

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۸

شناسایی و طبقه‌بندی خطا در خطوط دومداره در حضور TCSC با استفاده از روش ترکیبی هوشمند

زهرا مروج^{۱*}، علی خلیل‌زاده فرد^۲، محمد پازکی^۳

^۱ استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

zmoravej@semnan.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

khalilzadehfard.ali@gmail.com

^۳ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

Pazoki.m@du.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روش مؤثری برای تشخیص و طبقه‌بندی خطا در یک خط انتقال دومداره 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 الگوست. 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 برای استخراج ویژگی شده است. به دلیل تنوع موجک‌های مادر، در ابتدا با استفاده از روشی جدید، db1 به عنوان بهترین موجک مادر شناسایی می‌شود و از ضرایب 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 انتخاب می‌شود که عملکرد بهتری نسبت به سایرین دارد. در این مقاله، سیستم نمونه و روش پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: خطوط دومداره، خط جبران‌سازی شده، طبقه‌بندی کننده خطا.

۱. مقدمه

سیستم‌های انتقال متناوب انعطاف‌پذیر تحول بزرگی در صنعت برق به وجود آورده‌اند. یکی از این ادوات جبران‌ساز، خازن سری کنترل‌شده با تریستور (TCSC^۱) است که با تنظیم درصدی از اندوکنانس القایی یک خط انتقال، منجر به بهبود پایداری حالت دائم و گذرای سیستم، تقسیم جریان بار بهتر بین مسیرهای موازی، تنظیم سطوح بارگذاری خط، کاهش تلفات انتقال، کاهش افت ولتاژ در سیستم در شرایط غیرطبیعی و حداکثر کردن توان انتقالی می‌شود [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 دومداره با وجود امپدانس متقابل طرح حفاظتی را دچار مشکل می‌کند [۲-۴].

یکی از روش‌های کارآمد برای تشخیص و طبقه‌بندی خطا در خطوط جبران‌سازی شده، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند طبقه‌بندی است. مقالات متعددی به بحث دربارهٔ طبقه‌بندی خطا در خطوط جبران‌سازی شده و موازی پرداخته‌اند. در روش‌های مبتنی بر شناسایی الگو، روند استخراج ویژگی‌ها^۲ تأثیر بسزایی در دقت طبقه‌بندی‌کننده‌ها خواهد داشت. اگرچه سیگنال‌های جریان و ولتاژ شامل تمام اطلاعات خطا هستند، اما استفاده از روش‌های استخراج ویژگی، با کاهش ابعاد داده‌های ورودی، کارایی الگوریتم‌های طبقه‌بندی خطا را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش دقت و سرعت الگوریتم می‌گردد. در هنگام وقوع خطا، محتوای فرکانسی سیگنال‌های جریان و ولتاژ به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کنند که در صورت شناسایی و تجزیه و تحلیل صحیح، تا حد زیادی به حفاظت از خطوط انتقال طی خطا کمک می‌کند [۵]. روش‌های گوناگونی برای تجزیه و تحلیل هارمونیک‌های سیگنال در حوزه فرکانس و در حوزه زمان-فرکانس مطرح شده است که برای مثال می‌توان به دو روش تبدیل فوریه (FT^۳) و تبدیل موجک (WT^۴)، که در روش‌های تشخیص خطا هم استفاده شده است، اشاره کرد.

