

حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت با استفاده از تبدیل S گسسته سریع و

ماشین بردار پشتیبان بهینه شده با الگوریتم زنبورعسل

امانگلدی کوچکی^{۱*}، علی اکبر عبدوس^۲، سیدقاسم میربابایی رکنی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی برق-واحد علی آبادکتول- دانشگاه آزاد اسلامی- علی آبادکتول- ایران

koochaki@aliabadiu.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران-

a.abdoos@nit.ac.ir

۳- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی برق-واحد علی آبادکتول- دانشگاه آزاد اسلامی- علی آبادکتول- ایران

sgh.rokni@gmail.com

چکیده: در این مطالعه، روش مبتنی بر تبدیل S گسسته سریع برای متمایز کردن جریان خطای داخلی از اغتشاشات دیگر در ترانسفورماتور قدرت ارائه شده است. ویژگی توابع براساس ویژگی های استخراج شده از ماتریس S و کانتورهای فرکانسی پیشنهاد شده اند. برای طبقه بندی ویژگی ها، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، توسعه داده شده و از الگوریتم بهینه سازی زنبورعسل برای انتخاب پارامترهای بهینه طبقه بندی کننده SVM استفاده شده است. برای انجام این کار، شرایط مختلفی برای خطاهای خارجی، داخلی، برقدار شدن ترانسفورماتور و سطوح مختلف اشباع ترانسفورماتورهای اندازه گیری با استفاده از نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه سازی شده اند. برای الگوسازی شرایط واقعی، جریان های دیفرانسیل به همراه نویز در نظر گرفته شده اند. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج سایر روش ها مقایسه شده اند. مقایسه نتایج نشان می دهد روش پیشنهادی نسبت به خطاهای خارجی و جریان هجومی با دقت زیادی پایدار است. همچنین، این روش از نویز تأثیر نمی گیرد و در طبقه بندی انواع شرایط مؤثر و سریع است.

واژه های کلیدی: الگوریتم بهینه سازی زنبورعسل، تبدیل S گسسته سریع، حفاظت ترانسفورماتور قدرت، ماشین بردار پشتیبان

۱- مقدمه

دیفرانسیل امپدانس پایین یکی از روش های پرکاربرد برای حفاظت ترانسفورماتور است. با وجود این، این رله ممکن است در برابر جریان هجومی ترانسفورماتور یا اشباع ترانسفورماتورهای اندازه گیری ناشی از خطاهای خارج ناحیه، دچار عملکرد اشتباه شود [۱]. برای جلوگیری از عملکرد اشتباه این رله نسبت به جریان هجومی، معمولاً از الگوریتم های مبتنی بر هارمونیک استفاده می شود. در این الگوریتم ها اگر نسبت هارمونیک های دوم یا پنجم به هارمونیک اصلی جریان تفاضلی از یک حد مشخصی فراتر رود، رله دیفرانسیل باید قفل شود تا عملکرد آن اشتباه

ترانسفورماتور قدرت یکی از مهم ترین و حیاتی ترین تجهیزات سیستم قدرت و معمولاً گران ترین تجهیز پست است؛ بنابراین حفاظت از آن اهمیت ویژه ای دارد. حفاظت

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۸

نام نویسنده مسئول: امانگلدی کوچکی

نشانی نویسنده مسئول: گروه مهندسی برق - واحد علی آبادکتول

- دانشگاه آزاد اسلامی - علی آبادکتول - ایران

می شود یا از پنجره گوسی اصلاح شده با انعطاف بیشتر [۱۷] استفاده می شود. با وجود این، بار محاسباتی این تبدیل بالاست و برای کاهش بار محاسباتی آن تلاش هایی صورت گرفته است [۱۸]. تبدیل S گسسته سریع از تکنیک های انتخاب فرکانس برای کاهش بار محاسباتی استفاده می کند و برای آنالیز سیگنال های قدرت بسیار مفید است [۱۹-۲۰]. در سال های اخیر ماشین بردار پشتیبان، ابزار قدرتمندی است که برای حل مسائل طبقه بندی و رگرسیون استفاده شده است [۲۱-۲۳].

در این مقاله، حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور با استفاده از تبدیل S گسسته سریع و ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است. برای استخراج ویژگی های سیگنال جریان دیفرانسیل از تبدیل S گسسته سریع استفاده می شود که خروجی آن، یک ماتریس دو بعدی در حوزه زمان-فرکانس است. ویژگی های استخراج شده از تبدیل S گسسته سریع از ماشین بردار پشتیبان طبقه بندی شده و عملیات تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی و یا خارجی امکان پذیر خواهد شد.

روش ارائه شده در سه مرحله مهم تحقق می یابد: شبیه سازی ترانسفورماتور قدرت برای بررسی جریان های دیفرانسیل در شرایط کاری مختلف، استخراج ویژگی از سیگنال های جریان دیفرانسیل به کمک تبدیل S گسسته سریع و طبقه بندی ویژگی های استخراج شده از ماشین بردار پشتیبان بهینه شده. در ادامه مراحل ذکر شده، داده به تفصیل توضیح داده شده است. سپس عملکرد الگوریتم ارائه شده برای شرایط کاری مختلف ارزیابی شده است.

