

تخمین برخط مکان خطا در شبکه های توزیع مبتنی بر تئوری هوشمند ماشین بردار پشتیبان با استفاده از سیگنال های سراسری برخط

سهیل رنجبر^۱

۱- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه ولایت- ایرانشهر- ایران

s.ranjbar@velayat.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی برخط جدید به منظور آشکارسازی مکان خطا در شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده براساس تئوری ماشین های بردار پشتیبان ارائه می شود. برای این منظور، با استفاده از مدل سازی خط متوسط، ولتاژ و جریان توسط واحدهای اندازه گیری فازوری جمع آوری و ثبت می شوند و به صورت شاخص های مختلف پیشنهادی برای آموزش SVM مورد استفاده قرار می گیرند. در ادامه، طرح SVM پیشنهادی در محیط زمان واقعی پیاده سازی و با توجه به سناریوی خطای، مکان خطا به صورت برخط تخمین زده می شود. طرح پیشنهادی، روشی برخط و غیرمبتنی بر ماتریس امپدانس شبکه بوده به نحوی که در هر پنجره زمانی، با اندازه گیری سیگنال های فازوری و در ادامه محاسبه شاخص های پیشنهادی، مکان های خطا تخمین زده می شوند. به منظور آموزش و تسنن الگوریتم پیشنهادی، از یک شبکه آزمایشی استاندارد ۳۳ باسه IEEE حاوی منابع تولید پراکنده مورد استفاده قرار می گیرد و نمونه های آموزشی در پنجره های زمان پس از رفع خطا به صورت جفت داده ورودی-خروجی نمونه برداری و به منظور آموزش ماشین بردار پشتیبان استفاده می شوند. شاخص های پیشنهادی بر مبنای مقادیر برخط ولتاژ، جریان و فرکانس بوده و توسط شاخص های متنوع، عملکرد الگوریتم مورد تست قرار می گیرد. نتایج بدست آمده توانایی روش معرفی شده را در آشکارسازی مکان خطا بلافاصله پس از وقوع خطا نشان می دهد.

واژه های کلیدی: مکان یابی خطا، آشکارسازی، داده کاوی، ماشین های بردار پشتیبان

DOI: 10.61186/jiaeee.21.2.123

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

نام نویسنده ی مسئول: دکتر سهیل رنجبر

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - ایرانشهر - دانشگاه ولایت - دانشکده فنی و مهندسی

علائم و اختصارات

Z_X	امپدانس از پایانه باس مرجع تا مکان خطا
H	اِبرصفحه در SVM
Z_l	امپدانس توالی مثبت خطا
w	بردار نرمال در SVM عمود بر اِبر صفحه جدا کننده H
b	بایاس در SVM
I_X	جریان اندازه‌گیری شده در باس X
I_f	جریان خطا
I_y	جریان اندازه‌گیری شده در باس y
x_i و y_i	شاخص‌های مکان خطا در SVM
α_i	ضریب لاگرانژ در SVM
l	فاصله از باس X تا نقطه خطا
R_f	مقاومت خطا
Im	مولفه موهومی طول خط
V_X	ولتاژ اندازه‌گیری شده در باس X
V_y	ولتاژ اندازه‌گیری شده در باس y
V_f	ولتاژ خطا با در نظر گرفتن مقاومت خطا
$DU1$	نوسان ولتاژ در پنجره زمانی نخست
$DU2$	نوسان ولتاژ در پنجره زمانی دوم
$DU3$	نوسان ولتاژ در پنجره زمانی سوم
$DP1$	نوسان توان در پنجره زمانی نخست
$DP2$	نوسان توان در پنجره زمانی دوم
$DP3$	نوسان توان در پنجره زمانی سوم
$DVD1$	نوسان زاویه ولتاژ در پنجره زمانی نخست
$DVD2$	نوسان زاویه ولتاژ در پنجره زمانی دوم
$DVD3$	نوسان زاویه ولتاژ در پنجره زمانی سوم
$DUR1$	نوسان قسمت حقیقی ولتاژ در پنجره زمانی نخست
$DUR2$	نوسان قسمت حقیقی ولتاژ در پنجره زمانی دوم
$DUR3$	نوسان قسمت حقیقی ولتاژ در پنجره زمانی سوم
$DUI1$	نوسان قسمت موهومی ولتاژ در پنجره زمانی نخست
$DUI2$	نوسان قسمت موهومی ولتاژ در پنجره زمانی دوم
$DUI3$	نوسان قسمت موهومی ولتاژ در پنجره زمانی سوم
$DF1$	نوسان فرکانس در پنجره زمانی نخست
$DF2$	نوسان فرکانس در پنجره زمانی دوم
$DF3$	نوسان فرکانس در پنجره زمانی سوم
FD	نسبت نوسان فرکانس دو پنجره زمانی دوم و سوم
PD	نسبت نوسان توان دو پنجره زمانی دوم و سوم
VD	نسبت نوسان ولتاژ دو پنجره زمانی دوم و سوم
VDD	نسبت نوسان زاویه ولتاژ دو پنجره زمانی دوم و سوم
VID	نسبت نوسان قسمت موهومی ولتاژ دو پنجره زمانی دوم و سوم
VRD	نسبت نوسان قسمت حقیقی ولتاژ دو پنجره زمانی دوم و سوم

۱- مقدمه

سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی به دلیل گستردگی زیاد و تعدد تجهیزات در معرض انواع خطاهای اتصال کوتاه دائمی و گذرا هستند [۱]. در شبکه‌های توزیع فیدرهای خروجی پست‌های فوق توزیع مساحت زیادی را در بر گرفته و برخلاف شبکه‌های انتقال به صورت خط مستقیم نبوده و علاوه بر فیدر اصلی شامل شاخه‌های فرعی نیز می‌باشند. فیدرهای اصلی و شاخه‌های فرعی از تعداد زیادی بخش‌های توزیع که ممکن است خط هوایی یا کابل زیر زمینی با سطح مقطع‌ها و طول‌های مختلف باشند، تشکیل شده‌اند که این باعث بروز مشکلاتی در محلیابی دقیق خطا همچون تخمین چندین نقطه کاندید خطا در شبکه‌های توزیع گردد [۲].

۱-۱- انگیزه پژوهش

محلیابی دقیق و سریع بخش خطادار و تعمیر آن موجب بازیابی قسمت‌های بی‌برق سیستم شده و تا حدود زیادی انرژی توزیع نشده سیستم را کاهش می‌دهد و سبب افزایش رضایتمندی مصرف‌کنندگان و بالا رفتن درآمد شرکت‌های برق می‌شود. در حال حاضر پرسنل‌های تعمیر و بازیابی خطا از روش‌های مرسوم تجربی جهت محلیابی خطا در شبکه‌های توزیع استفاده می‌کنند که این امر بسیار زمان‌بر بوده و با هزینه بالایی انجام می‌شود.

در هنگام بروز یک اغتشاش در شبکه، پارامترهای مختلف شبکه از قبیل ولتاژ، جریان، زاویه، امپدانس تحت تاثیر این اغتشاش قرار گرفته و شروع به نوسان می‌کنند. اگر تجهیزات حفاظتی نتوانند بلافاصله خطا را تشخیص داده و عملکرد مناسبی داشته باشند ممکن است سیستم به سمت ناپایداری سوق پیدا کرده و پیامدهای ناگواری را برای مصرف‌کنندگان و همچنین شبکه توزیع به همراه داشته باشد.