تبدیل موجک به‌عنوان یک روش در حوزه زمان-فرکانس برای

تحلیل سیگنال‌های ناپیوسته (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 ضرایب جزئیات و تقریب نشان دهد [۴]. هنگام استفاده از تبدیل موجک گسسته (DWT) برای استخراج ضرایب مناسب و متعاقباً استخراج ویژگی‌ها، باید دربارهٔ انتخاب موجک مادر و تعداد سطح تجزیه مناسب تصمیم‌گیری شود. در مرجع [۶]، یک مقایسه بر روی انواع موجک‌های مادر برای تشخیص و طبقه‌بندی خطا، در خط انتقال جبران‌سازی شده سری انجام شده است. در مقاله مذکور، هفت موجک مادر HAAR, Coiflet, Symlets, Daubechies (db), Reverse BiorSplines, BiorSplines و Meyer families بر اساس نسبت انرژی سیگنال‌های جریان خطای تک‌فاز به زمین ارزیابی شده که موجک مادر bior3.9 برای تشخیص خطا توصیه شده است. این مقاله به دلیل نداشتن روش سازمان‌دهی شده‌ای، نتوانسته طیف وسیعی از موجک‌های مادر را ارزیابی کند. در مرجع [۲]، تنها با بررسی موجک مادر Meyer و استفاده از حداکثر مقدار ضرایب موجک به‌عنوان ورودی الگوریتم فازی، برای طبقه‌بندی خطا در یک خط جبران‌سازی شده سری استفاده شده است. در مرجع [۴] و [۷]، به شکل پیش فرض، موجک مادر db4 برای استخراج شاخص و طبقه‌بندی خطا، مناسب تشخیص داده شده است. لذا در مرجع [۴]، با تعریف شاخصی از جنس انرژی، حاصل از ضرایب خروجی موجک مادر و در مرجع [۷] با تعریف شاخصی حاصل از انحراف معیار ضرایب خروجی موجک مادر، به طبقه‌بندی خطا در خط جبران‌سازی شده سری پرداخته شده است. در مرجع [۸] نیز تنها از موجک مادر db4 برای پردازش سیگنال‌های جریان استفاده شده و از ضرایب حاصل، بردار ورودی الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان ساخته شده است. روش شناسایی الگوی پیشنهادی، برای 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 مرجع [۹]، بر مبنای پردازش داده‌های نیم‌سیکل جریان سه‌فاز پس از وقوع خطا، با کمک تبدیل موجک گسسته db1 و استفاده از شبکه عصبی چبیشف طبقه‌بندی خطا در خط انتقال جبران‌سازی شده با TCSC انجام شده است. در مرجع [۱۰]، برای استخراج ویژگی، پردازش یک سیکل جریان با استفاده از چهار تبدیل موجک db1-4 پیشنهاد و در نهایت db4 به‌عنوان

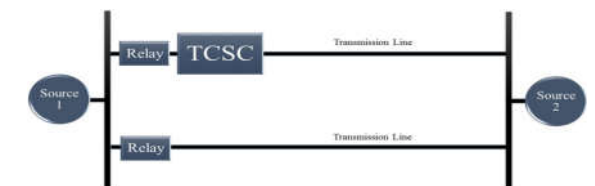
1. Thyristor Controlled Series Capacitor
2. Extract Features
3. Fast Fourier Transform
4. Wavelet Transform

همان‌طور که در مرور مقالات مشهود است، نحوه انتخاب موجک مادر برای استخراج بردار ویژگی‌ها همچنان چالش‌برانگیز است. علاوه بر این، استفاده از TCSC با اینکه مزیت‌هایی دارد، 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 برای 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، در نهایت بهترین موجک مادر انتخاب می‌شود. 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 هریک از این الگوریتم‌ها به دست آمده است. در این مقاله، کارایی روش پیشنهادی نیز به‌ازای 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 طبقه‌بندی‌کننده بررسی شده است.

۲. روش پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی

۱.۲. سیستم نمونه

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 برای شبیه‌سازی برگرفته از [۱۸] است. طول خط ۴۰۰ کیلومتر و سطح ولتاژ سیستم ۵۰۰ کیلوولت است. جزئیات مشخصات سیستم در جدول (۱) ذکر شده است. مطابق شکل (۲)، پس از ورود TCSC در مدار در لحظه ۰/۱۵ 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 است.

