

الگوریتم حفاظتی به منظور شناسایی نوسان توان در رله‌های دیستانس به کمک طبقه‌بند مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان

محمد فرشاد^{۱*}، سیدمجتبی روحانی^۲، جواد ساده^۳

۱. دانشجوی دکتری برق دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی
۲. استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گناباد
۳. دانشیار گروه برق، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

m.farshad@ieee.org

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱

چکیده

در سیستم قدرت، معمولاً رله‌های دیستانس به عنوان حفاظت اصلی خطوط انتقال به کار گرفته می‌شوند و عملکرد صحیح آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نوسان توان، یکی از پدیده‌هایی است که می‌تواند باعث عملکرد اشتباه و ناهنجاری رله‌های دیستانس معمولی شود و تداوم انتقال انرژی الکتریکی را به مخاطره بیندازد. در این مقاله، روشی مبتنی بر طبقه‌بند و بر اساس ماشین بردار پشتیبان (SVM)، به منظور شناسایی نوسان توان از خطای اتصال کوتاه در رله‌های دیستانس دیجیتال ارائه شده است. سپس از طریق شبیه‌سازی یک سیستم قدرت نمونه و پردازش سیگنال‌های ولتاژ و جریان، تعدادی الگو برای یادگیری و تست طبقه‌بند SVM تولید شده و از این طریق عملکرد روش پیشنهادی، آزمایش و بررسی شده است. مجموعه الگوهای یادگیری و تست، شامل ترکیبی از حالت‌های مختلف نوسان توان و انواع خطاهای متقارن و نامتقارن است. نتایج آزمایش‌های انجام شده، بیانگر کارآمدی الگوریتم حفاظتی پیشنهادی است.

کلیدواژگان: حفاظت دیستانس، خطوط انتقال، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، نوسان توان.

۱. مقدمه

پایداری سیستم قدرت در معرض خطر پدیده‌هایی همچون نوسان توان^۱ است. نوسان توان، ممکن است به دنبال وقوع یک اغتشاش ناگهانی مانند تغییر ناگهانی بار، کلیدزنی و یا وقوع اتصال کوتاه و قطع خط مورد خطا در سیستم قدرت رخ دهد [۱]. درواقع، وقوع این پدیده ناشی از تلاش واحدهای ژنراتوری برای یافتن نقطه کار جدید از طرفی و لختی سیستم‌های کنترلی از سوی دیگر است.

در حالتی که نوسان توان به گونه‌ای است که سیستم می‌تواند به حالت نرمال بازمی‌گردد، ممکن است رله دیستانس به دلیل کاهش امپدانس ظاهری دیده‌شده توسط آن، عملکرد ناصحیح داشته باشد. در یک سیستم قدرت پرتراکم، این عملکرد ناصحیح رله دیستانس می‌تواند باعث عملکرد رله‌های دیستانس دیگر شود و امنیت سیستم را دچار مخاطره سازد. خاموشی سراسری سیستم ایران در بهار سال ۱۳۸۰، به دلیل عملکرد ناصحیح رله‌های دیستانس بعد از عملکرد صحیح رله دیستانس خط ۴۰۰ کیلو ولت رخ داد [۲].

برای جلوگیری از عملکرد ناصحیح رله‌های دیستانس در هنگام وقوع پدیده نوسان توان تمهیداتی همچون قراردادن واحد آشکارساز نوسان توان (PSD)^۲ و یا مسدودکننده نوسان توان (PSB)^۳ در این نوع رله‌ها صورت گرفته است. وظیفه این واحد، تشخیص نوسان توان از خطای اتصال کوتاه و جلوگیری از عملکرد اشتباه رله دیستانس است.

تاکنون روش‌های متعددی برای طراحی واحد PSB و تشخیص نوسان توان در رله‌های دیستانس معرفی و اجرا

شده است. روش قدیمی و معمول، تکنیک بررسی سرعت حرکت مشخصه امپدانس ظاهری است [۳]. این روش با مشکلاتی از قبیل تعیین زمان حدی برای تایمر سرعت‌سنج و همچنین عدم عملکرد مناسب برای خطوط بلند و پربار روبه‌روست [۴ و ۵]. روش‌های دیگری که ارائه شده است، تشخیص نوسان توان بر اساس تغییرات کمیت‌های سیستم همچون توان اکتیو و راکتیو و $V \cos \phi$ یا $|V \cos \phi|$ است [۳-۵]. لازم به ذکر است، V ولتاژ اندازه‌گیری‌شده و ϕ اختلاف زاویه ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده است. در مرجع [۶]، دو شیوه برای شناسایی نوسان توان، پیشنهاد شده است که روش اول مبتنی بر استفاده از دو رله دیستانس با مشخصه دایره‌ای متحدالمرکز استوار است. دایره داخلی مشخصه رله دیستانس مهو و دایره بیرونی مشخصه مربوط به واحد PSB خواهد بود. ناحیه دایره داخلی منطقه عملکرد رله و ناحیه بین دو دایره داخلی و بیرونی، ناحیه سنجش سرعت است. در روش دوم پیشنهادی در مرجع [۶]، استفاده از معیار $V \cos \phi$ به منظور تشخیص نوسان توان مد نظر قرار گرفته است. روش دیگری که می‌تواند برای تشخیص نوسان توان، مد نظر قرار گیرد، تخمین زاویه توان (δ) است. در عمل، اندازه‌گیری زاویه روتور ژنراتور مشکل است؛ ولی در مرجع [۲]، روشی برای محاسبه غیرمستقیم زاویه δ ارائه شده است. البته استفاده از این روش نیز تنها در مواقعی که نوسان توان در رنج فرکانسی خاصی رخ می‌دهد، کارآمد خواهد بود. در مرجع [۷]، الگوریتمی بیان شده است که در آن با استفاده از امپدانس ظاهری و چند معیار اضافی ترکیب‌شده با آن سعی در جلوگیری از عملکرد ناصحیح رله دیستانس در هنگام رخداد نوسان توان شده است. در این مرجع، استفاده از چند معیار اضافی بر مبنای عناصر متقارن توالی فاز و مشتق زاویه فاز جریان برای رله‌های

1. Power Swing.
2. Power Swing Detector.
3. Power Swing Blocking.

دیستانس پیشنهاد و بر این اساس الگوریتمی ارائه شده است. در مرجع [۸]، تشخیص نوسان توان از خطای اتصال کوتاه بر اساس آشکارسازی گذراها در راکتانس اندازه گیری شده مد نظر قرار گرفته است. گذراهای راکتانس تخمینی، در حالت وقوع خطای واقعی ظاهر می شوند، درحالی که در طی نوسان توان ظاهر نمی شوند. مقدار مؤلفه مقاومتی امپدانس اندازه گیری شده توسط رله دیستانس، در هنگام وقوع نوسان توان به طور پیوسته تغییر می کند؛ ولی در هنگام وقوع اتصال کوتاه، تنها در لحظه اولیه وقوع خطا تغییرات دارد. از این پدیده نیز می توان برای شناسایی نوسان توان از خطای اتصال کوتاه استفاده کرد [۹].