۲- تبدیل S گسسته سریع

سیگنال جریان $X_i (i=1,2,\dots,N)$ را در نظر بگیرید که N تعداد نمونه هاست. تبدیل فوریه گسسته این سیگنال برابر است با [۱۹]:

$$Y = \text{DFT}(X_i) \\ = [y_1 \quad \dots \quad y_n \quad \dots \quad y_N] \quad (1)$$

که عناصر آن عبارت اند از:

نشود. اگرچه این رهیافت به طور گسترده در رله های تجاری استفاده می شود، ممکن است باعث تأخیر در عملکرد رله دیفرانسیل در شرایط وقوع خطای داخلی شود [۲]. از طرفی ترانسفورماتورهای مدرن به دلیل کیفیت بالای مواد هسته، نسبت هارمونیک دوم کوچک تریدارند و این موضوع احتمال عملکرد اشتباه در برابر جریان هجومی را بالا می برد [۳-۵].

برای غلبه بر مشکلات ناشی از روش های مبتنی بر هارمونیک، روش های مختلفی در سال های اخیر ارائه شده اند. در روش زاویه مرده از زمانی استفاده می شود که شکل موج جریان نزدیک به صفر است. این روش زمان تشخیص طولانی دارد [۶]. بسیاری از محققان طرح حفاظتی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی را برای تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی پیشنهاد داده اند [۷]. این روش به داده زیادی برای آموزش نیاز دارد و سرعت پایین همگرایی در حین آموزش از مشکلات آن است. تبدیل موجک ابزاری مؤثر برای آنالیز جریان دیفرانسیل و استخراج ویژگی است که استفاده زیادی داشته است [۸-۱۰]. متأسفانه شناسایی موجک مادر مناسب و تنظیم تعداد سطوح تجزیه مورد نیاز از چالش های روش های مبتنی بر آنالیز موجک هستند [۱۱]. روش های ترکیبی تبدیل موجک گسسته و شبکه های عصبی [۱۲]، منطق فازی [۱۳] و مدل های مارکوف نهان [۱۴] برای استخراج ویژگی های شکل موج جریان تفاضلی استفاده شده اند. روش های مبتنی بر منطق فازی به قوانین زیادی برای تصمیم گیری نیاز دارد و ایجاد این قوانین به کار و زمان زیادی احتیاج دارد. از طرفی، در روش های ترکیبی تبدیل موجک با شبکه عصبی یا مارکوف نهان تنظیم سطوح و معیارهای تصمیم گیری بسیار پیچیده بوده اند و برای هر تغییر جدیدی در سیستم قدرت به طراحی و ایجاد قوانین جدید و آموزش دوباره نیاز است.

تبدیل S اطلاعات لازم برای تحلیل سیگنال ها در دو حوزه زمان و فرکانس را فراهم می کند. این تبدیل، ترکیبی از تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک است [۱۵]. یکی از مشکلات تبدیل S استاندارد، پنجره گوسی است که کاهش عملکرد آن را باعث می شود؛ برای غلبه بر این موضوع، پنجره گوسی با پنجره های پربولیکی [۱۶] جایگزین

با اعمال عکس تبدیل فوریه گسسته به $G_{M \times N}$ ، ماتریس تبدیل S به دست می آید:

$$S_{M \times N} = \begin{bmatrix} s(f_1, t_1) & \dots & s(f_1, t_n) & \dots & s(f_1, t_N) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ s(f_m, t_1) & \dots & s(f_m, t_n) & \dots & s(f_m, t_N) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ s(f_M, t_1) & \dots & s(f_M, t_n) & \dots & s(f_M, t_N) \end{bmatrix} \quad (7)$$

که درایه های آن برابر است با:

$$s(m, n) = \left(\frac{2}{N}\right) \sum_{i=1}^N G(m, i) \exp(-2\pi j(n-1)(i-1)/N) \quad (8)$$

بسیاری از سطرهای ماتریس S دامنه بسیار کوچکی دارند و به صورت خطای تخمین فازور لحاظ می شوند؛ بنابراین، از محاسبه این سطرها صرف نظر می شود تا بار محاسباتی تبدیل کاهش یابد [۱۹]. در این روش عکس تبدیل فوریه گسسته به جای محاسبه برای همه فرکانس ها، تنها برای شماره های فرکانسی مشخصی لحاظ می شود [۲۰]. در سیستم های قدرت فرکانس های مطلوب مضربی از فرکانس اصلی سیستم هستند؛ بنابراین تبدیل فوریه گسسته، تنها برای فرکانس های با مضرب صحیح از فرکانس اصلی محاسبه می شود و در نتیجه حجم محاسبات کاهش می یابد.