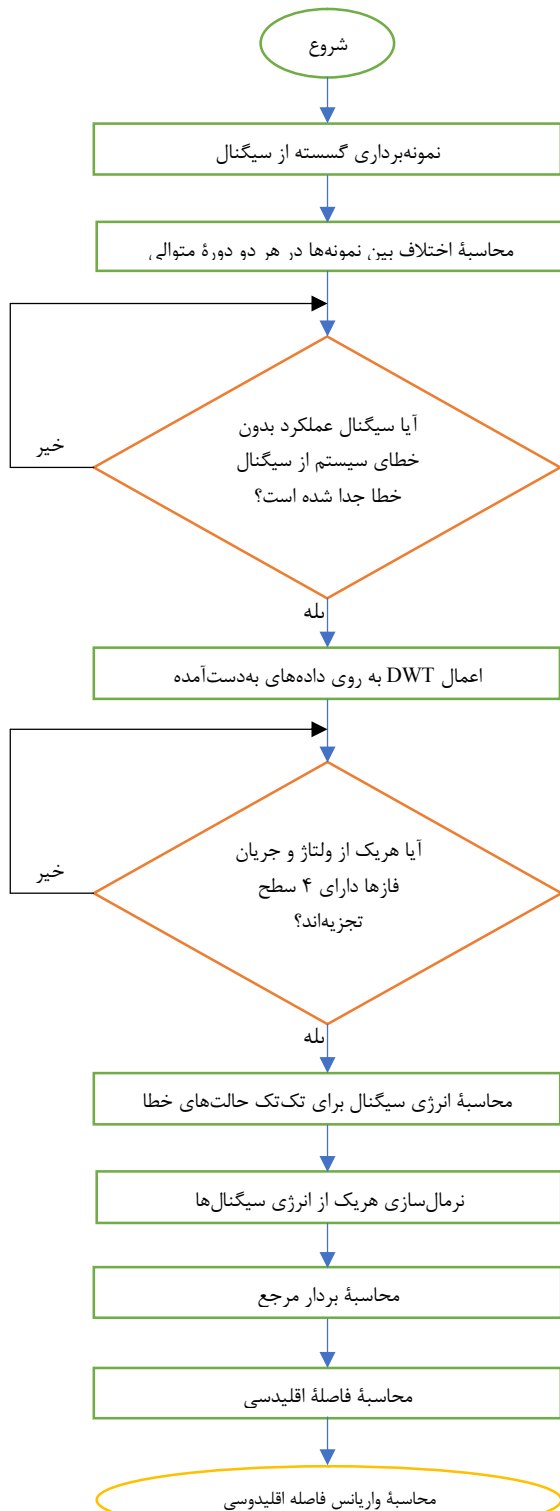


شکل (۱): سیستم نمونه شامل خط موازی جبران‌سازی شده با

TCSC

بهترین گزینه انتخاب شده است. ویژگی‌های انرژی و آنتروپی از ضرایب تجزیه شده به‌عنوان بردار ورودی استخراج شده است و آموزش و تست ماشین بردار پشتیبان، برای طبقه‌بندی خطا در خط جبران‌سازی شده با TCSC انجام شده است. در مرجع [۱۱]، شش ویژگی استخراج شده از ولتاژ و جریان خط به‌عنوان ورودی الگوریتم شبکه عصبی، برای طبقه‌بندی خطا در خطوط موازی پیشنهاد شده است. در این مقاله، به‌صورت مستقیم از کمیت‌های الکتریکی به‌عنوان بردار ویژگی‌ها استفاده شده است. در مرجع [۱۲]، از داده‌های یک سیکل از جریان سه‌فاز پس از لحظه وقوع خطا، نمونه‌برداری شده و بدون هیچ پردازشی به‌عنوان 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 مرجع [۳]، برای طبقه‌بندی خطا در خطوط موازی، ده هارمونیک ابتدایی فرد سیگنال ولتاژ و جریان تا هارمونیک نوزده، از طریق تبدیل فوری گسسته نیم‌سیکل استخراج شده است. سپس، از الگوریتم جنگل تصادفی برای طبقه‌بندی خطا در این نوع خطوط استفاده شده است. در مرجع [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 مرجع [۱۴]، نویسندگان با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی هارمونی جست‌وجو، بهترین تبدیل موجک را برای شناسایی انواع خطا در خطوط انتقال تک‌مداره و بدون جبران‌ساز استفاده کرده‌اند. با توجه به چالش‌های خطوط دومداره با حضور TCSC در شناسایی خطا، در مرجع [۱۵]، روشی بر مبنای استخراج فازور دینامیکی و الگوریتم فازی، برای طبقه‌بندی خطا در این نوع خطوط پیشنهاد شده است که به‌طور کلی تعیین قوانین فازی بدون اطلاعات قبلی امکان‌پذیر نیست. در مرجع [۱۶]، در خط انتقال جبران‌سازی شده با TCSC، ویژگی‌هایی بر مبنای انحراف معیار ضرایب خروجی تبدیل موجک مادر db4، به‌عنوان ورودی درخت تصمیم‌گیری، برای طبقه‌بندی خطا پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۷] نیز همچون برخی مقالات اشاره شده در این بخش، شاخصی بر مبنای ضرایب مستخرج از موجک مادر db4 برای طبقه‌بندی خطا در خط موازی به کار گرفته شده است.