۱-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

در حال حاضر تشخیص مکان خطا توسط رله‌های جریانی و یا دیستانس صورت می‌پذیرد. این نوع رله‌ها توانایی تشخیص خطا را در همه شرایط با دوره زمانی کوتاه دارا نیستند و در برخی موارد ممکن است به اشتباه تشخیص دهند. عملکرد اشتباه و یا عمل نکردن اشتباه هر دو می‌تواند پیامدهای سنگینی برای شبکه و مصرف‌کنندگان برق در برداشته باشد. بهره‌گیری از پارامترهایی که بتوانند رفتار و مکان خطا را در حداقل زمان ممکن تشخیص دهند می‌تواند در بررسی خطاهای احتمالی و جلوگیری از قطع ناخواسته مثرتر باشد [۲]. روشهای گوناگونی تاکنون به منظور آشکارسازی ماکن خطا ارائه شده است. در مرجع [۳]، جایابی خطا با حضور تولیدات پراکنده مورد

۳-۱- ضرورت انجام پژوهش مبتنی بر چالش‌های

پیشین

در روش‌های ارائه‌شده مکان‌یابی خطا، عمدتاً مدل خط کوتاه در نظر گرفته شده و همچنین مدل منابع تولید پراکنده آن نیز تنها دیزل ژنراتور سنکرون است. در مدل خط کوتاه، خازن‌های خطی در نظر گرفته نمی‌شوند در حالی‌که تأثیرات خازنی خط در زمینه مکان‌یابی خطا و در حالت‌های گذرا، مهم تلقی می‌شوند. همچنین، بیشتر روش‌ها از ماتریس امپدانس شبکه استفاده نموده و لذا وابستگی روش به مدل شبکه بسیار زیاد است. در صورتی‌که، شرایط بهره‌برداری و توپولوژیکی شبکه تغییر کند، باتوجه به تغییر امپدانس شبکه، روش‌های کارایی لازم را نخواهند داشت.

۴-۱- نوآوری و سهم اصلی مقاله

مطابق با کاستی‌های اشاره شده، در این مقاله روشی برخط به منظور فاصله‌یابی خطا در شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده مبتنی بر تئوری هوشمند ماشین‌بردار پشتیبان SVM ارائه می‌شود. برای این منظور، با استفاده از مدل‌سازی خط متوسط و خط بلند، ولتاژ و جریان شبکه در مکان‌های اتصال منابع تولید پراکنده و منابع ابتدای فیدر توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری جمع‌آوری و ثبت می‌شوند. سپس، مقادیر فازوری ولتاژ و جریان هر بخش از شبکه توزیع به صورت مجموعه‌ای از شاخص‌های مختلف پیشنهاد شده و برای آموزش SVM مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه، باتوجه به سناریوی خطای مختلف، مکان خطا به صورت برخط تخمین زده می‌شود. هدف طرح پیشنهادی، ارائه روشی کارآمد برای شناسایی نوع و مکان خطا بر مبنای روش‌های داده کاوی برای عملکرد برخط تجهیزات حفاظتی است. برای این منظور، طرح پیشنهادی، روشی برخط و غیرمبتنی بر ماتریس امپدانس شبکه بوده به نحوی‌که در هر پنجره زمانی، با اندازه‌گیری سیگنال‌های فازوری ولتاژ و جریان و در ادامه محاسبه شاخص-های پیشنهادی، مکان‌های خطا به صورت برخط شناسایی می‌شوند.

۵-۱- سازمان‌دهی و بخش‌بندی مقاله

ساختار مقاله به این صورت است، در بخش ۲، مدل‌سازی مکان خطا در حضور ماشین بردار پشتیبان ارائه می‌شود. بخش ۳، ساختار پیشنهادی شناسایی برخط خطا در شبکه توزیع و نحوه پیاده‌سازی آن در محیط زمان واقعی ارائه می‌شود. سپس، در بخش ۴، مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک شبکه توزیع نمونه همراه با منابع تولید پراکنده به منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی بررسی می‌شوند. در این بخش، مقایسه جامعی نیز میان دقت روش پیشنهادی با روش‌های گذشته انجام می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۶ ارائه می‌شود.

بررسی قرار گرفته است. در این مرجع طرح پیشنهادی ارائه شده با در نظر گرفتن دو قید مکان بهینه DG و کاهش انرژی از دست رفته (ENS) مورد بررسی قرار گرفته است و برای بررسی به شبکه عصبی جهت آموزش و تست داده شده است. در مرجع [۴]، از یک رویکرد ثبت داده‌ها برای تشخیص مکان خطا استفاده شده است. در این مرجع میزان جریان و ولتاژ ثبت شده در طول خط را در نظر گرفته و با محاسبه انحراف استاندارد در هر جایابی خطا سعی در بهینه کردن تشخیص مکان خطا شده است. در مرجع [۵]، از یک رویکرد تخمین مقاومت و مسافت خطا به منظور مکان‌یابی خطا استفاده شده است. در این مرجع با در نظر گرفتن میزان ولتاژ و جریان ابتدا و انتهای خط خطا زده شده در زمانهای پیش از رخداد خطا و در طول خطا و همچنین امپدانس شبکه در یک معادله مبتنی بر ماتریس به محاسبه ولتاژ و جریان در مکان خطا پرداخته شده است. در مرجع [۶]، به بررسی جایابی خطا در حضور منابع تولید پراکنده به کمک شبکه عصبی MLP پرداخته شده است. در مرجع [۷]، توسط فاکتوری به نام فاکتور توالی منفی (F2) انواع مختلف خطا کلاس‌بندی شده است. فاکتور توالی منفی از طریق جریان‌های اندازه‌گیری شده توالی صفر و منفی در زمانهای قبل و بعد از وقوع خطا بدست می‌آید. برای نشان دادن تأثیر این فاکتور از ۲ شبکه عصبی جلو رونده (forward-feed) در یک لایه مخفی استفاده شده است. در مرجع [۸]، انواع خطا در تمام شین‌ها شبیه‌سازی و در پایگاه داده ذخیره شده است. با در نظر گرفتن یک شین به عنوان شین مبنا با استفاده از افت ولتاژ اندازه‌گیری شده در این شین در زمان خطا و تطبیق آن با افت ولتاژهای ذخیره شده در پایگاه داده‌ها، بخش‌هایی که امکان وقوع خطا در آن وجود دارد انتخاب می‌شود و با اندازه‌گیری فاصله بین افت ولتاژ اندازه‌گیری شده در شین مبنا در زمان خطا با افت ولتاژ بخش‌های انتخابی و بدست آوردن کوتاهترین فاصله، قسمتی که خطا در آن رخ داده شناسایی شده است.

دیگر روش‌ها در زمینه شناسایی مکان خطا در شبکه‌های شامل روش امپدانس با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان ثبت شده در ابتدای فیدر و ترمینال واحدهای تولید پراکنده [۹]، ناحیه‌بندی خطا براساس الگوی جریانی و امپدانس خطا [۱۰]، تغییرات جریان خطای ثبت شده در هر ناحیه و ثبت بیشترین اختلاف جریانی [۱۱]، شبکه عصبی [۱۲]، تحلیل فوریه [۱۳]، الگوریتم ژنتیک [۱۴]، اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در حضور منابع تولید پراکنده با مدل‌سازی خط توزیع کوتاه و خطای تک‌فاز به زمین [۱۵]، شبکه عصبی پایه شعاعی RBFN [۱۶]، روش امپدانس براساس تغییر ولتاژ دو مرحله‌ای [۱۷]، اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه در باس منبع با استفاده از تغذیه رو به جلو شبکه عصبی برای شبکه توزیع نامتعادل شعاعی [۱۸]، اندازه‌گیری منابع در ایستگاه برق و منبع تولید پراکنده با بار متغیر [۱۹] و تبدیل موجک [۲۰] هستند.

جریان در فازهای غیر خطا دار بستگی داشته و با خطای اندازه‌گیری همراه است [۳].

۲-۲ تشکیل بردارهای پشتیبان مکان خطا با استفاده از نمونه‌های آموزشی خطا در شبکه توزیع

تئوری ماشین‌های بردار پشتیبان جزو الگوریتم‌های تشخیص الگو دسته بندی می‌شود و در هر جایی که نیاز به تشخیص الگو یا دسته بندی یکسری داده در کلاس‌های خاص باشد می‌توان استفاده کرد. این روش تا کنون در حوزه‌های متعددی مثل دسته بندی متون، شناسایی گفتار، داده کاوی و... به کار گرفته شده است. نتایج بدست آمده از تئوری SVM نشان داده شده است که نسبت به بسیاری روش‌های متعارف داده کاوی، SVM دارای برتری است. به منظور تشریح تئوری SVM در مکان‌یابی خطا، تعدادی از بردارها نشان دهنده شاخص شناسایی مکان خطا به صورت $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\}$ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، هر کدام از شاخص‌ها دارای یک ویژگی d بعدی بوده و دارای برجسب y_i در بازه و $y_i \in \{1, -1\}$ هستند. هدف SVM در این قسمت بر حل یک مسئله چند هدفه شامل مکان-های مختلف خطا، به صورت بهینه است. برای دستیابی به این هدف، SVM ابرصفحه‌ی ترسمی نموده به نحوی که مجموعه نمونه‌های خطا و توابع هدف متناظر به عنوان بردارهای آموزش دهنده در کلاس‌های مختلف مکان خطا، به صورت صفحه‌های جداکننده مطابق با شکل (۲) در نظر گرفته می‌شوند. برای این منظور، مجموعه‌ی N تایی از مکان خطا به عنوان نمونه‌های آموزشی به صورت ذیل مدل سازی می‌شود:

$$D = \{(x_i, y_i) \mid x_i \in R, y_i \in \{1, -1\}\}; i=1, n \quad (5)$$

به منظور آن که بتوانیم توابع هدف مجموعه را از یکدیگر تمیز دهیم، این دو کلاس با تابع هدف $f(x)$ و با یک ابر صفحه H مطابق با (۶) محیط SVM مدل سازی می‌شود.