در صورتی که در هنگام وقوع نوسان توان و عملکرد واحد PSB رله دیستانس خطای اتصال کوتاه رخ دهد، رله دیستانس باید بلافاصله رفع انسداد شود تا بتواند عملکرد داشته باشد. در بسیاری از مطالعات، شناسایی وقوع خطای اتصال کوتاه در طی رخداد نوسان توان و رفع انسداد رله دیستانس به طور خاص مد نظر قرار گرفته و در این راستا معیارها و روش هایی نیز مطرح شده است. مرجع [۱۰] روشی را مبتنی بر مؤلفه های متقارن جریان به منظور شناسایی خطای نامتقارن در طی نوسان توان و رفع انسداد رله دیستانس پیشنهاد داده است. در مرجع [۱۱] روشی مبتنی بر نرخ تغییرات توان اکتیو و راکتیو سه فاز به منظور بهبود حساسیت و پاسخ رله دیستانس به خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن در طی نوسان توان مطرح شده است. در مرجع [۱۲] برای رفع انسداد رله دیستانس در هنگام وقوع خطای متقارن سه فاز، روشی مبتنی بر کاهش ناگهانی مقدار قدر مطلق نرخ تغییرات ولتاژ مرکز نوسان توان (PSCV)^۱ پیشنهاد شده است. مرجع [۱۳] استفاده از معیار مؤلفه DC جریان های اتصال کوتاه را به منظور رفع انسداد

رله دیستانس در هنگام وقوع خطا در طی نوسان توان پیشنهاد کرده است. روش مطرح شده در مرجع [۱۴] برای تشخیص وقوع اتصال کوتاه سه فاز در طی نوسان توان بر پایه وجود مؤلفه DC کاهشی در شکل موج جریان اتصال کوتاه استوار است.

علاوه بر معیارهای پیشنهادی مختلفی که برای شناسایی نوسان توان از خطای اتصال کوتاه وجود دارد، استفاده از ابزارهای مختلفی نیز در این راستا پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۵]، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۲ برای تشخیص نوسان توان از خطای اتصال کوتاه پیشنهاد شده است. مشکل آموزش و تعمیم پذیری شبکه عصبی پیشنهادی در مرجع [۱۵]، خود از مواردی است که باید بیشتر مورد بحث و بررسی قرار گیرد. در روش پیشنهادی مرجع [۱۶]، یک شبکه ANFIS^۳ به منظور شناسایی نوسان توان از خطای اتصال کوتاه مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع [۱۷]، از طبقه بند مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان (SVM)^۴ برای شناسایی حالت نوسان توان از اتصال کوتاه متقارن استفاده شده است و کارایی بالای طبقه بند SVM نسبت به ANFIS در قدرت تعمیم پذیری نشان داده شده است. ۵ معیار شناسایی مورد استفاده در این مرجع از بین ۶ معیار و بر اساس روش بدون ناظر PCA^۵ و با توجه به بزرگترین ضرایب حاصله در تعیین راستاهای عمود متناظر با ماکزیمم واریانس انتخاب شده اند. به نظر نمی رسد این شیوه به کارگیری PCA بتواند برای این مسئله طبقه بندی، روش انتخاب ویژگی مناسبی باشد؛ به عنوان مثال، دو معیار شناسایی نوسان توان انتخابی در این مرجع که تغییرات توان اکتیو و راکتیو نسبت به سیکل قبلی است، ممکن است

2. Artificial Neural Network

3. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems

4. Support Vector Machine

5. Principle Component Analysis

1. Power Swing Centre Voltage.

خواهد آمد. در نهایت، چند نمونه تست برخط^۱ برای مشاهده عملکرد الگوریتم پیشنهادی صورت می گیرد. بخش پنجم و آخر مقاله به جمع بندی، اختصاص یافته است.

۲. ماشین های بردار پشتیبان (SVM)

SVM یکی از روش های نسبتاً جدید برای یادگیری توابع جداساز در مبحث شناسایی الگو محسوب می شود. مبحث SVM ها که از نظریه یادگیری آماری (SLT)^۲ سرچشمه می گیرد، برای اولین بار توسط وپنیک^۳ و بر پایه ایده مینیمم سازی ریسک ساختاری (SRM)^۴ ارائه شد و بعدها با جزئیات بیشتری کامل شد [۱۸]. هدف اصلی SRM، انتخاب بهینه مدل برای الگوهای یادگیری موجود است. یکی از مشکلاتی که بیشتر شیوه های یادگیری قدیمی تر همچون شبکه های عصبی معمولی با آن مواجه هستند، ظرفیت تعمیم پذیری پایین در هنگام دستیابی به دقت بالاست. این در حالی است که SVM خاصیت تعمیم پذیری بالایی دارد و می تواند تعادلی بهینه بین دقت و تعمیم پذیری ایجاد کند. همچنین مشکل الگوریتم یادگیری و همگرایی آن که شبکه های عصبی معمولی با آن مواجه است، دیگر برای SVM مطرح نخواهد بود.

در طبقه بند SVM، نتیجه یادگیری یک ابر صفحه خواهد بود که با ماکزیمم حاشیه اطمینان و مینیمم خطا، داده های دو کلاس را از یکدیگر جدا می سازد. به دست آوردن ابر صفحه مورد بحث برای دو کلاس ω_1 و ω_2 ، معادل حل مسئله بهینه سازی (۱) است.

$$\min_{W, \xi} \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i$$

برای فرکانس های لغزش خاص و یا نوسانات توان فرکانس پایین، که در ابتدا و انتهای این پدیده اتفاق می افتد، کارایی مناسبی نداشته باشند. کما اینکه معیارهای کمکی مناسبی نیز برای تشخیص چنین حالت هایی انتخاب نشده است. همچنین در مرجع [۱۷]، کارایی معیارها و ابزار مورد استفاده در شناسایی خطای نامتقارن در طی وقوع نوسان توان، بررسی نشده است.

در این مقاله، روشی مبتنی بر SVM، که در قالب یک طبقه بند دو کلاسی کارایی بالایی به لحاظ یادگیری و تعمیم پذیری دارد، برای شناسایی نوسان توان از خطای اتصال کوتاه در رله های دیستانس دیجیتال مطرح می شود. در روش پیشنهادی، طبقه بند SVM در کنار رله دیستانس معمولی وظیفه تشخیص حالت اتصال کوتاه از حالت نوسان توان را دارد و تنها در صورتی که خطایی واقعی در سیستم رخ داده باشد، اجازه عملکرد را به رله دیستانس معمولی می دهد. ویژگی های الگوی ورودی طبقه بند SVM به صورتی انتخاب شده اند که قابلیت تشخیص انواع نوسان توان از حالات مختلف خطای اتصال کوتاه متقارن و نامتقارن وجود دارد.

در ادامه این مقاله، ابتدا شرح مختصری در خصوص طبقه بند SVM بیان خواهد شد. در بخش سوم، کلیات روش پیشنهادی در تشخیص نوسان توان و خطای اتصال کوتاه در رله دیستانس مطرح می شود. در بخش چهارم مقاله، مشخصات یک سیستم نمونه تعیین شده و شبیه سازی ها به کمک نرم افزار PSCAD/EMTDC به منظور تولید الگوهای یادگیری و تست که شامل ترکیب های مختلفی از حالات نوسان توان و رخداد انواع خطاهای متقارن و نامتقارن در سیستم است، انجام خواهد شد. سپس روش پیشنهادی در مورد الگوهای یادگیری و تست اعمال شده و ساختار مناسب برای طبقه بند مورد نظر به دست

1. On-line.
2. Statistical Learning Theory.
3. Vapnik.
4. Structural Risk Minimization.

حوزه کرنل بلونیسی کرد اگر $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$

باشد، آنگاه دوگان این مسئله بهینه سازی در حوزه کرنل به صورت (۳) خواهد بود.

$$\max_{\lambda} L(\lambda) = \sum_i \lambda_i - \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j d_i d_j K(x_i, x_j)$$

$$\text{where } d_i = \begin{cases} 1 & \text{for } \omega_1 \\ -1 & \text{for } \omega_2 \end{cases}$$

(۳)

$$s.t. \ 0 \leq \lambda_i \leq C, \ \forall i$$

$$\sum_i \lambda_i d_i = 0$$

با حل مسئله بهینه سازی (۳) می توان به حل مسئله SVM

در حوزه کرنل دست یافت و سطح تصمیم غیرخطی را برای الگوهای مورد نظر مشخص کرد. لازم به ذکر است،

$$\varphi(x_j)$$

تابع می تواند مشخص یا نامشخص باشد؛ ولی

تابع کرنل $K(x_i, x_j)$ را باید برای حل مسئله تعیین کرد.