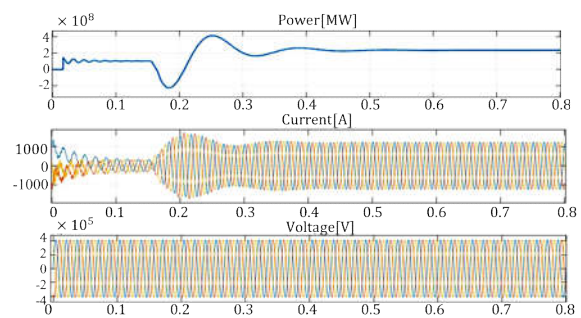
تجزیه، و انتخاب سیگنال جریان یا ولتاژ از دیگر مسائل پیش روست که در این مقاله به آن پرداخته شده است. در ادامه با استفاده از ویژگی‌های به‌دست‌آمده طبقه‌بندی خطا انجام شده است.



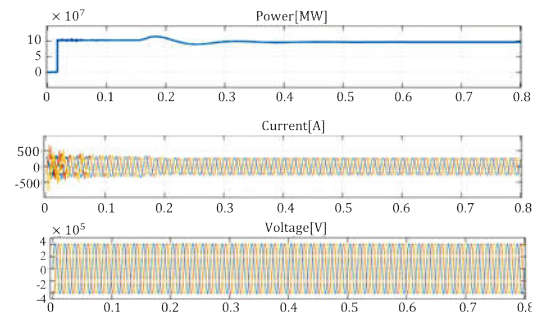
شکل (۳): الگوریتم پیشنهادی برای استخراج ویژگی‌های داده‌ها

جدول (۱): مشخصات خط انتقال دومی‌داره در حضور TCSC در

ابتدای خط	
R (Ω/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)	$C \begin{bmatrix} c_1 \\ c_0 \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9/121 \cdot 10^{-9} \\ 6/61 \cdot 10^{-9} \\ -2/512 \cdot 10^{-9} \end{bmatrix}$
L (H/km)	$L \begin{bmatrix} l_1 \\ l_0 \\ l_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2813 \cdot 10^{-3} \\ 3/7757 \cdot 10^{-3} \\ 2/4944 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$



الف



ب

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

۲.۲. روش پیشنهادی

طبقه‌بندی خطا یکی از مشکلات چالش‌برانگیز در خطوط انتقال است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی‌کننده 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 گرفت. انتخاب موجک مادر، انتخاب سطح

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 جریان‌سازی شده دوداره انجام شده است. در این مقاله، در ابتدا بین موجک‌های مادر مقایسه‌ای انجام شده است تا مناسب‌ترین آن‌ها انتخاب گردد و از آن موجک مادر برای استخراج ویژگی‌ها استفاده شده است. لازمه طبقه‌بندی خطا، تشخیص خطاست که این موضوع با استفاده از شاخص میانگین حاصل جمع جریان سه‌فاز، در هریک از خطوط، میسر شده است؛ بدین صورت که میانگین جریان‌های سه‌فاز 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 خطاست. الگوریتم استخراج ویژگی‌ها در شکل (۳) قابل مشاهده است.

در ابتدا سیگنال‌های ولتاژ و جریان سه‌فاز با فرکانس $3/8$ کیلوهرتز نمونه‌برداری می‌شوند. طول این سیگنال یک سیکل بوده که با دانستن لحظه وقوع خطا، شروع آن نیم‌سیکل قبل از وقوع خطا و پایان آن نیم‌سیکل پس از وقوع خطاست. 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 نشان‌دهنده 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 نمونه‌برداری شده (x_y^D) از ولتاژ و جریان اعمال می‌شود و پس از آن، با توجه به رابطه (۲)، می‌توان انرژی سیگنال‌های هریک از بخش‌های خروجی تبدیل موجک را محاسبه کرد:

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

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

از خروجی تبدیل موجک، یک بردار حاوی انرژی ضرایب موجک تقریب (EA4) و یک بردار حاوی انرژی ضرایب جزئیات (ED1-ED4) متناظر با سیگنال ولتاژ یا جریان استخراج می‌شود. برای 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 برای تجزیه، تبدیل موجک دارای ۱۵ المان در