$$H: w.x - b = 0 \quad (6)$$

در (۶)، $w.x$ نیز حاصل ضرب داخلی دو بردار هستند. در طرح پیشنهادی، ضرایب w و b طوری انتخاب می‌شوند تا حاشیه میان ابرصفحه‌های موازی، ماکزیمم شده و ابرصفحه‌ها تا حد امکان از هم دور بوده و بتوانند نمونه‌های آموزشی را نیز از یکدیگر به خوبی جدا کنند. به این دو بردار جداکننده نمونه‌ها، بردارهای پشتیبان اطلاق شده و در شکل (۲) در دو موقعیت $+1$ و -1 به عنوان شاخص‌های مرزی ابرصفحه به صورت ذیل نشان داده شده‌اند:

$$H_1: w.x - b = +1 \quad (7)$$

$$H_2: w.x - b = -1 \quad (8)$$

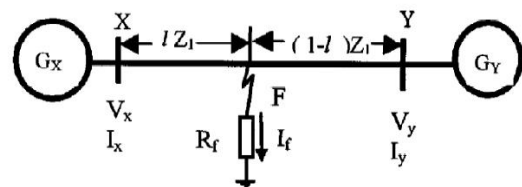
مطابق شکل (۲)، نمونه‌های آموزشی قرار گرفته بر روی شاخص‌های پیشنهادی H_1 یا H_2 بردار پشتیبان مورد نظر را تشکیل می‌دهند.

۲- مفهوم مکان‌یابی خطا با استفاده از الگوریتم داده کاوی ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)

در این فصل به بررسی و مدل سازی مکان‌یابی خطا تحت یک شبکه نمونه و سپس توانایی روش‌های داده کاوری از قبیل SVM در شناسایی صحیح مکان خطا پرداخته می‌شود.

۲-۱ مدل سازی مکان خطا در شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده

برای این منظور، دیاگرام تک خطی شبکه توزیع نشان داده شده در شکل (۱) همراه با منابع تولید پراکنده و یک فیدر توزیع در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۱): شبکه توزیع خطا دار با منابع تولید پراکنده [۱].

مطابق با شکل، شبکه به ازای اعمال خطا دو بخش x و y با منابع معادل در هر بخش نمایش داده می‌شود. به منظور اندازه گیری خطا، باس x به عنوان باس مرجع برای نصب ثبات‌ها و باس y نیز به عنوان باس دورتر یا باس دوم است. به ازای اعمال خطا، ولتاژ نقطه x در طول دوره خطا برابر است با [۲]:

$$V_x = l Z_l I_x + V_f \quad (1)$$

معادله خطا (۱) را با در نظر گرفتن امپدانس خطا می‌توان به صورت (۲) بازنویسی نمود [۲]:

$$V_x = l Z_l I_x + R_f I_f \quad (2)$$

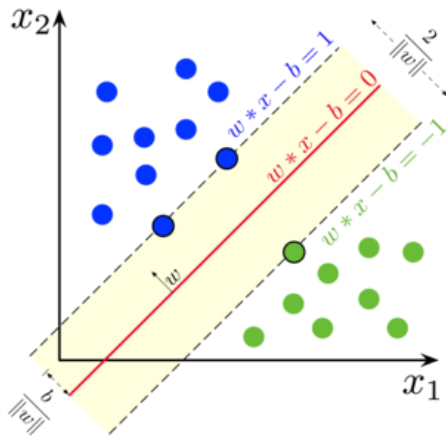
با در نظر گرفتن مقادیر موهومی (۲)، می‌توان طول خط را به صورت زیر به دست آورد [۲]:

$$l = \frac{\operatorname{im}\left(\frac{V_x}{I_x}\right) - \operatorname{im}\left(\frac{R_f I_f}{I_x}\right)}{\operatorname{im}(Z_l)} \quad (3)$$

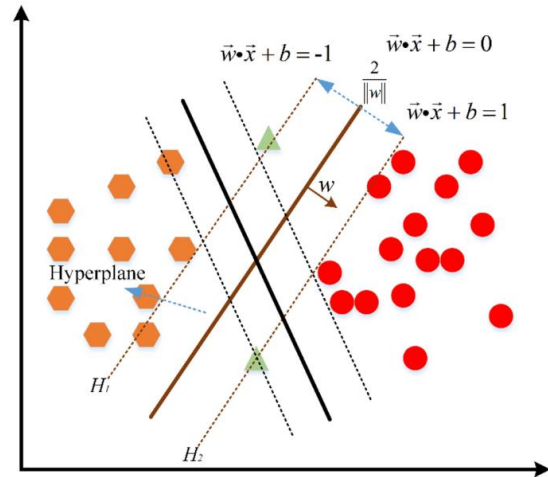
در صورتی که اختلاف فاز میان I_x و I_f کم باشد می‌توان (۳) را به صورت ذیل نوشت [۲]:

$$l = \frac{\operatorname{im}\left(\frac{V_x}{I_x}\right)}{\operatorname{im}(Z_l)} = \frac{\operatorname{im}(Z_x)}{\operatorname{im}(Z_l)} \quad (4)$$

روش مکان‌یابی خطا بر مبنای (۴) تحت عنوان الگوریتم راکتانسی شناخته می‌شود. در مواقعی که تفاوت فاز میان I_x و I_f قابل صرف نظر کردن نباشد، تخمین محل خطا به روش فوق به پارامترهایی نظیر پخش بار قبل از خطا، تغذیه از باس دورتر (باس y)، مقاومت خطا،



شکل (۳): بردارهای پشتیبان SVM مبتنی بر شاخص‌های پیشنهادی مکان‌یابی خطا



شکل (۲): ابرصفحه جداساز SVM برای شناسایی مکان خطا

در شکل (۳)، هنگامی که ماکزیمم حاشیه ابرصفحه پیدا شد، آن دسته از نمونه‌هایی که نزدیکترین فاصله را با ابر صفحه دارند و $\alpha_i > 0$ به عنوان نمونه‌های تشکیل‌دهنده بردارهای پشتیبان نامیده شده و جزو المانهای مهم نمونه‌های آموزشی هستند. بقیه نمونه‌ها دارای $\alpha_i = 0$ هستند، به این معنا که اگر بقیه نمونه‌های آموزشی حذف شده و آموزش SVM مجدداً تکرار شود، همان ابر صفحه بدست خواهد آمد. همان گونه که مشخص است، با آموزش صحیح و شکل‌گیری بردارهای پشتیبان متناسب با نمونه‌های آموزشی خطا، می‌توان از الگوریتم هوشمند پیشنهادی SVM به منظور شناسایی برخط مکان خطا استفاده نمود.

هم چنین، ناحیه میان دو ابرصفحه را ناحیه مرزی می‌گویند. در صورت امکان جداسازی خطی نمونه‌های آموزشی، دو صفحه می‌توانند طوری قرار گیرند تا هیچ نمونه آموزشی میان دو شاخص برداری قرار نداشته باشند (دقت ۱۰۰٪ باشد). در ادامه، سعی می‌شود فاصله میان دو صفحه ماکزیمم شود. برای این منظور، طراحی ابرصفحه‌ها به صورت یک مسئله بهینه‌سازی با هدف دستیابی به بیشترین عرض ناحیه مرزی، حل می‌شود. به منظور جلوگیری از قرار گرفتن نمونه‌ها در حاشیه میان دو ابر صفحه، محدودیتی مطابق با (۹) و (۱۰) برای هر شاخص پیشنهادی i در نظر گرفته می‌شود:

$$w \cdot x - b \geq 1 \quad \forall x_i \text{ With } y_i = 1 \quad (9)$$

$$w \cdot x - b \leq -1 \quad \forall x_i \text{ with } y_i = -1 \quad (10)$$

معادلات (۹) و (۱۰) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\text{Maximize}_{w,b} \left(\frac{2}{\|w\|} \right) \quad (11)$$

$$\text{Subject to: } y_i (w \cdot x_i - b) \geq 1 \text{ for } i = 1, 2, \dots, N$$

همان طور که مشخص است، به منظور بهینه‌سازی تابع هدف (۱۱)، میزان $\|w\|$ می‌بایست مطابق با (۱۲) کمینه شود.

$$\text{minimize}_{w,b} \left(\frac{\|w\|}{2} \right) \quad (12)$$

می‌توان (۱۲) را با استفاده از ضرایب نامنفی لاگرانژ به صورت (۱۳) بازنویسی نمود.