انتخاب تابع کرنل مناسب از اهمیت بالایی برخوردار بوده

و کارایی طبقه بند را در تعمیم پذیری و کاهش خطا تحت

تأثیر قرار می دهد. برخی از کرنل های معروف در جدول

(۱) معرفی شده اند [۱۹].

$$\text{, where } d_i = \begin{cases} 1 & \text{for } \omega_1 \\ -1 & \text{for } \omega_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$s.t. \ d_i \cdot (W^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i$$

$$\xi_i \geq 0 \ \forall i$$

در مسئله بهینه سازی (۱)، الگوی i ام، x_i ضریب مربوط به تعیین حاشیه نرم W بردار وزن ها و b بایاس ابر صفحه خواهند بود. ξ_i متغیر کمکی^۲ متناظر با نمونه i ام، برای در نظر گرفتن نویز یا داده های جداناپذیر خطی در مسئله بهینه سازی اولیه است. برای حل مسئله بهینه سازی (۱) می توان با نوشتن تابع لاگرانژ $L(\lambda)$ و از طریق شرایط KKT^۳، مسئله دوگان^۴ آن را به صورت (۲) به دست آورد [۱۹].

$$\max_{\lambda} L(\lambda) = \sum_i \lambda_i - \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j d_i d_j x_i^T x_j$$

$$\text{where } d_i = \begin{cases} 1 & \text{for } \omega_1 \\ -1 & \text{for } \omega_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$s.t. \ 0 \leq \lambda_i \leq C, \ \forall i$$

$$\sum_i \lambda_i d_i = 0$$

در مسئله بهینه سازی (۲)، λ_i ضریب لاگرانژ متناظر با قید الگوی i ام خواهد بود. با حل مسئله دوگان فوق می توان به حل بهینه مسئله (۱) دست یافت. سطح تصمیم پیشنهادی در مسئله طبقه بندی مذکور، یک سطح تصمیم خطی است. در مرجع [۱۸]، این مسئله طبقه بندی با استفاده از توابع کرنل برای سطوح جداساز غیرخطی نیز تعمیم یافت و امکان به دست آوردن سطوح تصمیم در مسائل جداناپذیر خطی فراهم شد. اگر نگاشتی مطابق $\varphi(x_i), \forall i$ در نظر گرفته شود، آنگاه می توان مسئله بهینه سازی (۱) را برای

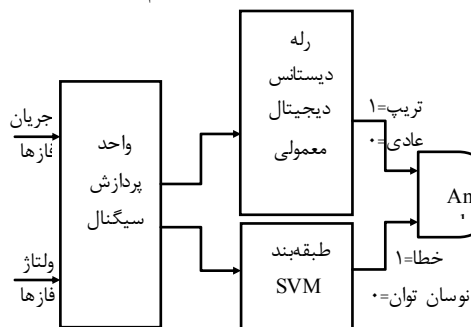
1. Soft Margin.

2. Slack Variable.

3. Karush-Kuhn-Tucker.

4. Dual.

طبقه بند SVM تنها شامل وضعیت های خطا و نوسان توان خواهد بود و حالت نرمال را دربر نخواهد داشت. همچنین باید دقت کرد که این الگوریتم برای شناسایی نوسان توان ناپایدار از پایدار طراحی نشده است و فرض می شود که مونیتورینگ و بررسی وضعیت پایداری سیستم بر عهده واحد دیگری است که در صورت ناپایدار شدن نوسانات توان دستور عملکردهای مناسب را در سیستم صادر می کند.



شکل (۱). شمای کلی از الگوریتم حفاظتی پیشنهادی

۳-۱. واحد پردازش سیگنال

در واحد پردازش سیگنال، ابتدا سیگنال های جریان و ولتاژ ورودی از یک فیلتر پایین گذر مرتبه دوم عبور می کنند و فرکانس های بالا حذف می شوند. در مرحله بعدی، بر اساس فرکانس خاصی مثلاً ۸۰۰ هرتز که حداقل دو برابر بالاترین فرکانس موجود است از سیگنال ها نمونه برداری می شود. سپس بر اساس تبدیل فوریه گسسته، اندازه، زاویه فازورهای ولتاژ و جریان محاسبه می شوند. تبدیل فوریه برای پنجره یک سیکل کامل بر اساس فرکانس پایه ۵۰ هرتز صورت می گیرد. در نهایت مقادیر پارامترهای مورد نیاز جهت واحدهای دیستانس و طبقه‌بند SVM محاسبه و برای آن واحدها ارسال می شوند. لازم به ذکر است پارامترهای ورودی به واحد رله دیستانس شامل فازورهای ولتاژ و جریان هریک از فازها و همچنین مؤلفه توالی صفر

جدول (۱). برخی از کرنل های معروف مورد استفاده در SVM

نوع کرنل	فرمول
کرنل خطی	$K(x, y) = \langle x, y \rangle = x^T \cdot y$
کرنل درجه دوم	$K(x, y) = \langle x, y \rangle \cdot (1 + \langle x, y \rangle)$
کرنل چندجمله‌ای	$K(x, y) = \langle x, y \rangle \cdot (1 + \langle x, y \rangle)^{d-1}$
کرنل RBF گوسی	$K(x, y) = \exp[-\ x - y\ ^2 / (2\sigma^2)]$
کرنل MLP	$K(x, y) = \tanh(p_1 \langle x, y \rangle + p_2)$

۳. الگوریتم حفاظتی پیشنهادی

الگوریتم حفاظتی پیشنهادی، بر پایه ترکیب رله دیستانس دیجیتال معمولی و طبقه‌بند SVM استوار است. بر اساس این الگوریتم، در هر لحظه سیگنال های جریان و ولتاژ اندازه گیری شده از خروجی ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان محل نصب رله دیستانس مورد پردازش قرار می گیرند و مقادیر پارامترهای لازم از این سیگنال ها استخراج شده و به واحد دیستانس معمولی و طبقه‌بند SVM فرستاده می شوند. در واحد دیستانس معمولی، امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله بر اساس پارامترهای ورودی محاسبه شده و با مشخصه تنظیمی مقایسه می شود. اگر امپدانس ظاهری مذکور درون مشخصه تنظیمی رله دیستانس واقع شده باشد و در آن لحظه، واحد طبقه‌بند SVM نیز تشخیص خطای اتصال کوتاه را بدهد، رله دیستانس معمولی به عملکرد ازپیش تعیین شده ادامه می دهد؛ ولی اگر در هنگام واقع شدن امپدانس ظاهری درون مشخصه تنظیمی رله دیستانس، واحد طبقه‌بند SVM تشخیص وقوع نوسان توان را بدهد، رله دیستانس بی حس شده و از عملکرد اشتباه آن جلوگیری می شود. شمای کلی از عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده است. در الگوریتم پیشنهادی، الگوهای یادگیری

۳-۲. واحد رله دیستانس دیجیتال معمولی

واحد رله دیستانس خود شامل ۳ رله دیستانس مربوط به امپدانس خط به زمین و ۳ رله دیگر مربوط به امپدانس خط به خط است. امپدانس خط به زمین برای هر فاز به صورت رابطه (۷) محاسبه می شود.

$$Z_{L-G} = \frac{V_{ph}}{I_{ph} + kI_0} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، V_{ph} و I_{ph} به ترتیب فازورهای ولتاژ و جریان فاز است. همچنین I_0 مؤلفه توالی صفر جریان و k ضریب مربوط به امپدانس زمین است.