خروجی برای هر نوع خطا خواهد بود. عدد ۱۵ حاصل ضرب تعداد فازها (سه‌فاز) در تعداد سطوح تجزیه‌شده (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 آنجا که مقادیر انرژی ضرایب تقریب، به‌طور چشمگیری، بزرگ‌تر از مقادیر انرژی ضرایب جزئیات است، 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 μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار را نشان می‌دهند. ضرایب انرژی نرمال‌شده برای سایر خطاها، به‌طور مشابه 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، Eh محاسبه و با استفاده از رابطه (۴)، Z_{Eh} تعیین می‌شود. در این مرحله، فاصله اقلیدسی، ED ، با محاسبه اختلاف بین بردار به‌دست‌آمده 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 اقلیدسی، برای انواع خطاهای مختلف، در یک بردار Dis مطابق با رابطه (۶) ذخیره می‌شود:

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

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

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

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

در ادامه پس از به‌کارگیری 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،

عدد ۱ باشد، بدین معناست که جریان خطوط به‌عنوان ورودی به موجک مادر داده شده و اگر سلولی از جدول‌های (۲) و (۳) دارای عدد صفر باشد، بدین معناست که در نظر گرفتن آن ترکیب، تأثیر بسزایی در محاسبه σ_{Dis}^2 نخواهد داشت و برعکس، عدد یک بیانگر تأثیر زیاد آن ترکیب در محاسبه σ_{Dis}^2 است.

برای مثال در سطر ۲ جدول (۲)، بخش چهارم جزئیات سیگنال جریان دارای بیشترین تغییر در هنگام بروز خطاست و مابقی اجزای سیگنال جریان، به‌انضمام تمام سطوح تجزیه‌شده سیگنال ولتاژ، تغییر محسوسی پس از بروز خطا نخواهند داشت. در این مقاله، فرمت نام‌گذاری سطوح تجزیه سیگنال‌های ولتاژ و جریان به فرمت XnY است که در آن Y بیانگر نوع سیگنال (ولتاژ=V، جریان=I)، ۴، ۳، ۲، ۱ است که در آن n شماره سطح تجزیه‌شده را بیان می‌کند و X بیانگر بخش جزئیات (D) یا بخش تقریب (A) سیگنال تبدیل‌یافته را نشان می‌دهد.

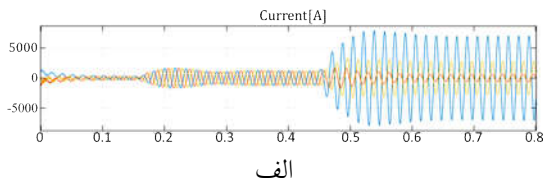
جدول (۲): پنج موجک مادر برتر و بخش‌های مناسب از سطوح تجزیه برای طبقه‌بندی خطا در مدار شامل TCSC

I	V	D1I	D2I	D3I	D4I	A4I	D1V	D2V	D3V	D4V	A4V	σ_{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'

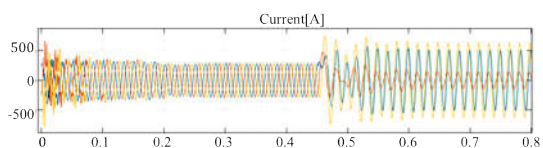
جدول (۳): ۵ موجک مادر برتر و بخش‌های مناسب از سطوح تجزیه برای طبقه‌بندی خطا در مدار فاقد TCSC

I	V	D1I	D2I	D3I	D4I	A4I	D1V	D2V	D3V	D4V	A4V	σ_{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'

فازهای A در هر دو مدار را نشان می‌دهد.



الف



ب

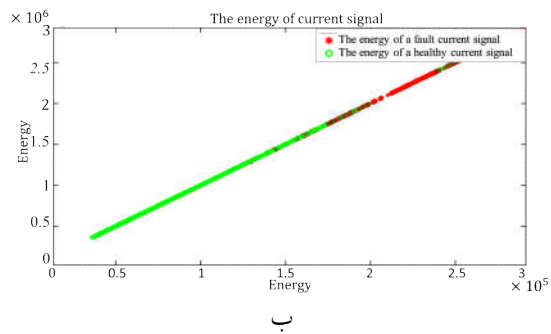
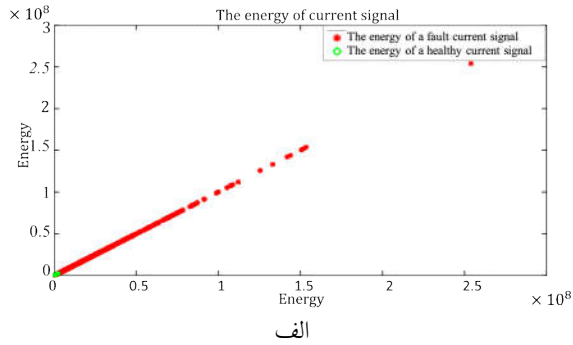
شکل (۴): الف. جریان خط انتقال شامل TCSC در خطای تک‌فاز به زمین؛ ب. جریان خط انتقال فاقد TCSC در خطای تک‌فاز به زمین