۳- ماشین بردار پشتیبان

برای مسائل طبقه بندی، ماشین بردار پشتیبان ابر صفحه ای را می یابد که نقاط داده ها را بر طبق کلاس متناظرشان به گونه ای جدا می کند که تفکیک بین کلاس ها با ایجاد حداکثر حاشیه صورت گیرد [۲۲-۲۳]. از طرف دیگر، در مسائل مربوط به رگرسیون، ماشین بردار پشتیبان تابعی را پیدا می کند که نگاشت داده های ورودی به داده های خروجی را بر اساس اطلاعات آموزشی تقریب بزند. طبقه بندی کننده ماشین بردار پشتیبان به دو صورت خطی و غیرخطی تقسیم بندی می شود.

$$y_n = \sum_{i=1}^N x_i \exp(-2\pi j(n-1)(i-1)/N) \quad (2)$$

و $\sqrt{-1} = j$ است.

با استفاده از جابه جایی و چرخش کمیت های به دست آمده از تبدیل فوریه گسسته، ماتریس $H_{M \times N}$ به صورت زیر تشکیل می شود:

$$H_{M \times N} = \begin{bmatrix} y_2 & y_3 & \dots & y_N & y_1 \\ y_3 & y_4 & \dots & y_1 & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_M & y_{M+1} & \dots & y_{M-2} & y_{M-1} \\ y_{M+1} & y_{M+2} & \dots & y_{M-1} & y_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

که $M = \frac{N}{2}$ با در نظر گرفتن نظریه نمونه برداری نایکوئیست انتخاب می شود. مقدار N عدد صحیح زوج انتخاب می شود و در نتیجه تبدیل زمان-فرکانس در M فرکانس گسسته انجام می شود. سپس پنجره گاوسی در حوزه فرکانس برای N نمونه تشکیل می شود که یک ماتریس دو بعدی است و هر کدام از درایه های ماتریس برابرند با:

$$w(m, n) = \exp\left(-\frac{2\pi^2(n-1)^2 F}{m^2} + \exp\left(-\frac{2\pi^2(N-n+1)^2 F}{m^2}\right)\right) \quad (4)$$

که $m = 1, 2, \dots, M$ و $n = 1, 2, \dots, N$ ضریب پنجره هستند. پنجره گاوسی اصلاح شده که انعطاف بیشتری دارد به صورت زیر پیشنهاد شده است [۱۷]:

$$w(m, n) = \exp\left(-\frac{2\pi^2(n-1)^2 F}{(a + bm^c)^2} + \exp\left(-\frac{2\pi^2(N-n+1)^2 F}{(a + bm^c)^2}\right)\right) \quad (5)$$

ماتریس پنجره W در ماتریس H ضرب می شود و اطلاعات حوزه فرکانس در پنجره های مشخص به دست می آید:

$$G(m, n) = H(m, n) \times W(m, n) \quad (6)$$

این فضا که ابعاد آن افزایش یافته است، حداکثر مقدار حاشیه طبقه‌بندی‌کننده (ماشین بردار پشتیبان) با حداقل‌سازی تابع زیر به دست می‌آید.

$$v(w) = \frac{1}{2} w^T w \quad (11)$$

که قید زیر نیز باید در آن برآورده شود.

$$y_i(w^T \phi(x_i) + b) \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

۳-۳- موارد جدانشدنی

در فضای گسترده فوق هنوز هیچ تضمینی وجود ندارد که داده‌های آموزشی به‌طور خطی جداپذیر باشند. با توجه به تابع انتخاب‌شده $\phi(x)$ ، ممکن است داده‌های آموزشی کاملاً به‌طور خطی جداپذیر نباشند. در این مورد، ارضای تمامی قیود داده‌شده در معادله (۱۲) میسر نخواهد بود؛ بنابراین، به جای تابع $v(w)$ ، تابع دیگری، $v(w, \varepsilon)$ ، ارائه می‌شود [۲۲]:

$$v(w, \varepsilon) = \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \quad (13)$$

که قید زیر باید ارضا شود.

$$y_i(w^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

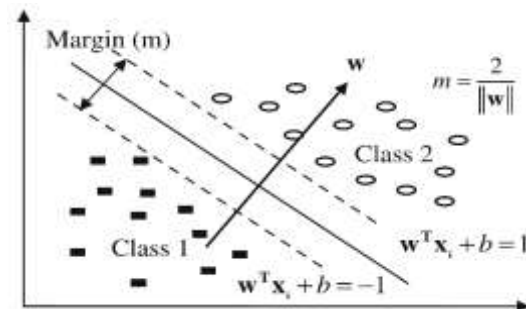
$$\varepsilon_i \geq 0 \quad (14)$$

در معادله (۱۳)، $\varepsilon_i = 1, 2, \dots, N$ متغیرهای کمکی مثبتی هستند که برای لحاظ‌کردن خطای به‌وجودآمده، استفاده می‌شوند. کمیت C ، پارامتر تنظیم‌کننده نامیده می‌شود که همواره بزرگ‌تر از صفر است. اگر پارامتر C کوچک باشد، ابر صفحه جداکننده، تمایل به بیشینه‌کردن حاشیه دارد؛ درحالی‌که مقادیر بزرگ C باعث می‌شوند که ابر صفحه جداکننده، تعداد نقاطی را به حداقل برساند که به اشتباه در کلاس مقابل قرار گرفته‌اند. بردارهایی که قیود بالا را به‌صورت تساوی ارضا می‌کنند، بردار پشتیبان نامیده می‌شوند. این بردارها، تنها بردارهایی هستند که به سطح