امپدانس خط به خط برای هر جفت فاز به صورت رابطه (۸) محاسبه می شود.

$$Z_{L-L} = \frac{V_{ph1} - V_{ph2}}{I_{ph1} - I_{ph2}} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، V_{ph1} ، V_{ph2} ، I_{ph1} و I_{ph2} به ترتیب فازورهای ولتاژ فاز ۱ و ۲ و جریان فاز ۱ و ۲ است.

واحد رله دیستانس مورد نظر، بر اساس محاسبه ۳ امپدانس خط به زمین و ۳ امپدانس خط به خط در هر لحظه و مقایسه آن با مشخصه های تنظیمی عمل می کند. در صورت ورود هریک از امپدانس های اندازه گیری شده به مشخصه تنظیمی مربوطه، خروجی واحد رله دیستانس برای صدور فرمان تریپ برابر ۱ خواهد شد.

۳-۳. طبقه بند SVM

همان طور که قبلاً بیان شد، هر الگوی ورودی به طبقه بند SVM شامل مقادیر I_{dc}^{pu} هریک از فازها، ΔZ_p و ΔI_n خواهد بود. شکل (۲)، شمایی کلی از ساختار الگوی ورودی به طبقه بند مذکور را که شامل ۵ ویژگی است، نمایش می دهد.

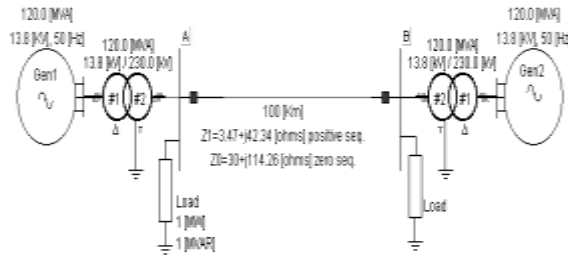
جریان خواهد بود. انتخاب مناسب پارامترهای ورودی طبقه بند SVM از اهمیت بالایی برخوردار است و می تواند تأثیر بسزایی در کاهش خطا و افزایش کارآمدی طبقه بند داشته باشد. بر اساس ایده قدیمی موجود در زمینه تشخیص نوسان توان، از نرخ تغییرات امپدانس به عنوان یکی از ویژگی های ورودی استفاده شده است. همچنین به منظور تشخیص بهتر وضعیت اتصال کوتاه از نوسان توان مؤلفه DC جریان فازها و همچنین نرخ تغییرات مؤلفه توالی منفی جریان نیز به عنوان ویژگی های دیگر الگوهای ورودی به طبقه بند مد نظر قرار گرفته اند. لازم به ذکر است، این مؤلفه ها در لحظه وقوع اتصال کوتاه به خوبی می توانند وضعیت موجود را آشکار سازند [۱۳، ۱۶]. پارامترهای ورودی به واحد طبقه بند SVM که شامل تغییرات امپدانس توالی مثبت (ΔZ_p)، تغییرات جریان توالی منفی (ΔI_n) و نسبت مؤلفه DC جریان هریک از فازها به مؤلفه فرکانس پایه (I_{dc}^{pu})، است، از طریق روابط (۴) الی (۶) قابل محاسبه خواهند بود.

$$\Delta Z_p = |Z_p(k) - Z_p(k-K)| \quad (۴)$$

$$\Delta I_n = |I_n(k) - I_n(k-K)| \quad (۵)$$

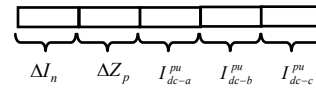
$$I_{dc}^{pu} = \left| \frac{I_{dc}(k)}{I_{fund}(k)} \right| \quad (۶)$$

در روابط (۴) الی (۶)، k اندیس نمونه مورد نظر و K تعداد نمونه ها در هر سیکل است. در رابطه (۶)، $I_{fund}(k)$ مؤلفه ها رمونیک اصلی جریان فاز در نمونه k ام است. همچنین در رابطه (۴)، امپدانس توالی مثبت $Z_p(k)$ از تقسیم فازور ولتاژ توالی مثبت بر فازور جریان توالی مثبت در نمونه k ام به دست می آید.



شکل (۳). دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه به کمک نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه سازی شده است. شکل (۴)، نمودار جریان اندازه گیری شده مربوط به یکی از فازها در باس A را در طی وقوع یک نمونه نوسان توان نمایش می دهد. در لحظه $t=8 \text{ sec}$ اتصال کوتاه سه فاز در وسط خط AB (در فاصله ۵۰ کیلومتری از رله دیستانس) رخ داده و در زمان $t=8.06 \text{ sec}$ این اتصال برطرف شده است. نمودار نوسان توان اکتیو متوسط عبوری از خط AB در شکل (۵) نمایش داده شده است. شکل (۶) نیز مشخصه تنظیمی رله دیستانس معمولی و مکان هندسی امپدانس ظاهری فاز به زمین دیده شده مربوط به یکی از فازها را در طی نوسان توان، از زمان $t=8.2 \text{ sec}$ تا زمان $t=8.6 \text{ sec}$ نشان می دهد. در شکل (۶)، برای مشاهده بهتر نحوه حرکت امپدانس ظاهری در صفحه RX، یک بازه زمانی کوچک، که در آن نوسان توان وجود دارد ولی خطایی در سیستم رخ نداده، انتخاب شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، درحالی که اتصال در سیستم وجود ندارد، امپدانس ظاهری اندازه گیری شده به ناحیه عملکرد رله دیستانس وارد شده است و می تواند باعث عملکرد ناصحیح رله دیستانس معمولی شود.



شکل (۲). ساختار هر یک از الگوهای ورودی به طبقه بند

لازم به ذکر است، مسئله بهینه سازی طبقه بند SVM برای یافتن سطح جداساز در حوزه کرنل حل خواهد شد. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، برای این منظور ابتدا باید مسئله بهینه سازی دوگان آن مطابق روابط (۳) حل شود تا از روی ضرایب لاگرانژ و شرایط KKT بتوان به مشخصات صفحه جداساز دست یافت.

۴. مطالعات عددی

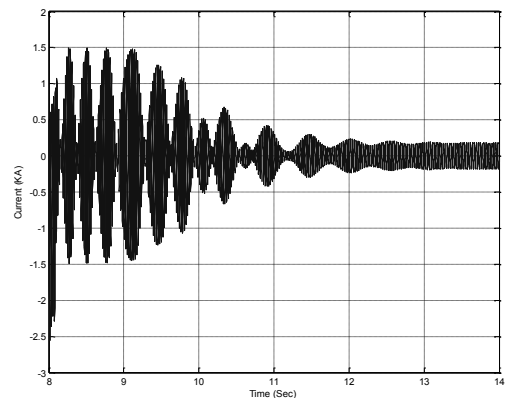
در اینجا یک سیستم نمونه دو ماشین برای انجام مطالعات و پیاده سازی الگوریتم حفاظتی پیشنهادی انتخاب شده است. شکل (۳)، دیاگرام تک خطی این سیستم به همراه مشخصات اصلی اجزای آن را نمایش می دهد. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود، بار ثابت ناچیزی در باس A و بار مصرفی دیگری که بار اصلی سیستم است در باس B در نظر گرفته شده است. رله دیستانس با الگوریتم حفاظتی پیشنهادی بر روی باس A قرار دارد و خط ۱۰۰ کیلومتری AB را حفاظت می کند. در سیستم قدرت معمولاً به منظور هماهنگی و جلوگیری از تداخل عملکرد رله های دیستانس، درصدی از امپدانس خطوط تحت حفاظت را در تنظیم نواحی حفاظتی مورد استفاده قرار می دهند؛ مثلاً ۸۰ درصد امپدانس خط اصلی تحت حفاظت را به ناحیه اول و کل امپدانس خط اصلی تحت حفاظت به علاوه ۵۰ درصد امپدانس خط مجاور را به ناحیه دوم رله اختصاص می دهند. در سیستم مورد مطالعه تنها یک رله دیستانس و تنها یک ناحیه آن در نظر گرفته شده است؛ لذا فرض می شود که رله دیستانس معمولی کل خط AB را توسط مشخصه تنظیمی ناحیه اول خود مورد پوشش قرار می دهد.

