر ۱۲۰ نوع می‌باشد. همچنین در مقاله حاضر هر یک از خطوط سیستم دو مدار به صورت جداگانه بررسی شده است. همچنین در [۱۴]، کارایی روش در خطوط جبران‌سازی شده نیز ارزیابی نشده است.

روش ارائه شده در [۴]، به تشخیص و طبقه‌بندی خطا در خطوط انتقال دو مدار در حضور TCSC پرداخته است. در [۴]، بطور پیش فرض با استفاده از موجک db4 انرژی سیگنال به‌عنوان ویژگی استخراجی محاسبه شده است. درحالی‌که در مقاله حاضر روش معینی جهت انتخاب موجک مادر بهینه پیشنهاد شده است. به‌عبارت دیگر، اولین تفاوت میان مقاله حاضر و [۴]، انتخاب هوشمندانه‌ی موجک مادر است. تفاوت دیگر مربوط به بررسی انواع خطاها می‌باشد. در مقاله حاضر، انواع خطاهای درون مداری و بین مداری شبیه‌سازی شده است، اما مقاله‌ی [۴] تنها ۱۰ نوع خطا را بررسی کرده است. تفاوت سوم، در نوع و نحوه طبقه‌بندی می‌باشد. در مقاله [۴]، برای طبقه‌بندی، مقدار آستانه‌ای را به‌عنوان مرز میان حالات صحیح و حالات خطادار مشخص کرده است؛ اما در مقاله حاضر، بین دقت عملکرد چندین



(الف)



(ب)

شکل (۷): نمایش دوبعدی انرژی سیگنال جریان فاز A در مدار فاقد TCSC بین ۰ تا  $2/5 \times 10^8 J$  در شرایط با و بدون خطا (ب) بزرگنمایی بخش (الف) شامل انرژی سیگنال جریان فاز A در مدار فاقد TCSC بین ۰ تا  $2/5 \times 10^5 J$

جدول (۶) درصد عملکرد صحیح هر یک از الگوریتم‌ها در

طبقه‌بندی خطا در هر یک از فازها

طبقه‌بندی کننده	درخت تصمیم‌گیری	k-نزدیک‌ترین همسایه	بردار ماشین پشتیبان
صحت طبقه‌بندی A1	٪۹۶/۵۴	٪۹۵/۰۶	٪۹۶/۴۰
صحت طبقه‌بندی B1	٪۹۲/۲۶	٪۸۸/۹۴	٪۹۲/۶۵
صحت طبقه‌بندی C1	٪۹۴/۴۳	٪۸۹/۹۶	٪۹۳/۹۷
صحت طبقه‌بندی A2	٪۹۵/۹۲	٪۹۵/۲۶	٪۹۶/۴۰
صحت طبقه‌بندی B2	٪۹۳/۰۶	٪۸۹/۶۶	٪۹۳/۲۴
صحت طبقه‌بندی C2	٪۹۶/۳۵	٪۹۱/۸۹	٪۹۶/۰۷
میانگین	٪۹۴/۷۶	٪۹۱/۷۹	٪۹۴/۷۸

دسی‌بل ارزیابی شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد دقت طبقه‌بندی اندکی کاهش یافته ولی در سطح قابل قبولی است. در روش پیشنهادی، زمان پردازش سیگنال و استخراج ویژگی حدود  $1/1 \pm 0/1$  میلی‌ثانیه و زمان تصمیم‌گیری ماشین بردار پشتیبان به ازای یک ورودی تست جدید حدود  $0/7 \pm 0/1$  میلی‌ثانیه بدست آمده است. با در نظر گرفتن حدود ۲۰ درصد حاشیه اطمینان، روش پیشنهادی دارای زمان عملکردی حدود  $2/4$  میلی‌ثانیه است. مشخصات

## جدول (۸) درصد عملکرد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی

### خطا تحت شرایط نویزی

فاز	دقت طبقه‌بندی با نویز ۴۰ دسی‌بل	دقت طبقه‌بندی با نویز ۳۰ دسی‌بل
A1	۹۶/۱۰	۹۴/۹۵
B1	۹۱/۴۲	۹۱/۲۷
C1	۹۳/۰۵	۹۲/۸۸
A2	۹۵/۸۸	۹۵/۳۵
B2	۹۲/۴۱	۹۲/۰۱
C2	۹۵/۳۵	۹۵/۱۱

الگوریتم طبقه‌بندی مقایسه شده است و بهترین الگوریتم جهت طبقه‌بندی تعیین شده است. همانطور که در جدول (۵) بیان شده است، درصد تداخل داده‌ها چالش مهمی برای روش‌هایی که تنها مبتنی بر حد آستانه هستند به حساب می‌آید.