۳-۱- طبقه‌بندی‌کننده خطی ماشین بردار پشتیبان

مجموعه آموزشی $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$ را در نظر بگیرید که از N داده تشکیل شده است و دو کلاس دارد. x_i ، i -امین مقدار از بردار ورودی n بعدی است و y_i کلاس متناظر با x_i را نشان می‌دهد که می‌تواند مقدار ۱ یا -۱ داشته باشد. ابر صفحه‌ای که نقاط را مطابق با کلاسشان جدا می‌کند با معادله $w^T x_i + b = 0$ نشان داده می‌شود. در این معادله w و b به ترتیب بردار وزن و بایاس را نشان می‌دهند. هدف ماشین بردار پشتیبان این است که مقادیر w و b را به گونه‌ای بیابد که جداسازی بین کلاس‌ها حداکثر شود؛ برای مثال، نقاط دو کلاس و ابر صفحه جداکننده در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. حاشیه جداسازی با (۹) بیان می‌شود [۲۳]:

$$m = \left\| \frac{2}{w} \right\| \quad (9)$$



شکل (۱): ابر صفحه جداکننده دو کلاس

۳-۲- طبقه‌بندی‌کننده غیرخطی ماشین بردار

پشتیبان

در کاربردهای عملی و واقعی تمامی مسائل طبقه‌بندی به‌طور خطی جداپذیر نیستند. برای حل این‌گونه مسائل، نوع غیرخطی ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است که در آن داده‌های آموزشی به فضایی با ابعاد بزرگ‌تر انتقال می‌یابند. بدین منظور، تبدیل غیرخطی زیر برای انتقال به کار گرفته می‌شود.

$$\phi(x) = \{\phi_1(x) \dots \phi_m(x)\} \quad m > x \quad (10)$$

با به‌کارگیری این تبدیل غیرخطی، داده‌های جدانشدنی ممکن است در این فضای گسترده‌تر جدانشدنی شوند. در

۳-۴- تعیین پارامترهای بهینه ماشین بردار پشتیبان

با الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل

برای طبقه‌بندی مؤثر و صحیح نیاز است که بردار ورودی با استفاده از یک تبدیل غیرخطی به یک فضای با ابعاد بزرگ‌تر نگاشته شود. در عمل، این تبدیل غیرخطی به طور غیر مستقیم با به‌کارگیری توابع معروف کرنل انجام می‌گیرد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲].

$$K(x_i, x_j) = \phi(x_i)^T \phi(x_j) \quad (21)$$

رایج‌ترین تابع کرنل به کار گرفته شده، تابع پایه شعاعی است:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-g \|x_i - x_j\|^2\right), \quad g > 0 \quad (22)$$

کاربر باید پارامترهای C و g را تعیین کند. انتخاب پارامترها نقش اساسی در عملکرد صحیح ماشین بردار پشتیبان دارد. در حال حاضر، هیچ روش مشخصی برای تعیین مقدار C ، انتخاب تابع کرنل و مشخص کردن پارامترهای توابع کرنل وجود ندارد؛ در نتیجه، مناسب‌ترین تابع کرنل و مقادیر پارامترهای تابع کرنل و مقدار پارامتر C با روش سعی و خطا تعیین می‌شود. در این تحقیق برای تعیین مقادیر پارامترها از الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل استفاده شده است.

این الگوریتم با الهام از زندگی طبیعی زنبورهای عسل [۲۴]، نوشته شده است. زنبورهای اکتشاف به صورت تصادفی گلزارها را جست‌وجو می‌کنند و وقتی به آشیانه بازمی‌گردند، پس از قراردادن شهد خود در محل، به طبقه رقص رفته و با حرکات چرخشی در خصوص میزان، مکان و کیفیت گلزار مربوطه به دیگران اطلاعات می‌دهند. سپس زنبورهای کارگر به سمت گل‌ها برای جمع‌آوری سریع و مؤثر غذا می‌روند. این زنبورها با بازگشت به آشیانه، دوباره در خصوص گلزار مدنظر اطلاعات می‌آورند؛ از این حیث که آیا منبع غذا هنوز به اندازه کافی مناسب است یا خیر. این کار برای به دست آوردن بیشترین غذا همچنان ادامه می‌یابد. برای پیاده‌سازی این الگوریتم، جمعیت اولیه با مقادیر تصادفی تولید می‌شوند که با رابطه (۲۳) تعیین می‌شوند.