سطوح تجزیه هریک از سیگنال‌ها به دست خواهد آمد و طبق روش پیشنهادی، σ_{Dis}^2 محاسبه خواهد شد. این محاسبات به‌ازای هر موجک مادر تکرار خواهد شد. علاوه بر این، این روش برای هریک از خطوط (مدار شامل TCSC و مدار فاقد TCSC) به‌صورت جداگانه اعمال خواهد شد. در انتها حالتی که دارای بیشترین مقدار σ_{Dis}^2 است، از آن برای استخراج ویژگی مرتبط به هریک از خطوط به‌صورت جداگانه استفاده خواهد شد. بدین ترتیب، تعداد ۸۵ موجک مادر ارزیابی شده است که در جدول‌های (۲) و (۳)، برای هریک از خطوط، ارزیابی پنج موجک برتر برای نمونه نمایش داده شده است. موجک مادر db1 به‌عنوان مناسب‌ترین موجک مادر و اطلاعات سطح چهارم جزئیات جریان خط انتقال، به‌عنوان بهترین ترکیب برای هر دو خط انتقال شامل و فاقد TCSC تعیین شده‌اند. در جدول (۲) و (۳) اگر ستون I شامل

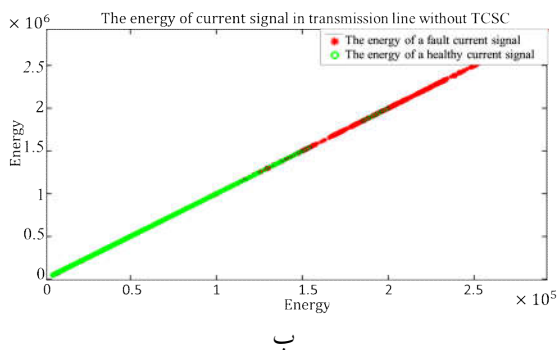
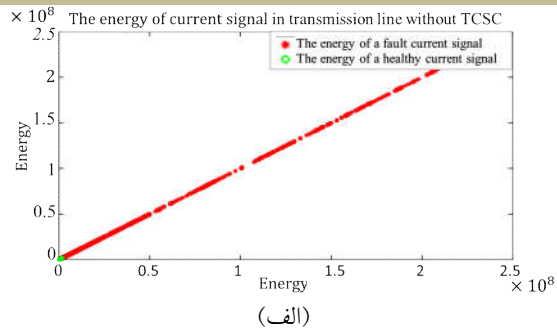
۲.۲.۲. طبقه‌بندی خطا و نتایج شبیه‌سازی

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 هریک را سنجیده و بهترین الگوریتم انتخاب می‌شود. مطابق جدول (۴)، انواع خطاهای درون‌مداری و بین‌مداری، به‌ازای مقاومت خطاهای مختلف، مکان‌های مختلف خطا و زوایای مختلف وقوع خطا شبیه‌سازی شده است. همچنین در جدول (۴)، داده‌های آموزش و تست الگوریتم‌های طبقه‌بندی به‌تفکیک مشخص شده‌اند. شکل‌های (۴) و (۵) برای نمونه، سیگنال خطا از

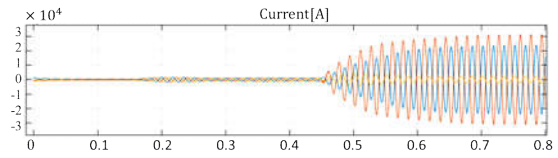
لذا با بزرگ‌نمایی قسمت تداخلی، بخش ب شکل‌ها تا سطح انرژی ۲/۵ میلیون ژول به نمایش درآمده است.