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i (w \cdot x_i - b) - 1] \right\} \quad (13)$$

مطابق با (۱۳)، هر کدام از α_i متناظر با یکی از نمونه‌های آموزشی خطا x_i بوده و نمونه متناظر با ضریب $\alpha_i > 0$ به عنوان بردارهای پشتیبان مطابق با شکل (۳) نامیده می‌شوند.

۳- ساختار طرح حفاظتی پیشنهادی هوشمند مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان

مراحل به کارگیری روش پیشنهادی SVM به منظور آشکارسازی مکان خطا در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۴)، مراحل مختلف طرح حفاظتی پیشنهادی به صورت تعریف می‌شود. مرحله نخست: در این مرحله تمامی سناریوهای ممکن بر روی شبکه توزیع نمونه با پتانسیل شکل‌گیری شرایط نوسانی از قبیل وقوع اتصال کوتاه در نقاط مختلف شبکه در زمان‌های مختلف خطا انجام می‌شود. مرحله دوم: به ازای هر سناریوی خطای اتصال کوتاه در شبکه، مقادیر فازور ولتاژ و جریان به دست آمده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری جمع‌آوری شده و تحت عنوان نمونه‌های آموزشی به منظور آشکارسازی مکان خطا، در یک پایگاه داده ذخیره سازی می‌شوند. این مرحله تا به آن جا ادامه می‌یابد تا تمامی حالات مختلف شامل نوع و مکان خطا بر روی شبکه توزیع نمونه، شبیه‌سازی شوند.

مرحله سوم: مطابق با هر سناریوی خطا و شاخص‌های پیشنهادی محاسبه شده و تحت عنوان یک سری جفت داده ورودی (شاخص) - خروجی (مکان خطا) تولید و در پایگاه داده برای آموزش SVM ذخیره می‌شوند.

۴- مطالعات شبیه‌سازی

در این بخش، طرح پیشنهادی شناسایی مکان خطا بر روی یک سیستم توزیع شامل منابع تولید پراکنده شبیه‌سازی شده و عملکرد SVM در شناسایی برخط مکان خطا در محیط زمان واقعی ارزیابی می‌شود.

۴-۱- معرفی شبکه توزیع نمونه

به منظور مکان یابی خطا، از یک شبکه آزمایشی استاندارد ۳۳ باسه IEEE استفاده شده و در نرم افزار DigSILENT که یک نرم افزار قدرتمند در تحلیل داده های خطا می باشد، طراحی می‌شود. نمایی از دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۵)، شبکه مورد نظر یک شبکه توزیع با سطح ولتاژ ۱۱ کیلو ولت است که از یک سمت به سطح ولتاژ بالاتر (فشار متوسط) ۳۳ کیلو ولت متصل شده است. سمت فشار متوسط شبکه (۳۳ کیلو ولت) و به منظور در نظر گرفتن تاثیر نوسانات دینامیکی شبکه و مدل نمودن آن در مکان یابی خطا از یک ژنراتور سنکرون با H بالا استفاده نموده ایم. اطلاعات کامل دینامیکی شبکه شامل امپدانس خطوط، بارها و منابع تولید پراکنده در [۱۹] آورده شده است.

۴-۲- تولید نمونه آموزشی

به منظور اجرای شبیه سازی و استخراج داده، خطاها بر روی تمام خطوط و در ۵ نقطه از هر خط انجام شده است. به منظور ارزیابی بهتر، نمونه برداری فازوری از ولتاژ و جریان باس‌های ژنراتوری در زمان‌های مختلف شامل ۱۰ میلی ثانیه قبل و بعد از خطا، ۱۵ میلی ثانیه پس از خطا و ۲۰ میلی ثانیه پس از خطا دریافت شده است. همچنین، شبکه تحت پنج سطوح بار مختلف شامل ۰/۵ p.u.، ۱ p.u.، ۱/۵ p.u.، ۲ p.u. و ۲/۵ p.u. قرار گرفته و خطاهای مختلف شامل تک‌فاز به زمین، دوفاز به هم و سه‌فاز به زمین در سه بازه زمانی مختلف شبیه‌سازی شده‌اند. با در نظر گرفتن تمامی حالت‌های مورد اشاره خطا، در نهایت تعداد ۳۳۲۵ جفت داده ورودی (شاخص) - خروجی (مکان خطا) استخراج شده و در پایگاه داده برای آموزش SVM مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، تعداد ۱۶۶۲ جفت داده (برابر با ۵۰/۵٪ از کل نمونه‌ها) مربوط به خطاهای تک‌فاز به زمین، ۹۹۸ جفت داده (برابر با ۳۱٪ از کل نمونه‌ها) مربوط به خطاهای دوفاز به هم و ۶۶۵ جفت داده (۲۰٪ از کل نمونه‌ها) مربوط به خطاهای سه‌فاز به زمین هستند. از این بین یکسری جفت داده به منظور آموزش SVM تولید شده و الگوریتم تحت این داده ها مورد آموزش قرار می گیرند.

قابل توجه است، به‌منظور تولید نمونه‌های آموزشی، با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری نصب‌شده بر روی باس‌های ژنراتوری شبکه و ذخیره‌سازی اطلاعات در یک پایگاه داده، نمونه‌های آموزشی جمع‌آوری می‌شوند. برای این منظور، در هر

مرحله چهارم: در این مرحله و با استفاده از نمونه‌های آموزشی، الگوریتم SVM مورد آموزش قرار می‌گیرد به‌طوری‌که نمونه‌های آموزشی با استفاده از محاسبه بردارهای پشتیبان و در هر مرحله طبقه‌بندی می‌شوند. در این قسمت، هر شاخص معادل تشکیل یک صفحه جداساز و طبقه بندی نمودن یکسری از نمونه‌های آموزشی است و در صورتی که نمونه‌ها به‌درستی آموزش داده شوند، تابع هدف بهینه‌سازی (۱۱) و (۱۲)، بردارهای پشتیبان مناسب‌تری را شناسایی نموده و دقت جداسازی مجموعه آموزشی افزایش می‌یابد. در نهایت و پس از آنکه مسیر بهینه با استفاده از بردارهای پشتیبان محاسبه شد، داده ها در کلاس‌های مختلف به‌عنوان مکان خطا، طبقه‌بندی می‌شوند.



شکل (۴): فلوچارت طرح حفاظتی هوشمند SVM.