تصمیم‌گیری و یا ابر صفحه جداکننده بستگی دارند. معادله فوق با استفاده از اصل لاگرانژ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$L(w, b, \varepsilon, \alpha, \eta) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right) - \sum_{i=1}^N \alpha_i (y_i (w^T \phi(x) + b) - 1 + \varepsilon_i) - \sum_{i=1}^N \eta_i \varepsilon_i \quad (15)$$

که شرایط زیر باید ارضا شود:

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = w - \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \phi(x_i) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varepsilon_i} = C - \alpha_i - \eta_i = 0$$

که در آن $\alpha_i \geq 0$ و $\eta_i \geq 0$ متغیرهای کمکی لاگرانژ هستند. با اعمال شرایط فوق، مسئله بهینه‌سازی زیر به دست خواهد آمد.

Maximize :

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\phi(x_i) \phi(x_j)) \quad (17)$$

$$0 < \alpha_i < C$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (18)$$

x_i هایی که برای آنها $\alpha_i > 0$ هستند، بردار پشتیبان انتخاب می‌شوند. به طور کلی، بردارهای پشتیبان، تعداد کمی از داده‌های آموزشی را شامل می‌شوند. سپس ابر صفحه جداکننده به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$\sum_{SV} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b = 0 \quad (19)$$

که SV بردارهای پشتیبان هستند. پس طبقه‌بندی‌کننده غیرخطی به صورت زیر است.

$$y = \text{sign} \left(\sum_{SV} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right) \quad (20)$$

۴- روش پیشنهادی برای تشخیص جریان

خطای داخلی از جریان هجومی و خارجی

ترانسفورماتور

در روش پیشنهادی، در ابتدا ترانسفورماتور سه فاز برای انواع خطاهای داخلی و خارج ناحیه حفاظتی و شرایط مختلف برقرار کردن ترانسفورماتور شبیه‌سازی می‌شود. انواع خطاها در لحظات مختلف و برای مقاومت‌های گوناگون خطا در شرایط بارگذاری مختلف شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین جریان هجومی مغناطیس‌کننده برای لحظات مختلف کلیدزنی، با در نظر گرفتن شار پسماند ایجاد می‌شود.

مرحله مهم و حیاتی در روش‌های الگوشناسی، استخراج ویژگی‌های مهم از اطلاعات مشاهده‌شده در حالات و شرایط مختلف است. ترکیب چندین داده عددی، یک بردار ویژگی را به وجود می‌آورد. ویژگی‌های استفاده‌شده در این روش با به‌کارگیری آنالیز تبدیل S گسسته سریع استخراج شده‌اند. این تبدیل از یک پنجره گوسین استفاده می‌کند که عرض آن متناسب با فرکانس تغییر می‌یابد؛ بنابراین یک وضوح خوب زمان-فرکانسی به دست می‌دهد. خروجی این تبدیل یک ماتریس $N \times M$ است که ردیف‌های آن بیان‌کننده زمان و ستون‌های آن متناظر با فرکانس هستند؛ بنابراین برای لحظات زمانی مختلف، اندازه دامنه و فاز محتویات فرکانسی سیگنال مشخص می‌شود. بنابراین سیگنال‌های بررسی‌شده از نوع نایستا هستند. تبدیل S سریع به‌طور موثری برای بررسی و استخراج ویژگی‌های مهم آنها به‌کار گرفته می‌شود.

از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مشاهده می‌شود، برای جریان‌های خطا، سطح اول در اطراف فرکانس پایه (۵۰ هرتز) تمرکز یافته است؛ اما جریان هجومی مغناطیس‌کننده و خطای خارجی دارای هارمونیک‌هایی با فرکانس بالاتر نسبت به جریان خطا هستند. جریان خطای داخلی برخلاف جریان هجومی و خطای خارجی الگوی منظم‌تری دارند و فرکانس‌های بالای آن نسبت به فرکانس اصلی دامنه کوچک‌تری دارند. در انتها، چهار ویژگی با استفاده از کانتور فرکانس و ماتریس S به‌صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$X_{j,0}^i = rand_j[0,1](X_j^{(u)} - X_j^{(L)}) + X_j^{(L)} \quad (23)$$

$$i = 1, \dots, NP; j = 1, 2$$

که $rand_j[0,1]$ عدد تصادفی توزیع‌شده یکنواخت در بازه $[0,1]$ است که برای هر j (تعداد متغیرها که در این مسئله g, C هستند) انتخاب می‌شود. در هر تولید بردار کاندید جدید با نمونه‌گیری تصادفی و ترکیب بردارها از تولید قبلی با رابطه (۲۴) ایجاد می‌شود.

$$U_{j,G}^i = \begin{cases} X_{j,G-1}^{r3} + F(X_{j,G-1}^{r1} - X_{j,G-1}^{r2}) & ; \\ & \text{if } (rand_j[0,1] \leq CR) \\ X_{j,G-1}^i & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

که $CR \in [0,1]$ و $F \in [0,2]$ پارامترهای کنترل هستند و در طول بهینه‌سازی ثابت نگه داشته می‌شوند. $r1, r2, r3 \in \{1, \dots, NP\}$ و $r1 \neq r2 \neq r3 \neq i$ بردارهای انتخاب‌شده تصادفی هستند که از تولید قبلی ایجاد شده‌اند و یا یکدیگر و نیز با بردار شاخص i متفاوت هستند. بردار جمعیت تولیدشده جدید X_G از بردارهای تولید قبلی X_{G-1} و بردارهای کاندید با رابطه (۲۵) تعیین می‌شود.