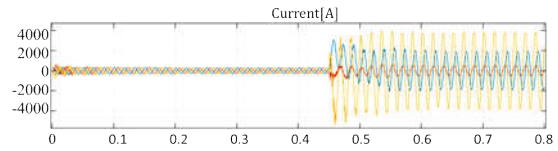
شکل (۶): الف. نمایش دوبعدی انرژی سیگنال جریان فاز A در مدار شامل TCSC بین ۰ تا $2/5 \times 10^6 J$ در شرایط با و بدون خط؛ ب. بزرگ‌نمایی بخش الف شامل انرژی سیگنال جریان فاز A در مدار شامل TCSC بین ۰ تا $2/5 \times 10^6 J$



شکل (۷): الف. نمایش دوبعدی انرژی سیگنال جریان فاز A در مدار فاقد TCSC بین ۰ تا $2/5 \times 10^6 J$ در شرایط با و بدون خط؛ ب. بزرگ‌نمایی بخش الف شامل انرژی سیگنال جریان فاز A در مدار فاقد TCSC بین ۰ تا $2/5 \times 10^6 J$



الف



ب

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

جدول (۴): شبیه‌سازی خطاهای درون‌مداری و بین‌مداری به‌ازای شرایط مختلف شبیه‌سازی

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

انرژی بخش چهارم جزئیات سیگنال جریان در هر یک از فازها، که از نیم‌سیکل قبل از وقوع خطا تا نیم‌سیکل بعد از خطا، با استفاده از موجک مادر db1 استخراج شده‌اند، به‌عنوان ویژگی در بخش طبقه‌بندی استفاده خواهند شد. این ویژگی‌ها برای طبقه‌بندی دو کلاس خروجی استفاده می‌شوند: وجود خطا و فقدان خطا در خط انتقال. با توجه به اینکه داده‌های به‌دست‌آمده از جنس انرژی‌اند و صرفاً یک عدد است و تنها دارای یک بعد هستند، برای مشاهده بهتر میزان تداخل داده‌ها، در حالت خطا و فقدان خطا، از محور مختصات دوبعدی استفاده شده است. ویژگی‌های استخراج‌شده از فازهای A هر یک از دو مدار، برای نمونه در شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده شده‌اند. داده‌های سبزرنگ ویژگی‌های استخراج‌شده در حالت بدون خطا و داده‌های قرمز رنگ ویژگی‌های استخراج‌شده در حالت وجود خطا در خط انتقال را نشان می‌دهند.

همان‌طور که از شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود، ویژگی استخراج‌شده از فاز دچار خطا با ویژگی استخراج‌شده از فاز سالم متناظر با حالات مختلف شبیه‌سازی شده با یکدیگر تداخل دارند؛ زیرا در بخش الف شکل‌های (۶) و (۷)، انرژی تا سطح ۲۵۰۰ میلیون ژول نمایش داده شده است و قسمت سبزرنگ به‌درستی قابل رؤیت نبوده،

استفاده خواهد شد. بنابراین ممکن است داده‌های انرژی هر فاز مربوط به دسته خطا در دسته داده‌های بدون 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، به مراتب باعث افزایش تداخل داده‌های حالت خطادار 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 هریک از فازها به فرمت LN است که در آن L بیانگر فاز (A, B و C) و N بیانگر مدار ۱ (مدار شامل TCSC) یا مدار ۲ (مدار فاقد TCSC) 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 هریک از فازها ارائه شده است. معیار تفکیک‌کنندگی، حداکثر اندازه انرژی داده‌ها در حالت سیستم بدون خطاست. به بیان دیگر، بیشترین مقدار انرژی متناظر با جریان‌های سه‌فاز، در هریک از خطوط در شرایط بدون خطا، به‌عنوان مرز جداکننده شرایط بدون خطا و شرایط خطادار

جدول (۵): درصد وجود ویژگی‌های حالت خطادار سیستم در ناحیه 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

بهترین الگوریتم برای طبقه‌بندی انتخاب می‌شود. درصد عملکرد هریک از الگوریتم‌ها در هریک از شش فاز، مطابق با جدول (۶) قابل مشاهده است. ردیف انتهایی این جدول برابر با میانگین

با توجه به تداخل داده‌ها، از سه نوع الگوریتم درخت تصمیم‌گیری، ماشین بردار پشتیبان و k- نزدیک‌ترین همسایه برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود و با مقایسه میان نتایج به‌دست‌آمده،