جدول (۲). حالت های مختلف خطا و نوسان توان در سیستم مورد مطالعه برای تولید الگوهای یادگیری و تست

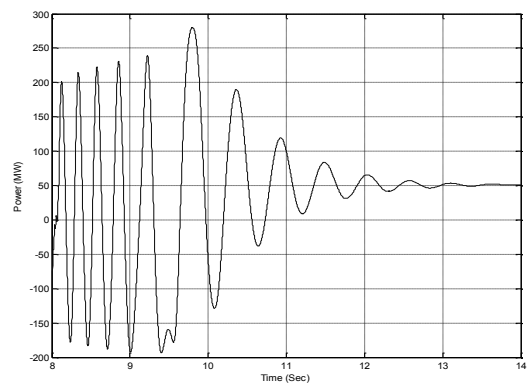
حالت مورد شبیه سازی	شرایط شبیه سازی
رخداد نوسان توان در اثر اغتشاش ناشی از اتصال کوتاه	اغتشاش شامل انواع اتصال کوتاه (تک فاز به زمین، دوفاز به هم، دوفاز به زمین، سه فاز به زمین)
	زمان های شروع اتصال از 0 تا 0.02 ثانیه در یک سیکل مرجع
	مقاومت های مختلف محل اتصال، از 0 تا 70 اهم
	توان اکتیو بار مصرفی متصل به باس B، از 20 تا 200 مگاوات
	توان راکتیو بار مصرفی متصل به باس B، از 10 تا 100 مگاوار
رخداد خطای اتصال کوتاه	محل های مختلف وقوع اتصال، شامل فواصل 1، 50 و 99 کیلومتری از رله دیستانس خط AB
	در حالت وجود نوسان توان و در حالت نبود نوسان توان
	انواع مختلف اتصال کوتاه (تک فاز به زمین، دوفاز به هم، دوفاز به زمین، سه فاز به زمین)
	زمان های شروع اتصال از 0 تا 0.02 ثانیه در یک سیکل مرجع
	مقاومت های مختلف محل اتصال، از 0 تا 70 اهم
	توان اکتیو بار مصرفی متصل به باس B، از 20 تا 200 مگاوات
	توان راکتیو بار مصرفی متصل به باس B، از 10 تا 100 مگاوار
	محل های مختلف وقوع اتصال، شامل فواصل 1، 50 و 99 کیلومتری از رله دیستانس خط AB

۴-۱. تولید الگوهای یادگیری و تست

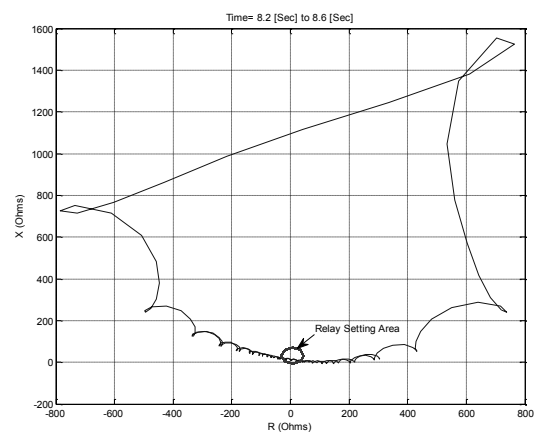
در این مرحله بر اساس سیستم نمونه مورد مطالعه، الگوهای یادگیری و تست برای طبقه بند SVM تولید می شوند. برای تولید الگو ترکیب های ممکن از حالت های مختلف خطا و نوسان توان در سیستم مورد مطالعه



شکل (۴). جریان فاز a در پی اغتشاش اتصال کوتاه سه فاز در وسط خط AB و در طی نوسان توان



شکل (۵). توان اکتیو متوسط عبوری از خط AB در پی اغتشاش اتصال کوتاه سه فاز در وسط خط AB و در طی نوسان توان



شکل (۶). مشخصه تنظیمی رله دیستانس و مکان هندسی امیداس ظاهری فاز a در طی وقوع نوسان توان

شبیه سازی شدند که این حالت ها در جدول (۲) ذکر شده اند. لازم به ذکر است، در هر سیکل ۵۰ هرتز تعداد ۱۶ نمونه از سیگنال های جریان و ولتاژ گرفته شد که این نمونه ها برای استخراج مقدار هریک از ۵ ویژگی الگوهای ورودی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت بر اساس ترکیب حالت های مختلف بیان شده در جدول (۲) تعداد ۶۳۲۸۳ الگو از نتایج شبیه سازی استخراج شد. روند استخراج الگوها در هریک از حالات شبیه سازی بدین ترتیب بود که از سیکل هایی که رله دیستانس معمولی تریپ داده است به صورت تصادفی چند الگو برای ارائه به طبقه بند SVM انتخاب شدند.

۴-۲. تعیین ساختار طبقه بند SVM

با توجه به مسئله بهینه سازی (۳)، برای طبقه بند SVM که در حوزه کرنل استفاده خواهد شد، تعیین مقدار پارامتر C و نوع تابع کرنل و همچنین تعیین مقدار پارامترهای مربوط به تابع کرنل، مهم است. باید توجه کرد که توابع کرنل ذکر شده در جدول (۱) تنها چند نمونه مشهور از این توابع است و توابع کرنل متعددی وجود دارند [۱۹] که می توان به منظور حل مسئله طبقه بندی از آن ها استفاده کرد. با توجه به عملی نبودن جست و جو بین تمامی توابع کرنل ممکن، ابتدا برای الگوهای موجود و در یک حالت خاص چند تابع کرنل مذکور در جدول (۱) را مقایسه کرده و سپس با تعیین یک نوع تابع کرنل، که از بقیه مناسب تر به نظر می رسد، به تعیین مابقی پارامترها پرداخته خواهد شد. در این راستا، ۱۰ بار به صورت تصادفی ۵۰ درصد الگوهای موجود برای یادگیری و ۵۰ درصد باقی مانده برای تست طبقه بند SVM انتخاب و تحت انواع توابع کرنل به این طبقه بند اعمال شدند. میانگین درصد طبقه بندی

صحیح داده های تست تحت انواع توابع کرنل برای مقایسه در جدول (۳) بیان شده اند. برای برقراری شرایط نسبتاً برابر، مقدار پارامتر C در این مقایسه برابر ۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر جدول (۳)، به نظر می رسد که کرنل های RBF و چند جمله ای برای حل مسئله طبقه بندی مورد نظر مناسب باشند. با توجه به اینکه درجه d مربوط به کرنل چند جمله ای معمولاً به صورت گسسته و عدد صحیح است، شاید نتوان از طریق تغییر آن دقت مطلوب طبقه بندی را به صورت دقیق تری جست و جو کرد. کما اینکه در کرنل خطی و درجه دوم که حالت خاصی از کرنل چند جمله ای است، تفاوت فاحشی به لحاظ دقت طبقه بندی مشاهده می شود. در مقابل، کرنل RBF پارامتری دارد که می توان آن را به راحتی به صورت پیوسته تغییر داده و دقت مطلوب را جست و جو کرد؛ لذا در این مسئله خاص، کرنل RBF ترجیح داده شده و در حل مسئله طبقه بندی SVM استفاده خواهد شد. کرنل RBF الگوها را به صورت غیر خطی به فضایی با بعد بالا نگاشت می کند و در مواقعی که رابطه بین ویژگی ها و برچسب کلاس ها غیر خطی است، عملکرد مناسبی خواهد داشت.