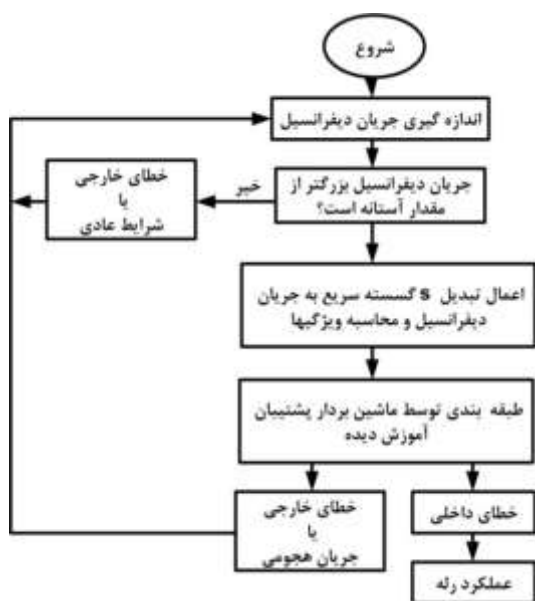
$$X_G^i = \begin{cases} U_G^i, & \text{if } : f(U_{G-1}^i) \leq f(U_G^i) \\ U_{G-1}^i, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

که $f(U_G^i)$ مقدار تابع هدف در تولید G ام است. در این موضوع هدف تعیین مقدار بهینه برای پارامترهای ماشین بردار پشتیبان (C و g) برای بالابردن دقت طبقه‌بندی است؛ بنابراین تابع هدف با متوسط دقت طبقه‌بندی در حین آموزش تعیین می‌شود [۲۵].

$$Fitness = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{l_T^i}{l^i} \times 100\% \right) \quad (26)$$

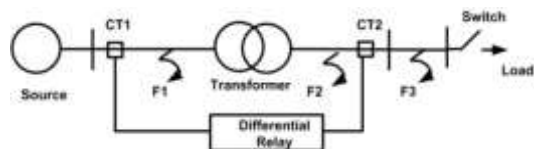
برای m مجموعه آموزشی، l^i برابر تعداد کل مجموعه‌های ارزیابی‌شده تا مرحله i ام و l_T^i تعداد مجموعه‌های ارزیابی‌شده با طبقه‌بندی صحیح هستند. با بهینه‌شدن مقدار تابع هدف مقادیر بهینه پارامترهای طبقه‌بندی‌کننده به دست می‌آید.

از خطاها بررسی شوند. کلید قدرت سمت اولیه در لحظات مختلف، عمل وصل منبع به ترانسفورماتور را برای انجام شبیه‌سازی جریان هجومی مغناطیس‌کننده انجام می‌دهد. کلید قدرت سمت ثانویه نیز بار متصل به ترانسفورماتور را کنترل می‌کند.



شکل (۲): الگوریتم عملکرد رله دیفرانسیل با استفاده از ماشین بردار پشتیبان تبدیل S گسسته سریع

داده‌های مربوط به ترانسفورماتورهای قدرت شامل ساختار هسته، سطح ولتاژ، توان نامی، فرکانس نامی، نوع اتصالات، تلفات بی‌باری و مسی و راکتانس‌های نشستی در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. در جدول (۲) برای الگورکدن اثر اشباع هسته ترانسفورماتورهای قدرت، داده‌های مربوط به منحنی مغناطیس‌شوندگی ارائه شده است که ولتاژ و جریان مغناطیس‌کننده در حالت بی‌باری ترانسفورماتور را شامل می‌شود.



شکل (۳) سیستم شبیه‌سازی شده

ویژگی ۱: سطح زیر کانتور فرکانس؛

ویژگی ۲: سطح محصور بین فرکانس ۰ تا ۴۰۰ هرتز در کانتور فرکانس؛

ویژگی ۳: انرژی کانتور سطح اول؛

ویژگی ۴: شاخص ارائه شده که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Index = R_1 \times R_2 \times M_1 / (M_2 \times M_5) \quad (27)$$

R_1 و R_2 بیان‌کننده نسبت انرژی تمامی سطوح به سطوح اول و دوم هستند. M_1 و M_2 و M_5 به ترتیب دامنه مؤلفه اصلی، هارمونیک دوم و پنجم هستند.