۳. مقایسه نتایج مطالعه با مقالات دیگر

در مرجع [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. شایان ذکر است که در مرجع [۱۴]، به دلیل شبیه‌سازی در خط انتقال تک‌مداره، تنها یازده نوع خطا را بررسی کرده است؛ اما در مقاله حاضر به دلیل وجود خط انتقال دومداره، علاوه بر خطاهای درون‌مداری، خطاهای بین‌مداری نیز بررسی شده که تعداد آن‌ها بالغ بر ۱۲۰ نوع است. همچنین در مقاله حاضر هریک از خطوط سیستم دومداره به صورت جداگانه بررسی شده است. همچنین در مرجع [۱۴]، کارایی روش در خطوط جبران‌سازی شده نیز ارزیابی نشده است.

روش ارائه شده در مرجع [۴]، به تشخیص و طبقه‌بندی خطا در خطوط انتقال دومداره در حضور TCSC پرداخته است. در مرجع [۴]، به‌طور پیش‌فرض با استفاده از موجک db4 انرژی سیگنال به‌عنوان ویژگی استخراجی محاسبه شده است؛ درحالی‌که در مقاله حاضر روش معینی برای انتخاب موجک مادر بهینه پیشنهاد شده است. به‌عبارت دیگر، اولین تفاوت میان مقاله حاضر و مرجع [۴]، انتخاب هوشمندانه موجک مادر است. تفاوت دیگر مربوط به بررسی انواع خطاهاست. در مقاله حاضر، انواع خطاهای درون‌مداری و بین‌مداری شبیه‌سازی شده، اما مقاله [۴] تنها ۱۰ نوع خطا را بررسی کرده است. تفاوت سوم، در نوع و نحوه طبقه‌بندی است. 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 الگوریتم طبقه‌بندی مقایسه شده و بهترین الگوریتم برای 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.

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

درصد صحت عملکرد الگوریتم طبقه‌بندی‌کننده است. با توجه به این نتایج، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بهترین عملکرد را داشته و به‌عنوان الگوریتم طبقه‌بندی‌کننده انتخاب می‌شود. این الگوریتم، داده‌ها را با میانگین ۹۴/۷۸٪ تفکیک کرده است؛ اما داده‌هایی را که به‌نادرستی تفکیک شده‌اند، می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ۱. داده‌های فاز آسیب‌ندیده خطادار؛ ۲. داده‌های فاز آسیب‌دیده سالم. درصد حضور هریک از این داده‌ها در دسته 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 دسی‌بل ارزیابی شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دقت طبقه‌بندی اندکی کاهش یافته ولی در سطح قابل قبولی است.

جدول (۶) درصد عملکرد صحیح هریک از الگوریتم‌ها در طبقه‌بندی

خطا در هریک از فازها

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

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

در روش پیشنهادی، زمان پردازش سیگنال و استخراج ویژگی حدود $1/1 \pm 0/1$ میلی‌ثانیه و زمان تصمیم‌گیری ماشین بردار پشتیبان به‌ازای یک ورودی تست جدید حدود $0/7 \pm 0/1$ میلی‌ثانیه به دست آمده است. با در نظر گرفتن حدود ۲۰٪ حاشیه اطمینان، روش پیشنهادی دارای زمان عملکردی حدود ۲/۴ میلی‌ثانیه است. مشخصات کامپیوتری که پردازش را اجرا کرده عبارت است از:

Core(TM) i5-8250U CPU@ 1.60 GHz. Intel(R)

۴. نتیجه‌گیری

موجک مادر db1 به‌عنوان مناسب‌ترین موجک انتخاب و انرژی‌بخش چهارم از ضرایب جزئیات سطح چهار سیگنال جریان، که بیشترین تغییرات را در لحظه 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٪ انجام داده است. شایان 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.

در این مقاله با استفاده از پنجره‌ای به‌طول 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 به‌خوبی انجام داد. در این مقاله، جست‌وجوی موجک مادر بهینه در سیستم انتقال دومداره شامل TCSC روی هر یک از مدارها به‌صورت جداگانه انجام شده است. در نهایت، برای استخراج بردار ویژگی،

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. and 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. and 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, Vol. 41, No. 2, pp. 120-130, 2021.
- [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] Jovcic, Dragan, and G. N. Pillai., "Analytical modeling of TCSC dynamics", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No.2, pp. 1097-1104, 2005.