مرحله پنجم: در محیط برخط، رله حفاظتی مبتنی بر ماشین SVM بر روی سیستم توزیع نمونه پیاده‌سازی شده و با توجه سناریوهای خطا و اندازه‌گیری شاخص‌های پیشنهادی، مکان خطا تخمین زده می‌شود.

$$PD = (DP3) / (DP2)$$

$$DVD1 = \frac{\text{Voltage Degree at}(0.01) - \text{Voltage Degree}(-0.01)}{0.01 - (-0.01)}$$

$$DVD2 = \frac{\text{Voltage Degree at}(0.015) - \text{Voltage Degree}(0.01)}{0.015 - 0.01}$$

$$DVD3 = \frac{\text{Voltage Degree at}(0.0218) - \text{Voltage Degree}(0.015)}{0.0218 - 0.015}$$

$$VDD = \frac{DVD3}{DVD2}$$

$$DUR1 = \frac{\text{Voltage Real Part at}(0.01) - \text{Voltage Real Part at}(-0.01)}{0.01 - (-0.01)}$$

$$DUR2 = \frac{\text{Voltage Real Part at}(0.015) - \text{Voltage Real Part at}(0.01)}{0.015 - 0.01}$$

$$DUR3 = \frac{\text{Voltage Real Part at}(0.0218) - \text{Voltage Real Part at}(0.015)}{0.0218 - 0.015}$$

$$VRD = (DUR3) / (DUR2)$$

$$DUI1 = \frac{\text{Voltage Image Part at}(0.01) - \text{Voltage Image Part at}(-0.01)}{0.01 - (-0.01)}$$

$$DUI2 = \frac{\text{Voltage Image Part at}(0.015) - \text{Voltage Image Part at}(0.01)}{0.015 - 0.01}$$

$$DUI3 = \frac{\text{Voltage Image Part at}(0.0218) - \text{Voltage Image Part at}(0.015)}{0.0218 - 0.015}$$

$$VID = (DUI3) / (DUI2)$$

$$DF1 = \frac{\text{Frequency at}(0.01) - \text{Frequency at}(-0.01)}{0.01 - (-0.01)}$$

$$DF2 = \frac{\text{Frequency at}(0.015) - \text{Frequency at}(0.01)}{0.015 - 0.01}$$

$$DF3 = \frac{\text{Frequency at}(0.0218) - \text{Frequency at}(0.015)}{0.0218 - 0.015}$$

$$FD = (DF3) / (DF2)$$

پنجره زمانی ۱۰ میلی ثانیه، اطلاعات فازوری شبکه شامل فازور ولتاژ و جریان شبکه، اندازه‌گیری و تحت شاخص‌های پیشنهادی به‌منظور شناسایی مکان خطا، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۴- انتخاب شاخص‌های پیشنهادی

برای معرفی شاخص پیشنهادی به عنوان معیار موثر جهت آشکارسازی مکان خطا، باتوجه به آن‌که طرح پیشنهادی، روشی برخط و مبتنی بر سیگنال‌های اندازه‌گیری فازوری است، لذا با اندازه‌گیری فازورهای ولتاژ و جریان طی سه پنجره زمانی نخست پس از رفع خطا، شاخص‌های پیشنهادی اندازه‌گیری و محاسبه می‌شوند. برای این منظور با استفاده از اطلاعات فازوری برخط، پارامترهای متنوعی از شبکه از جمله ولتاژ، توان راکتیو، توان اکتیو، زاویه ولتاژ، فرکانس مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته و در نهایت شاخص‌های موثر در آشکارسازی مکان یابی خطا برای آموزش و تست الگوریتم معرفی می‌شوند. شاخص‌های پیشنهادی به منظور آموزش و تست SVM عبارتند از:

$$DU1 = \frac{\text{Voltage Mag at}(0.01) - \text{Voltage Mag at}(-0.01)}{0.01 - (-0.01)}$$

$$DU2 = \frac{\text{Voltage Mag at}(0.015) - \text{Voltage Mag at}(0.01)}{0.015 - 0.01}$$

$$DU3 = \frac{\text{Voltage Mag at}(0.0218) - \text{Voltage Mag at}(0.015)}{0.015 - 0.01}$$

$$VD = (DU3) / (DU2)$$

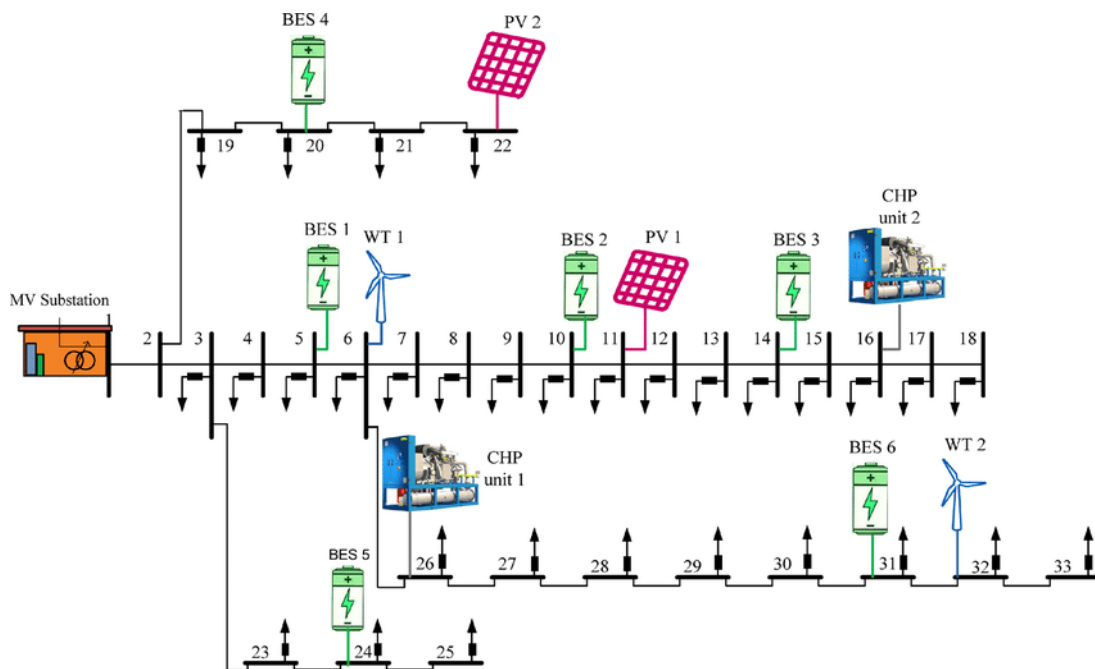
$$DP1 = \frac{\text{Power at}(0.01) - \text{Power at}(-0.01)}{0.01 - (-0.01)}$$

$$DP2 = \frac{\text{Power at}(0.015) - \text{Power at}(0.01)}{0.015 - 0.01}$$

$$DP3 = \frac{\text{Power at}(0.0218) - \text{Power at}(0.015)}{0.0218 - 0.015}$$

۴-۴- نتایج شناسایی طرح حفاظتی SVM

به منظور بررسی توانایی SVM در آشکارسازی مکان خطا، ویژگی



شکل (۵): شبکه ۳۳ باسه تحت آزمون

جدول (۲): بهترین دقت SVM به ازای دو شاخص

دقت (%)	ویژگی	گروه
۹۲/۷۱	VDD + DUR2	۱
۷۴/۲۹	Group 1 + FD	۲
۷۵/۷۱	Group 1 + DF3	۳
۷۷/۱۴	Group 1 + DF2	۴
۷۵/۷۱	Group 1 + DF1	۵
۷۵/۷۱	Group 1 + PD	۶
۷۲/۸۶	Group 1 + DP3	۷
۷۷/۱۴	Group 1 + DP2	۸
۷۸/۵۷	Group 1 + DP1	۹
۹۲/۸۶	Group 1 + VD	۱۰
۷۵/۷۱	Group 1 + DU3	۱۱
۷۴/۲۹	Group 1 + DU2	۱۲
۷۴/۲۹	Group 1 + DU1	۱۳
۷۵/۷۱	Group 1 + DVD3	۱۴
۷۵/۷۱	Group 1 + DVD2	۱۵
۷۴/۲۹	Group 1 + DVD1	۱۶
۷۵/۷۱	Group 1 + VID	۱۷
۷۲/۸۶	Group 1 + DUI3	۱۸
۸۰	Group 1 + DUI2	۱۹
۷۷/۱۴	Group 1 + DU1	۲۰
۹۲/۸۶	Group 1 + VRD	۲۱
۷۵/۷۱	Group 1 + DUR3	۲۲
۷۲/۸۶	Group 1 + DUR1	۲۳

مطابق با جدول (۲)، به ازای دو شاخص VDD و DUR2، الگوریتم به نرخ دقت ۹۲/۸۶٪ دست یافته است. همچنین، دقت‌های بدست آمده به ازای چهار ویژگی در جدول (۳) نشان می‌دهد، با افزایش ورودی، دقت طبقه‌بندی SVM افزایش یافته به نحوی که به بالاترین دقت خود با سه ویژگی دست پیدا کرده است. ویژگی‌های موثر عبارتند از VD برابر میزان انحراف ولتاژ و VRD برابر میزان انحراف کل قسمت حقیقی ولتاژ هستند. در ادامه، روند ترکیب ویژگی‌ها ادامه یافته و در هر قسمت بهترین ترکیب معرفی می‌شود. نتایج حاصل از دقت‌های مختلف به ازای ترکیب چهار ویژگی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۳): بهترین دقت SVM به ازای چهار ویژگی