در ادامه برای تفکیک این ویژگی‌ها از ماشین بردار پشتیبان استفاده می‌شود. همان‌گونه که توضیح داده شد، ماشین بردار پشتیبان پارامترهای مختلفی دارد که دقت طبقه‌بندی‌کننده به انتخاب صحیح آنها وابسته است. در این تحقیق، مقادیر متغیرها با الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل انتخاب شده‌اند.

برای تعیین مقادیر بهینه C و g و قدرت تفکیک‌پذیری بالا، نمونه‌های مختلف از خطاهای داخلی و خارجی و جریان هجومی شبیه‌سازی می‌شوند و مقادیر بهینه پارامترهای طبقه‌بندی‌کننده، به کمک الگوریتم زنبور عسل در حین آموزش به دست می‌آیند. الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خطای داخلی از خطاهای خارجی و هجومی در شکل (۲) نشان داده شده است.

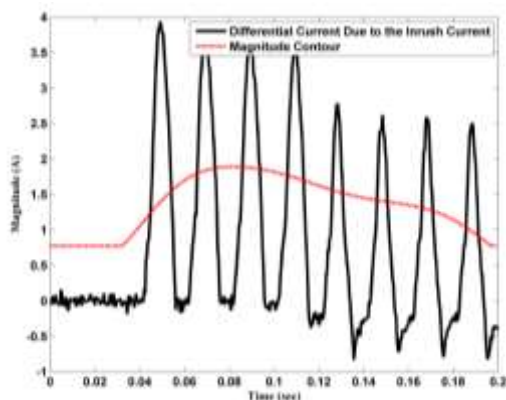
۵- سیستم قدرت و ترانسفورماتور مورد مطالعه

مطالعه

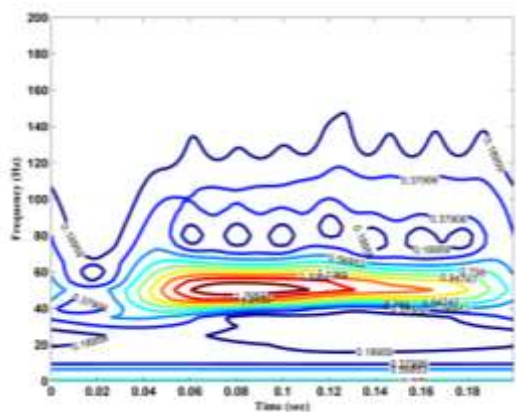
در شکل (۳) سیستم قدرت شبیه‌سازی شده نشان داده شده است که ترانسفورماتور قدرت سه فاز با نسبت تبدیل ۲۳۰/۶۳ کیلو ولت با اتصال ستاره / مثلث و ظرفیت ۱۶۰ مگاوات آمپر و ترانسفورماتورهای جریان مربوط به آن را شامل می‌شود. ناحیه حفاظتی بین ترانسفورماتورهای جریان محدود می‌شود. منابع جریان نیز در سمت فشارقوی برای الگورکدن شار پسماند به کار گرفته شده‌اند. خطاهای مختلف نیز در داخل ناحیه حفاظتی و خارج از آن برای مقاومت‌های مختلف خطا اعمال شده است تا طیف وسیعی

۵-۱- استخراج بردارهای ویژگی

در این تحقیق، یک سیکل از شکل موج جریان دیفرانسیل برای آنالیز استفاده می‌شود. هر سیکل ۵۰ نمونه دارد؛ یعنی فرکانس نمونه برداری برابر با $50 \times 50 = 2/5 \text{ kHz}$ است. از ماتریس S، مشخصات مهمی از جمله دامنه، فرکانس و فاز استخراج می‌شود. شکل ۴-الف سیگنال جریان هجومی مربوط به فاز A و شکل موج‌های استخراج شده از ماتریس S را نشان می‌دهد. کانتور دامنه مکان هندسی نقاطی است که بیشترین دامنه را در یک لحظه زمانی دارد که در شکل ۴-ب به صورت نقطه چین نشان داده شده است. شکل ۴-ب کانتورهای ماتریس S را نشان می‌دهد که در واقع، اطلاعات کامل و نمایش واضحی از سیگنال اصلی است. شکل ۴-ج نیز کانتور فرکانسی را نشان می‌دهد که بیان کننده ماکزیم دامنه فرکانس‌های موجود در سیگنال آنالیز شده است. نسبت هارمونیک دوم به هارمونیک اصلی نیز در شکل ۴-د نمایش داده شده است.



۴-الف- جریان هجومی (-) کانتور دامنه (...