## ۴. نتیجه

در این مقاله با استفاده از پنجره‌ای به طول یک سیکل از ولتاژ و جریان خطوط انتقال در لحظه وقوع خطا نمونه‌برداری شده است. از مزایای روش پیشنهادی یافتن بهترین موجک مادر با توجه به شرایط سیستم است. پارامترهای خطا تغییراتی در مشخصه‌های ولتاژ و جریان خط به وجود می‌آورد؛ بنابراین علاوه بر تعیین موجک مادر بهینه، تعیین سطح تجزیه مناسب نیز نیاز است تا بتوان طبقه‌بندی خطا را به خوبی انجام داد. در این مقاله، جستجوی موجک مادر بهینه در سیستم انتقال دو مداره شامل TCSC روی هر کدام از مدارها به صورت جداگانه انجام شده است. در نهایت، جهت استخراج بردار ویژگی، موجک مادر db1 به عنوان مناسب‌ترین موجک انتخاب و انرژی بخش چهارم از ضرایب جزئیات سطح چهار سیگنال جریان، که بیشترین تغییرات را در لحظه‌ی خطا داشته، تعیین شده است. سپس، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در مقایسه با الگوریتم‌های درخت تصمیم‌گیری و k-نزدیک‌ترین همسایه، بهترین طبقه‌بندی را با میانگین ۹۴/۷۸ درصد انجام داده است. لازم به ذکر است که تمام شرایط وقوع خطا از جمله تأثیر TCSC روی ولتاژ و جریان خط، تأثیر القای متقابل در خطوط موازی، مکان خطا، امپدانس خطا، زاویه وقوع خطا و ۱۲۰ نوع خطا در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.

## مراجع

- [1] Altuve, Héctor J., Joseph B. Mooney, and George E. Alexander., "Advances in series-compensated line protection", Annual Conference for Protective Relay Engineers, IEEE, 2009.

- [2] Pradhan, A.K., Routray, A., Pati, S., et al., "Wavelet fuzzy combined approach for fault classification of a series-compensated transmission line", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No.4, pp. 1612 - 1618, 2004.
- [3] Jamehbozorg, A., Shahrtash, S.M., "A decision tree-based method for fault classification in double-circuit transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No.4, pp. 2184 - 2189, 2010.
- [4] Biswas, Sauvik, et al., "Fault detection and classification for TCSC compensated transmission lines using wavelet energy", International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT), IEEE, 2018.
- [5] Bo, Q., Jiang, F., Chen, Z., et al., "Transient based protection for power transmission systems", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 1832-1837, 2000.
- [6] Gawali, N.U., Hasabe, R., Vaidya, A., "A comparison of different mother wavelet for fault detection & classification of series compensated transmission line", Int. J. Innov. Res. Sci. Technol., Vol. 1, No.9, pp. 57-63, 2015.
- [7] Dash, P., and Samantray, S., "Phase selection and fault section identification in thyristor controlled series compensated line using discrete wavelet transform", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 26, No. 9, pp. 725-732, 2004.
- [8] Swetapadma, Aleena, and Anamika Yadav., "Directional relaying using support vector machine for double circuit transmission lines including cross-country and inter-circuit faults", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 81, pp. 254-264, 2016.
- [9] Vyas, Bhargav Y., R. P. Maheshwari, and Biswarup Das., "Improved fault analysis technique for protection of Thyristor controlled series compensated transmission line", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 55, pp.321-330, 2014.
- [10] Ray, Papia, and Debari Prasad Mishra., "Support vector machine based fault classification and location of a long transmission line", Engineering science and technology, an international journal, Vol. 19, No. 3, pp. 1368-1380, 2016.
- [11] Khorashadi-Zadeh, H., "Artificial neural network approach to fault classification for double circuit transmission lines". IEEE/PES Transmission & Distribution Conf. & Exposition, Latin America, pp. 859-862, 2004.
- [12] Samantaray, S. R., "Decision tree-based fault zone identification and fault classification in flexible AC transmissions-based transmission line", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 3, No.5, pp. 425 - 436, 2009.
- [13] Taheri, Mir Mohammad, et al., "High Speed Decision Tree-Based Series Compensated Transmission Lines Protection Using Differential Phase Angle of Superimposed Current", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No.6, pp. 3130 - 3138, 2018.
- [14] Abdelgayed, Tamer S., Walid G. Morsi, and Tarlochan S. Sidhu., "A new harmony search approach for optimal wavelets applied to fault classification", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No.2, pp. 521 - 529, 2018.
- [15] Nale, Ruchita, Hari Verma, and Monalisa Biswal. "An enhanced fuzzy rule based protection scheme for TCSC compensated double circuit transmission system." International Journal of Modelling and Simulation 41, no. 2 (2021): 120-130.

- [16] Mishra, Praveen Kumar, Anamika Yadav, and Dewashri Pansari. "*Classification of faults in a TCSC compensated transmission line using data mining algorithm.*" In 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), pp. 1-5. IEEE, 2020.
- [17] Pande, Rakesh K., and Soumya R. Mohanty. "*Classification of Shunt Faults in Double Circuit Lines Using Thresholding Method.*" In 2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), pp. 240-244. IEEE, 2018.
- [18] Jovic, Dragan, and G. N. Pillai., "*Analytical modeling of TCSC dynamics*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No.2, pp. 1097-1104, 2005.