دقت (%)	ویژگی	گروه
۹۷/۸۶	VDD + DUR2+VD	۱
۸۰	Group 1 + FD	۲
۷۸/۵۷	Group 1 + DF3	۳
۸۴/۲۹	Group 1 + DF2	۴
۷۸/۵۷	Group 1 + DF1	۵

معرفی شده در گروه‌های مختلف بعنوان پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور در ابتدا، هر ویژگی بطور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته تا مهمترین ویژگی در آشکار سازی مکان خطا مشخص گردد. میزان دقت و نتایج بدست آمده از طبقه بندی های SVM به ازای ورودی های مختلف در جدول (۱) آورده شده است. مطابق با جدول (۱)، در حالتی که تنها یک ویژگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، SVM توانسته حداکثر به نرخ دقت ۸۵/۷۱٪ دست پیدا کند. در این زمینه، شاخص VDD به عنوان موثرترین شاخص تنها معرفی می‌شود. از نتیجه بدست آمده در این قسمت می‌توان اینطور برداشت کرد که پارامتر ولتاژی یک پارامتر موثر در ارزیابی مکان خطا می‌باشد اگرچه الگوریتم هنوز به نرخ دقت قابل قبولی دست نیافته است اما می‌توان در ادامه از این ویژگی‌ها همراه با ترکیبات دیگر از ورودی در طبقه بندی داده استفاده کرد.

جدول (۱): نتایج SVM به ازای یک شاخص تنها

دقت (%)	ویژگی	گروه
۵۱/۴۳	DUI	۱
۵۱/۴۳	DU2	۲
۵۰	DU3	۳
۴۰	VD	۴
۴۲/۸۶	DP1	۵
۴۵/۷۱	DP2	۶
۵۲/۸۶	DP3	۷
۲۴/۲۹	PD	۸
۴۵/۷۱	DVD1	۹
۴۵/۷۱	DVD2	۱۰
۵۱/۴۳	DVD3	۱۱
۸۵/۷۱	VDD	۱۲
۵۲/۸۶	DUR1	۱۳
۵۴/۲۹	DUR2	۱۴
۵۱/۴۳	DUR3	۱۵
۳۵/۷۱	VRD	۱۶
۴۵/۷۱	DUI1	۱۷
۴۲/۸۶	DUI2	۱۸
۴۴/۲۹	DUI3	۱۹
---	VID	۲۰
۴۲/۸۶	DF1	۲۱
۴۲/۸۶	DF2	۲۲
۳۸/۵۷	DF3	۲۳
۲۷/۱۴	FD	۲۴

در ادامه، دو ویژگی با بالاترین نرخ دقت شناسایی و به عنوان ورودی به SVM مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور، دو ویژگی VDD و DUR2 با دارا بودن بیشترین نرخ دقت معرفی شده و نتایج طبقه بندی با دیگر شاخص‌ها به صورت جدول (۲) آورده شده است.

DUI2: تغییرات قسمت موهومی ولتاژ در زمان ۱۵ و ۱۰ میلی ثانیه
 DF2: میزان تغییرات فرکانس در زمان ۱۵ و ۱۰ میلی ثانیه
 مشاهده می شود، از پنج شاخص معرفی شده، چهار شاخص مربوط به ولتاژ و یک شاخص فرکانس شبکه است. لذا، شاخص ولتاژ به عنوان موثرترین شاخص معرفی توانسته دقت را تا ۸۵/۷۱٪ افزایش دهد.

۴-۵- مطالعه حساسیت SVM به پارامترهای مختلف شبکه

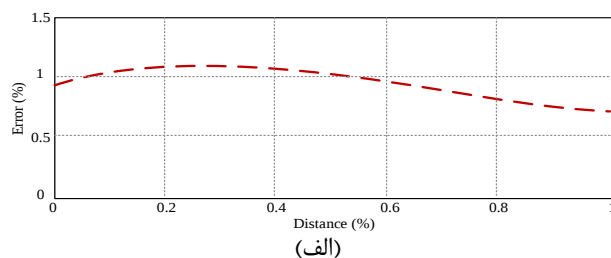
در این بخش حساسیت تصمیم‌گیری SVM به برخی از پارامترهای توپولوژیکی و الکتریکی شبکه مطابق با جدول (۶) ارزیابی می‌شود.

جدول (۶): پارامترهای ارزیابی در مطالعه حساسیت SVM

حساسیت پارامتر	توالی اندازه‌گیری	تعداد سناریو ارزیابی
مسافت خط	۰ الی ۱۰۰ درصد خط	۱۱۵
سطح بار	۰ p.u. الی ۲ p.u.	۱۲۵
گسترده‌ی توپولوژی شبکه	۶۰ الی ۱۶۰ درصد	۲۱۹
مقاومت خطا	۰ اهم الی ۱/۱ اهم	۶۷
جریان خطا	۰/۴ الی ۲/۴ کیلوآمپر	۳۴۶
فرکانس نمونه‌برداری	۱۰ الی ۱۱۰ میلی ثانیه	۴۵۵

مطابق با جدول (۶)، شش شاخصه مختلف شامل پارامترهای توپولوژیکی (مسافت خط، سطح بار و گسترده‌ی شبکه) و پارامترهای الکتریکی (مقاومت خطا، جریان خطا و فرکانس نمونه‌برداری خطا) شبکه در نظر گرفته می‌شود و تحت سناریوهای متعدد خطا، حساسیت SVM نسبت به هر پارامتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت SVM به‌ازای پارامترهای مختلف شبکه در شکل (۶ الف-ج) نشان داده شده است.

مطابق با شکل (۶)، ملاحظه می‌شود حساسیت SVM نسبت به پارامترهای شبکه متفاوت بوده و به‌ازای تغییر شرایط الکتریکی و توپولوژیکی شبکه، دقت SVM با درصد کمی خطا همراه است. در این زمینه، کمترین درصد خطا مرتبط با تغییرات مقاومت خطا، (شکل ۶-ت) به میزان ۰/۷۵ درصد خطا و بیشترین درصد خطا مرتبط با تغییر فرکانس نمونه‌برداری (شکل ۶-ج) با خطای حداکثر ۶ درصد هستند.



۶	Group 1 + PD	۸۲/۸۶
۷	Group 1 + DP3	۸۰
۸	Group 1 + DP2	۸۲/۸۶
۹	Group 1 + DP1	۸۲/۸۶
۱۰	Group 1 + DU3	۸۰
۱۱	Group 1 + DU2	۸۰
۱۲	Group 1 + DU1	۸۰
۱۳	Group 1 + DVD3	۷۸/۵۷
۱۴	Group 1 + DVD2	۷۸/۵۷
۱۵	Group 1 + DVD1	۷۸/۵۷
۱۶	Group 1 + VID	۸۲/۸۶
۱۷	Group 1 + DUI3	۸۲/۸۶
۱۸	Group 1 + DUI2	۹۷/۷۱
۱۹	Group 1 + DUI1	۸۴/۲۹
۲۰	Group 1 + VRD	۸۱/۴۳
۲۱	Group 1 + DUR3	۸۱/۴۳
۲۲	Group 1 + DUR1	۸۰

جدول (۴): بهترین دقت SVM به ازای ۶ ویژگی

گروه	ویژگی	دقت (%)
۱	VDD+DUR2+VD+DUI2+DF2	۹۹/۱۴
۲	Group 1 + FD	۹۹/۱۴
۳	Group 1 + PD	۸۵/۷۱
۴	Group 1 + DP2	۹۹/۱۴
۵	Group 1 + DP1	۹۹/۱۴
۶	Group 1 + DU3	۸۴/۲۹
۷	Group 1 + VID	۹۹/۱۴
۸	Group 1 + DUI3	۸۴/۲۹
۹	Group 1 + DUR3	۸۴/۲۹

مطابق با جدول (۴)، شاخص DUI2 توانسته بیشترین تاثیرگذاری افزایش نرخ دقت به میزان ۸۵/۷۱٪ و در مجموع به میزان ۹۹/۱۴٪ داشته و به عنوان چهارمین ویژگی تاثیرگذار معرفی می‌شود. در طبقه بندی بر پایه روشهای داده کاوی، افزایش تعداد ویژگی ممکن است موجب افزایش نرخ دقت نگردد و حتی در برخی موارد موجب کاهش نرخ دقت نیز شود. در این موارد افزایش تعداد ویژگی موجب ورود نویز به داخل الگوریتم گشته و نرخ دقت آن را کاهش میدهد. مطابق با جدول (۴)، در این قسمت الگوریتم SVM توانسته حداکثر به نرخ دقت ۹۹/۱۴٪ دست پیدا کند. مطابق با جدول (۴)، بهترین حالت با در نظر گرفتن ۵ ویژگی بدست آمده است که این پنج ویژگی مطابق با پارامترهای ذیل معرفی می شوند.