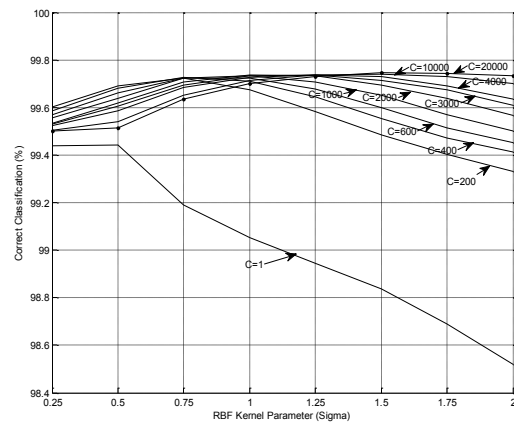
جدول (۳). میانگین درصد طبقه بندی صحیح برای چند نوع کرنل در ۱۰ تکرار انتخاب تصادفی الگوهای یادگیری و تست

نوع کرنل	مقادیر پارامتر	میانگین درصد طبقه بندی صحیح
کرنل خطی	-	83.68%
کرنل درجه دوم	-	98.51%
کرنل چند جمله ای	$d=3$	99.15%
کرنل RBF گوسی	$\sigma=1$	99.05%

64.47%	$P_1=1, P_2=-1$	کرنل MLP
--------	-----------------	----------

جدول (۴). طبقه‌بندی الگوهای تست تحت $C=20000$ و پارامتر $\sigma=1.5$ ، در ۱۰ تکرار انتخاب تصادفی الگوهای یادگیری و تست

میانگین درصد تشخیص صحیح الگوهای نوسان توان	99.852%
میانگین درصد تشخیص اشتباه الگوهای نوسان توان	0.148%
میانگین درصد تشخیص صحیح الگوهای اتصال کوتاه	99.590%
میانگین درصد تشخیص اشتباه الگوهای اتصال کوتاه	0.410%
میانگین درصد تشخیص صحیح کل الگوهای تست	99.745%
میانگین درصد تشخیص اشتباه کل الگوهای تست	0.255%



شکل (۷). میانگین درصد طبقه‌بندی صحیح بر حسب پارامتر σ و در مقادیر مختلف C ، در ۱۰ تکرار انتخاب تصادفی الگوها

در گام بعدی با تعیین کرنل RBF به عنوان تابع کرنل طبقه‌بند SVM، به تعیین پارامترهای C و σ پرداخته شده است. برای این منظور، برای مقادیر مختلف C و σ به تعداد ۱۰ تکرار و به صورت تصادفی ۵۰ درصد الگوهای موجود برای یادگیری و ۵۰ درصد باقی‌مانده برای تست طبقه‌بند SVM انتخاب و میانگین درصد طبقه‌بندی صحیح این طبقه‌بند در این حالت‌ها محاسبه شدند. شکل (۷)، نمودار تغییرات میانگین درصد طبقه‌بندی صحیح بر حسب مقادیر مختلف σ را به ازای مقدارهای مختلف پارامتر C نمایش می‌دهد.

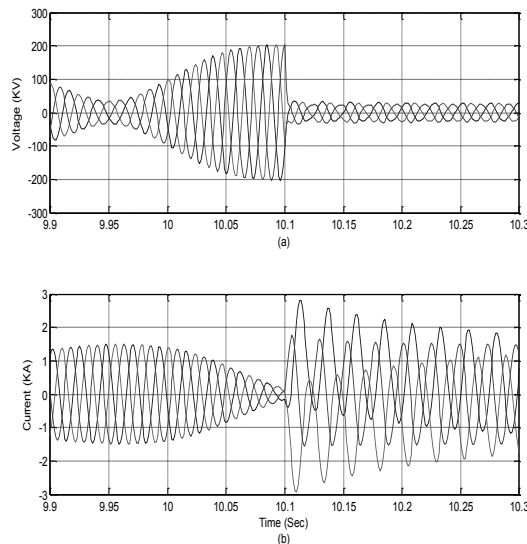
بر اساس نتایج نمایش داده‌شده در شکل (۷)، مقدار $C=20000$ و $\sigma=1.5$ بهترین نتیجه طبقه‌بندی را به دنبال داشته است. جدول (۴)، اطلاعات کامل‌تری از طبقه‌بندی تحت این مقادیر را بیان می‌کند.

از اطلاعات جدول (۴)، می‌توان دریافت که طبقه‌بند SVM مورد مطالعه تحت ساختار مذکور، درصد خطای پایینی دارد. باید دقت کرد که رله‌های دیستانس در سیستم قدرت، حفاظت پشتیبان محلی همچون رله‌های اضافه جریان و حفاظت پشتیبان دور همچون رله‌های دیستانس و اضافه جریان نصب‌شده در پست‌های مجاور دارند؛ لذا به نظر می‌رسد دقت حاصل‌شده در الگوریتم حفاظتی پیشنهادی با ترکیب ایده نواحی حفاظتی پشتیبان، درستی عملکرد قابل قبولی را برای سیستم حفاظتی در عمل ارائه دهد.

همچنین برای بهبود عملکرد طبقه‌بند SVM می‌توان بر اساس رأی‌گیری در یک پنجره زمانی مثلاً نیم‌سیکل عمل کرد. به این ترتیب که اگر در این پنجره زمانی بیشتر ورودی‌ها به عنوان نوسان توان تشخیص داده شوند، رله دیستانس بی‌حس شده و در صورتی که اکثر ورودی‌ها به

وقوع نوسان توان و خطای اتصال کوتاه را نمایش می‌دهد. شکل (۱۱)، سیگنال خروجی رله دیستانس معمولی و طبقه بند SVM و همچنین سیگنال نهایی تریپ را برای این حالت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، واحد SVM در هنگام وقوع نوسان توان از عملکرد ناخواسته رله دیستانس جلوگیری کرده است و زمانی که خطای اتصال کوتاه نامتقارن رخ داد، به‌درستی اجازه عملکرد را به رله دیستانس داده است.

بنابراین الگوریتم حفاظتی پیشنهادی برای حالت‌های آزمایش‌شده ضمن آنکه از عملکرد ناخواسته رله دیستانس در طی وقوع نوسان توان جلوگیری می‌کند، وقوع اتصال کوتاه متقارن و نامتقارن در طی نوسان توان را نیز به‌خوبی شناسایی می‌کند.