VDD: میزان انحراف زاویه ولتاژ از میزان اولیه

DUR2: تغییرات قسمت حقیقی ولتاژ در زمان ۱۵ و ۱۰ میلی ثانیه

VD: میزان انحراف دامنه ولتاژ از مقدار اولیه

۴-۶- مقایسه طرح پیشنهادی SVM با روش‌های گذشته

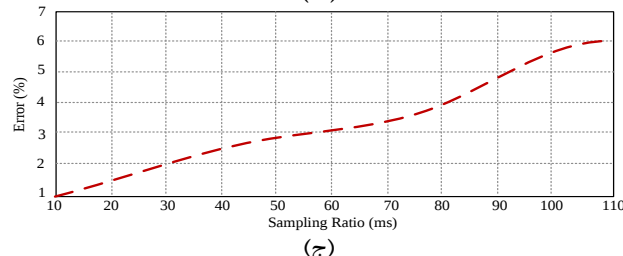
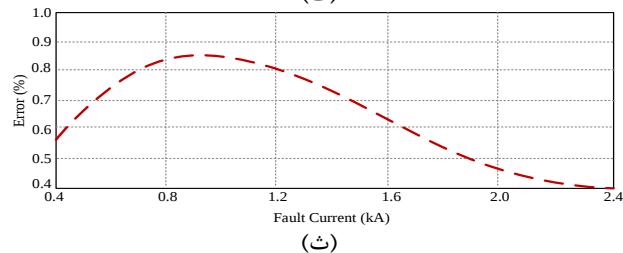
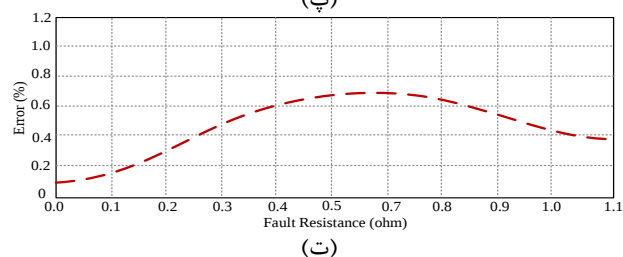
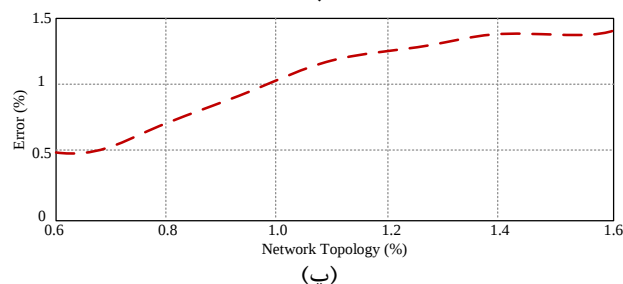
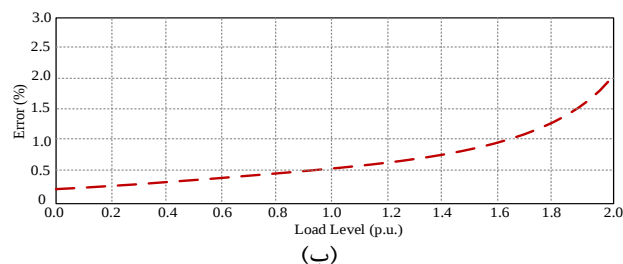
در این بخش، به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم SVM، مقایسه جامعی میان طرح پیشنهادی و روش‌های پیشین انجام می‌شود. در این زمینه، با در نظر گرفتن شبکه توزیع یکسان حاوی منابع تولید پراکنده، خطاهای مشابه اجرا شده و دقت روش‌های مختلف در شناسایی برخط مکان‌های خطا مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای این- منظور، شاخص‌های مختلفی شامل دقت الگوریتم، سیکل مورد نیاز شناسایی مکان خطا، وابستگی به مدل شبکه، هزینه و پیچیدگی و قابلیت استفاده در شبکه‌های بزرگ توزیع معرفی شده و در جدول (۷) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

جدول (۷): مقایسه طرح پیشنهادی SVM با روش‌های گذشته

مرجع	دقت (%)	سیکل مورد نیاز شناسایی	مبتنی بر مدل	هزینه و پیچیدگی	قابل استفاده در شبکه‌های بزرگ؟
[۲]	۸۷/۶۶	۴	بلی	متوسط	خیر
[۴]	۸۵/۵۲	۵	بلی	زیاد	خیر
[۵]	۸۴/۱۹	>۷	بلی	متوسط	خیر
[۷]	۹۱/۷۹	>۷	بلی	زیاد	خیر
[۸]	۹۰/۲۴	۶	بلی	کم	خیر
[۱۰]	۹۲/۵۳	۵	بلی	متوسط	خیر
[۱۱]	۸۹/۹۸	۵	خیر	زیاد	خیر
[۱۴]	۸۷/۴۶	>۷	بلی	متوسط	خیر
[۱۵]	۹۲/۷۳	۶	بلی	متوسط	خیر
[۱۶]	۹۱/۴۲	۵	بلی	زیاد	خیر
[۱۸]	۸۸/۷۱	۴	بلی	متوسط	بلی
[۲۰]	۸۹/۷۷	>۷	بلی	متوسط	خیر
طرح پیشنهادی	۹۹/۱۴	۲	خیر	کم	بلی

باتوجه به آن که طرح پیشنهادی روشی هوشمند و مبتنی بر اطلاعات برخط شبکه است، با استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری در باس‌های مختلف شبکه و سپس محاسبه شاخص‌های پیشنهادی در یک پایگاه داده، الگوریتم پیشنهادی مورد آموزش قرار گرفته و در محیط زمان واقعی پیاده‌سازی شود. در این زمینه، تجهیزات مورد نیاز شامل نصب ثبات در نقاط مختلف شبکه به منظور اندازه‌گیری اطلاعات، فیبرنوری به منظور ارسال سیگنال‌های فازوری، یک پایگاه داده به- منظور محاسبه شاخص و یک تحلیل‌گر قوی سیستم‌های قدرت به- منظور مدل‌سازی و آموزش طرح پیشنهادی SVM هستند.

هم‌چنین، مطابق با جدول (۷)، در مقایسه با دیگر روش‌ها، طرح هوشمند پیشنهادی SVM دقت عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش‌ها



شکل (۶): حساسیت SVM به ازای پارامترهای مختلف شبکه (الف) مسافت خط، (ب) سطح بار، (پ) توپولوژی شبکه، (ت) مقاومت خطا، (ث) جریان خطا، (ج) فرکانس نمونه‌برداری

باتوجه به نتایج به‌دست آمده، فرکانس نمونه‌برداری به‌دست آمده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در کاهش دقت SVM معرفی می‌شود. دلیل این امر، از دست دادن اطلاعات خطا با افزایش دوره زمانی نمونه‌برداری است و می‌توان با در نظر گرفتن نرخ نمونه‌برداری مناسب در محدوده ۱۰ الی ۲۰ میلی ثانیه، دقت مناسب با نرخ تصمیم‌گیری صحیح بالای ۹۹ درصد را به‌دست آورد.