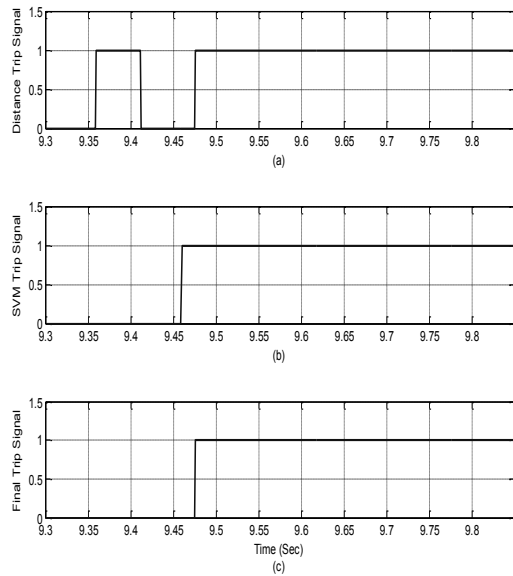
شکل (۸). نمودار (a) ولتاژ و (b) جریان سه‌فاز محل نصب رله در طی وقوع یک نمونه نوسان توان و خطای اتصال کوتاه

عنوان اتصال کوتاه شناخته شوند، رله عملکرد عادی داشته باشد. درواقع در این حالت خروجی واحد طبقه‌بند SVM بر اساس اکثریت خروجی‌های آن در یک پنجره زمانی کوچک تثبیت می‌شود.

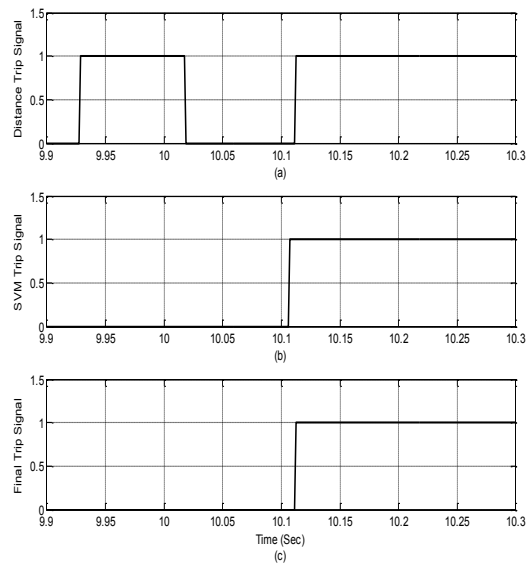
۴-۳. تست بر خط

در این مرحله برای بررسی عملکرد الگوریتم حفاظتی پیشنهادی درخصوص سیستم نمونه، تغییرات سیگنال تریپ رله دیستانس معمولی و خروجی طبقه‌بند SVM در طی وقوع نوسان توان و خطای اتصال کوتاه، بررسی می‌شود؛ به عنوان مثال، حالتی را در نظر بگیرید که نوسان توان در سیستم وجود دارد و در طی نوسان توان، خطای اتصال کوتاه سه فاز در وسط خط AB رخ دهد. شکل (۸)، نمودار جریان و ولتاژ در طی وقوع نوسان توان و خطای اتصال کوتاه را نمایش می‌دهد. شکل (۹)، سیگنال خروجی رله دیستانس معمولی و طبقه‌بند SVM و همچنین سیگنال نهایی تریپ را برای این حالت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، واحد SVM در هنگام وقوع نوسان توان از عملکرد ناخواسته رله دیستانس جلوگیری کرده است و زمانی که در $t=10.1 \text{ sec}$ خطای اتصال کوتاه رخ داده به‌درستی اجازه عملکرد را به رله دیستانس داده است.

حالتی را در نظر بگیرید که نوسان توان در سیستم وجود دارد و در طی نوسان توان، فاز a در $t=9.45 \text{ sec}$ و در وسط خط AB با مقاومت ۳۵ اهم به زمین اتصالی پیدا می‌کند. شکل (۱۰)، نمودار جریان و ولتاژ فاز a در طی



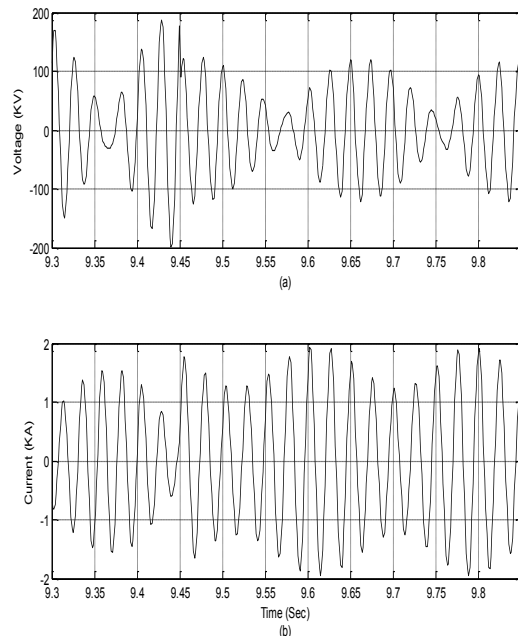
شکل (۱۱). (a) سیگنال خروجی واحد دیستانس معمولی، (b) سیگنال خروجی طبقه‌بند SVM و (c) سیگنال نهایی تریپ، مربوط به حالت شکل (۱۰)



شکل (۹). (a) سیگنال خروجی واحد دیستانس معمولی، (b) سیگنال خروجی طبقه‌بند SVM و (c) سیگنال نهایی تریپ، مربوط به حالت شکل (۸)

۴-۴. تحلیل کارایی ویژگی‌های ورودی

در این بخش، کارایی و اهمیت ویژگی‌های ورودی به صورت مستقل از طبقه‌بند SVM تحلیل و بررسی می‌شود. الگوریتم Relief یکی از ابزارهای کارآمد برای تحلیل اهمیت ویژگی‌ها در مسائل طبقه‌بندی و رگرسیونی است. این الگوریتم در دسته روش‌های تحلیل ویژگی فیلتری قرار دارد. در این الگوریتم، وزن و درجه اهمیت ویژگی‌های مختلف از طریق جست‌وجوی همسایگی‌های نزدیک نمونه‌ها به دست می‌آید. شایان ذکر است وزن مثبت بالاتر نشان‌دهنده اهمیت بیشتر ویژگی مزبور در پیش‌بینی متغیر هدف خواهد بود. همچنین ویژگی‌های با وزن منفی به عنوان ویژگی‌های نامرتب در نظر گرفته می‌شوند. جزئیات بیشتر درخصوص الگوریتم Relief در مرجع [۲۰] قابل دسترس است. در این مقاله، از الگوریتم مزبور برای تحلیل درجه اهمیت ویژگی‌های مورد استفاده در تشخیص نوسان

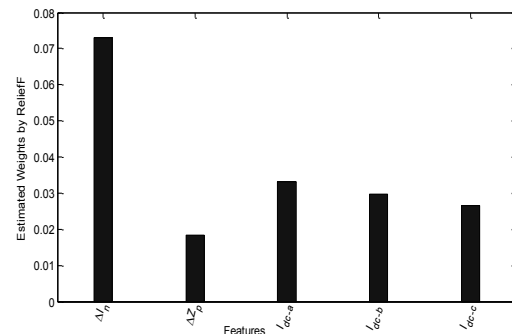


شکل (۱۰). نمودار (a) ولتاژ و (b) جریان فاز a محل نصب رله در طی وقوع یک نمونه نوسان توان و خطای اتصال.

و مسدود می‌شود. مشکلی که در استفاده از این روش وجود دارد تعیین زمان تنظیمی تایمر است؛ چون ممکن است امیدانس ظاهری در نوسانات توان فرکانس بالا سریع-تر حرکت کند و یا در هنگام وقوع اتصال کوتاه با مقاومت بالا کند حرکت کند؛ لذا تعیین یک زمان حدی خاص می‌تواند تا حدودی مشکل‌ساز باشد. همچنین برای خطوط انتقال بلند و پر بار، ناحیه بار نرمال بسیار نزدیک به ناحیه تنظیمی رله دیستانس است، و فضای کافی برای مشخصه آشکارساز نوسان توان وجود ندارد. در این شرایط رله نمی‌تواند بین خطای اتصال کوتاه و نوسان توان تفاوت قایل شود [۱، ۴]. بر اساس گزارش مطرح‌شده در مقاله [۱۶]، تکنیک بررسی سرعت حرکت مشخصه امیدانس ظاهری در 50% موارد شبیه‌سازی‌شده توانایی شناسایی نوسان توان را نداشته است. همچنین بر اساس گزارش این مقاله، این روش کلاسیک در هیچ موردی قادر به رفع انسداد رله دیستانس برای مواقع وقوع اتصال کوتاه در طی نوسان توان نبوده است. علاوه بر این در بیش از 65% موارد شبیه‌سازی‌شده، روش کلاسیک به اشتباه اتصال کوتاه فاز به زمین با مقاومت بالا را به عنوان نوسان توان شناسایی کرده است. در مقاله [۹] نیز، گزارش دیگری از عدم عملکرد صحیح روش کلاسیک مزبور در شرایط مختلف ارائه شده است که نتایج بررسی‌های مقاله [۱۶] را تصدیق می‌کند. میانگین درصد تشخیص صحیح الگوهای نوسان توان و اتصال کوتاه با استفاده از روش جدید پیشنهادی، با وجود در نظر گرفتن طیف وسیعی از شرایط مختلف در سیستم نمونه مورد مطالعه به ترتیب، برابر 99.852% و 99.590% بوده است. با عنایت به گزارش‌ها و تجربه‌های متعدد از عدم عملکرد صحیح روش کلاسیک شناسایی نوسان توان در شرایط مختلف، تصور دقت بالا برای آن مانند آنچه با اعمال روش پیشنهادی به دست آمد، دور از

توان بهره‌گیری شده است. شکل (۱۲)، وزن‌های حاصل از اجرای الگوریتم Relief بر روی دسته الگوهای تولیدی (بخش [۴-۱]) را نمایش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است، هر پنج ویژگی مورد استفاده برای شناسایی نوسان توان، اهمیت و وزن مثبت دارند که بیانگر منطقی بودن استفاده از آن‌ها به عنوان ویژگی‌های ورودی طبقه‌بند است. همچنین می‌توان دریافت که اهمیت ویژگی اول، یعنی تغییرات جریان توالی منفی (ΔI_n)، در مقایسه با چهار ویژگی دیگر بیشتر است.



شکل (۱۲). وزن و اهمیت ویژگی‌ها بر اساس الگوریتم Relief

۴-۵. مقایسه با روش کلاسیک شناسایی نوسان توان

یکی از روش‌های معمول و کلاسیک موجود در زمینه شناسایی نوسان توان، تکنیک بررسی سرعت حرکت مشخصه امیدانس ظاهری است. این روش بر اساس کندتر بودن تغییرات در پدیده نوسان توان نسبت به خطای اتصال کوتاه بنا شده است [۳]. اگر مدت زمان عبور امیدانس ظاهری از ناحیه‌ای مشخص از مقدار تنظیمی تایمر تجاوز کند، تابع تریپ برای مدت معینی غیرفعال می‌شود و به عبارت دیگر، طی یک بازه زمانی مشخص، رله بی‌حس

ذهن به نظر می‌رسد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتمی حفاظتی بر مبنای ترکیب رله دیستانس دیجیتال معمولی و طبقه‌بند SVM مطرح شد. الگوریتم حفاظتی پیشنهادی با شبیه‌سازی یک سیستم نمونه دوماشین، مورد آزمایش قرار گرفت. الگوهای یادگیری و تست طبقه‌بند SVM برای حالت‌های مختلف وقوع نوسان توان و خطای اتصال کوتاه با پردازش سیگنال‌های ولتاژ و جریان در سیستم نمونه تولید شده و با توجه به این الگوها، ساختار مناسب برای طبقه‌بند SVM و تابع کرنل مربوطه انتخاب شد. آزمایش‌های انجام‌شده بیانگر، قابلیت بالای الگوریتم پیشنهادی در تشخیص نوسان توان و همچنین شناسایی خطاهای اتصال کوتاه متقارن و نامتقارن در طی وقوع نوسان توان است.

۶. منابع

- Automation, Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden, 2003.
- [4] Machowski, J. and Nelles, D., "New Power Swing Blocking Method", 6th International Conference on Developments in PowerSystem Protection, Conference Publication No. 434, Nottingham, UK, March 1997, pp. 218-221.
- [5] Ilar, F., "Innovations in the Detection of Power Swings in Electrical Networks", Brown Boveri Review, Vol. 68, February section, 1981, pp. 87-93.
- [6] Zhu, Sh., Gu, Q. and Zheng L., "New Swing-Blocking Methods for Digital Distance Protection", IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Vol. 1, Oct 2004, pp. 587-591.
- [7] Jonsson, M. and Daalder, J., "A New Protection Scheme to Prevent Mal-Trips Due To Power Swings", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol. 2, 2001, pp. 724-729.
- [8] Moore, P.J. and Johns, A.T., "New Method of Power Swing Blocking for Digital Distance Protection", IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 1, January 1996, pp. 19-26.
- [9] Khoradshadi-Zadeh, H., "Evaluation and Performance Comparison of Power Swing Detection Algorithms", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, June 2005, pp. 1842-1848.
- [10] Yang, Q.X., et al, "Fault Identification During Power Swings with Symmetrical Component", International Conference on Energy Management and Power Delivery, Vol. 1, March 1998, pp. 108-111.
- [1] Jonsson, M., "Protection Strategies to Mitigate Major Power System Breakdowns", Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 2003.
- [2] Sanaye-Pasand, M. and Naderian Jahromi, A., "Study, Comparison and Simulation of Power system Swing detection and Prediction Methods", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, July 2003, pp. 27-32.
- [3] Hemmingsson, M., "Power System Oscillations - Detection, Estimation and Control", Ph.D Thesis, Department of Industrial Electrical Engineering and

- [15] Jiali, H., et al, "*Distance Relay Protection Based on Artificial Neural Network*", 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97, Conference Publication No. 450, Hong Kong, Vol. 2, November 1997, pp. 515–520.
- [16] Khorashadi-Zadeh, H. and Li, Z., "*A Novel Power Swing Blocking Scheme Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*", Electric Power Systems Research, Vol. 78, 2008, pp. 1138-1146.
- [17] Seethalekshmi, K., Singh, S.N. and Srivastava, S.C., "*SVM Based Power Swing Identification Scheme for Distance Relays*", IEEE PES General Meeting Minneapolis, USA, July 2010, pp. 1-8.
- [18] Scholköpfung, B., Burges, C. and Smola, A., "*Advances in Kernel Methods-Support Vector Learning*", Cambridge, MA: MIT Press, 1999.
- [19] Abe, Sh., "*Advances in Pattern Recognition- Support Vector Machines for Pattern Classification*", Springer-Verlag, 2005.
- [20] Kononenko, I. and Sikonja, M.R., "*Non-myopic feature quality evaluation with (R)ReliefF*", in Liu, H., and Motoda, H. (Eds.): "*Computational Methods of Feature Selection*" (Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2008), pp. 169–191.
- [11] Zou Qing, L.X., et al, "*A Fast Unblocking Scheme for Distance Protection to Identify Symmetrical Fault Occurring During Power Swings*", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006, pp. 1-8.
- [12] Su, B., et al, "*Fast Detector of Symmetrical Fault During Power Swing for Distance Relay*", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, June 2005, pp. 1836-1841.
- [13] Karegar, H.K. and Mohamedi, B., "*A New Method for Fault Detection during Power Swing in Distance Protection*", 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON, May 2009, pp. 230-233.
- [14] Lotfifard, S., Faiz, J. and Kezunovic, M., "*Detection of Symmetrical Faults by Distance Relays During Power Swings*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 1, Jan. 2010, pp. 81-87.