مراجع

- [1] K. Kalita, S. Anand and S. K. Parida, "A Novel Non-Iterative Fault Location Algorithm for Transmission Line With Unsynchronized Terminal", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 3, pp. 1917-1920, June 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3054235.
- [2] Z. Wang, Z. Chen and M. Paolone, "A Data-Driven Fault Location Algorithm Based on the Electromagnetic Time Reversal in Mismatched Media", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 5, pp. 3709-3721, Oct. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3135429.
- [3] H. Shu, X. Liu and X. Tian, "Single-Ended Fault Location for Hybrid Feeders Based on Characteristic Distribution of Traveling Wave Along a Line", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 1, pp. 339-350, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2976691.
- [4] C. Galvez and A. Abur, "Fault Location in Power Networks Using a Sparse Set of Digital Fault Recorders", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 5, pp. 3468-3480, Sept. 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3168904.
- [5] K. Kalita, S. Anand and S. K. Parida, "An Improved Parameter-Free Fault Locator for Untransposed Line With Unsynchronized Terminals", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 6, pp. 5480-5483, Dec. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3207062.
- [6] J. Qiao, X. Yin, Y. Wang, L. Tan and Q. Lu, "A Precise Stator Ground Fault Location Method for Large Generators Based on Potential Analysis of Slot Conductors", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 6, pp. 5203-5213, Dec. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3174198.
- [7] P. Chang, G. Song, J. Hou and R. Xu, "A Single-Terminal Fault Location Method for Transmission Lines Integrated by Inverter-Type Source", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 3, pp. 1704-1713, June 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3096222.
- [8] D. Wang, V. Psaras, A. A. S. Emhemed and G. M. Burt, "A Novel Fault Let-Through Energy Based Fault Location for LVDC Distribution Networks", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 2, pp. 966-974, April 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2998409.
- [9] L. Kong and H. Nian, "Fault Detection and Location Method for Mesh-Type DC Microgrid Using Pearson Correlation Coefficient", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 3, pp. 1428-1439, June 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3008924.
- [10] M. R. Jegaraluei, T. E. H. El-Gorashi, J. M. H. Elmirghani and S. Azizi, "A Generalized Closed-Form Solution for Wide-Area Fault Location by Characterizing the Distributions of Superimposed Errors", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 6, pp. 5484-5487, Dec. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3214746.
- [11] Y. Jiang, "Data-Driven Probabilistic Fault Location of Electric Power Distribution Systems Incorporating Data Uncertainties", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 12, no. 5, pp. 4522-4534, Sept. 2021, doi: 10.1109/TSG.2021.3070550.
- [12] J. Li, Y. Liu, C. Li, D. Zeng, H. Li and G. Wang, "An FTU-Based Method for Locating Single-Phase High-Impedance Faults Using Transient Zero-Sequence Admittance in Resonant Grounding Systems", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 2, pp. 913-922, April 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3074217.
- [13] D. F. Friedemann, D. Motter and R. A. Oliveira, "Stator-Ground Fault Location Method Based on Third-Harmonic Measures in High-Impedance Grounded Generators", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 2, pp. 794-802, April 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2993219.
- [14] B. Wang, Y. Liu, D. Lu, K. Yue and Y. Nie, "Unsynchronized Parameter-Free Fault Location for Two or Three Terminal Double-Circuit Transmission Lines Sharing the Same Tower via Unscented Kalman Filter", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 3, pp. 1731-1746, June 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3223410.

داشته و در مدت زمان کمتری توانسته مکان خطا را به‌درستی تخمین بزند. از مزایای بارز طرح پیشنهادی، عملکرد سریع رله (کمتر از دو سیکل نوسان) و عدم وابستگی به ماتریس امپدانس شبکه است. این امر منجر به صرف هزینه و پیچیدگی کمتر برای پیاده‌سازی طرح پیشنهادی در شرایط زمان واقعی می‌شود. هم‌چنین، باتوجه به آن‌که از اطلاعات اندازه‌گیری فازوری برای تولید شاخص‌های پیشنهادی بهره گرفته می‌شود، می‌توان طرح پیشنهادی را در شبکه‌های توزیع بزرگ نیز مورد بهره‌برداری قرار داد. از سوی دیگر، اغلب روش‌های گذشته، وابستگی زیادی به ماتریس امپدانس شبکه داشته و به همین دلیل در دوره زمانی طولانی‌تری مکان خطا را تشخیص می‌دهند. در این روش-ها، عملکرد صحیح رله به شدت به ساختار توپولوژیکی شبکه بستگی دارد به‌طوری‌که به‌ازای تغییر ساختار شبکه (ماتریس امپدانس)، عملکرد صحیح، نیازمند بروزرسانی و تنظیم مجدد پارامترها است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک روش جدید به منظور آشکارسازی مکان خطا بر اساس تئوری ماشین‌های بردار پشتیبان استفاده شده است. در این زمینه، مجموعه‌ای جامع از شاخص پیشنهادی شامل ۲۴ شاخص مختلف معرفی و توانایی هر شاخص تحت سناریوهای مختلف خطا مورد ارزیابی قرار گرفتند. مشخص شد، برای حالت یک ویژگی ورودی به SVM، شاخص انحراف ولتاژ در سه دوره متوالی پس از برطرف شدن خطا VDD دارای بیشترین میزان دقت با نرخ دقت ۸۵/۷۱ درصد در طبقه‌بندی نمونه‌ها و شناسایی مکان خطا بوده است. در ادامه، دقت SVM با ترکیب‌های مختلف از شاخص‌های پیشنهادی ارزیابی شده به‌نحوی‌که در حالت سه شاخص با دقت ۹۲/۸۶ درصد، چهار شاخص با دقت ۹۷/۸۶ و در نهایت به‌ازای پنج شاخص VDD، DUR2، VD، DUI2 و DF2 به بالاترین نرخ دقت به میزان ۹۹/۱۴٪ در یافتن صحیح مکان خطا دست یافته و نشان‌دهنده توانایی الگوریتم در آشکار مکان خطا در زمان‌های بلافاصله پس از وقوع پیشامد (۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی ثانیه) است. هم‌چنین، در نتایج شبیه‌سازی‌ها مشخص شد، از میان ۲۴ شاخص معرفی شده، شاخص ولتاژی در زمان‌های وقوع پیشامد، به‌عنوان موثرترین شاخص در آشکارسازی مکان خطا است. برای تولید نمونه‌ها و آموزش الگوریتم SVM، شبکه توزیع آزمایشی ۳۳ باسه حاوی منابع تولید پراکنده معرفی شده و نتایج به‌صورت جفت داده‌های ورودی خروجی جهت آموزش و تست الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان داده است، طرح پیشنهادی یک روش کارا در شناسایی مکان خطا بوده و می‌تواند بخوبی در شرایط دینامیک شبکه، تصمیم مناسب را اتخاذ نموده و در رله‌ها جهت آشکارسازی نوع و مکان خطا مورد استفاده قرار گیرد.

- [15] B. Wang, Y. Liu, D. Lu, K. Yue and R. Fan, "Transmission Line Fault Location in MMC-HVDC Grids Based on Dynamic State Estimation and Gradient Descent", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 3, pp. 1714-1725, June 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3013755.
- [16] B. Yang, K. Jia, Q. Liu, L. Zheng and T. Bi, "Faulted Line-Section Location in Distribution System With Inverter-Interfaced DGs Using Sparse Meters", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 1, pp. 413-423, Jan. 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3186541.
- [17] C. A. Apostolopoulos, C. G. Arsoniadis, P. S. Georgilakis and V. C. Nikolaidis, "Unsynchronized Measurements Based Fault Location Algorithm for Active Distribution Systems Without Requiring Source Impedances", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 3, pp. 2071-2082, June 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3103870.
- [18] X. Diao, F. Liu, Y. Song, M. Xu, Y. Zhuang and X. Zha, "An Integral Fault Location Algorithm Based on a Modified T-Source Circuit Breaker for Flexible DC Distribution Networks", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 5, pp. 2861-2871, Oct. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3028423.
- [19] C. Galvez and A. Abur, "Fault Location in Active Distribution Networks Containing Distributed Energy Resources (DERs)", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 5, pp. 3128-3139, Oct. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3034179.
- [20] N. Bayati, H. R. Baghaee, A. Hajizadeh, M. Soltani, Z. Lin and M. Savaghebi, "Local Fault Location in Meshed DC Microgrids Based On Parameter Estimation Technique", in IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 1, pp. 1606-1615, March 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3107905.

[۲۱] دشتی، رحمان. قاسمی، محسن. "مکان‌یابی خطا در شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده به روش امیدانسی با استفاده از مدل خط متوسط"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۶؛ ۱۴ (۳) ۷۹-۹۰.

[۲۲] براتی، جواد. درودی، عارف. "مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال با حضور محدودکننده جریان خطا"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۶؛ ۱۴ (۳) ۹۹-۱۰۷.

[۲۳] خزاعی، محمدحسین. حق‌جو، فرهاد. "الگوریتم جامعی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال دو مداره و چند پایانه ای (بیش از سه پایانه) مبتنی بر داده‌های PMU"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۶؛ ۱۴ (۱) ۱-۱۰.