۴-ب-نمایش کانتور ماتریس S

جدول (۱): مشخصات ترانسفورماتور قدرت مورد مطالعه

ولتاژ نامی اولیه (برحسب کیلوولت)	۲۳۰
ولتاژ نامی ثانویه (برحسب کیلوولت)	۶۳
قدرت ظاهری (برحسب مگاوات آمپر)	۱۶۰
فرکانس نامی (برحسب هرتز)	۵۰
راکتانس نشتی (برحسب پریونیت)	۰/۱۴
تلفات بی باری (برحسب پریونیت)	۰/۰۰۲
تلفات مسی (برحسب پریونیت)	۰/۰۰۴
نوع اتصال اولیه	ستاره
نوع اتصال ثانویه	مثلث
نوع ساختار هسته	زهری

جدول (۲): داده‌های مربوط به منحنی مغناطیس شونده‌گی هسته

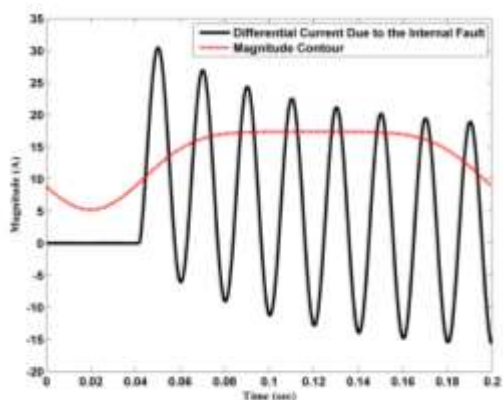
ترانسفورماتور قدرت

ولتاژ (برحسب پریونیت)	جریان (برحسب درصد از جریان نامی)
۰	۰
۰/۳	۰/۰۲۱
۰/۷۸۱	۰/۰۳۰۸
۰/۹۶۲	۰/۰۵۴
۱/۰۲۲	۰/۰۸۰۶
۱/۰۵۲	۰/۱۰۶۴
۱/۰۸۲	۰/۱۷۷۴
۱/۱۱۲	۰/۳۲۲
۱/۱۷۲	۱/۷۷
۱/۳	۱۲۵

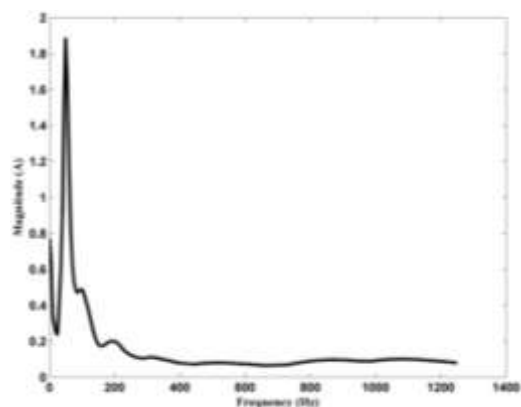
تمامی ترانسفورماتورهای جریان، کلاس دقت 5P20 دارند و حداکثر بار نامی آنها ۳۰ ولت آمپر است. مشخصات مربوط به ساختار ترانسفورماتورهای جریان نصب شده در دو طرف ترانسفورماتور قدرت در جدول (۳) داده شده‌اند.

جدول (۳): مشخصات ترانسفورماتورهای جریان

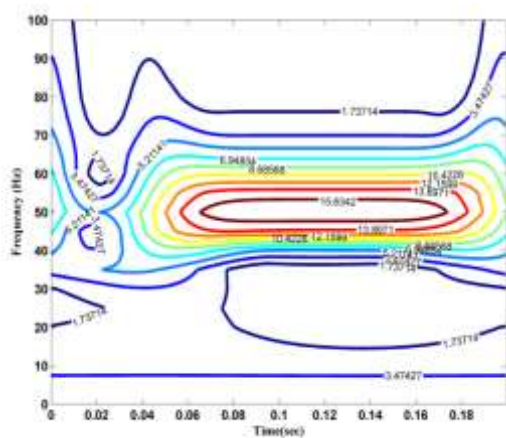
فشار ضعیف	فشار قوی	ترانسفورماتور جریان
نسبت تبدیل - آمپر	۶۰۰/۱	۲۰۰۰/۱
سطح مقطع هسته-متر مربع	$32/9 \times 10^{-4}$	$10/36 \times 10^{-4}$
طول مسیر هسته - متر	۰/۸۴۸	۰/۵۴۸
سطح ولتاژ- کیلو ولت	۲۳۰	۶۳
مقاومت سیم پیچ ثانویه- اهم	۴/۳	۷/۷۷



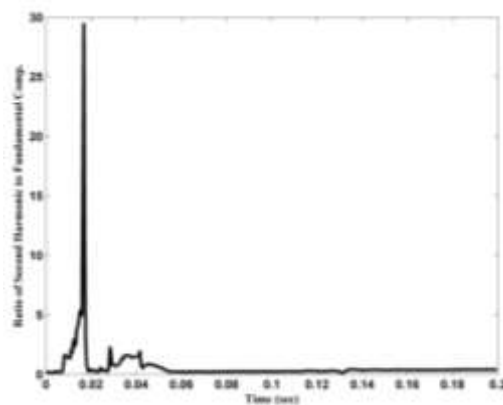
۵- الف - جریان خطا (-) کانتور دامنه (**)



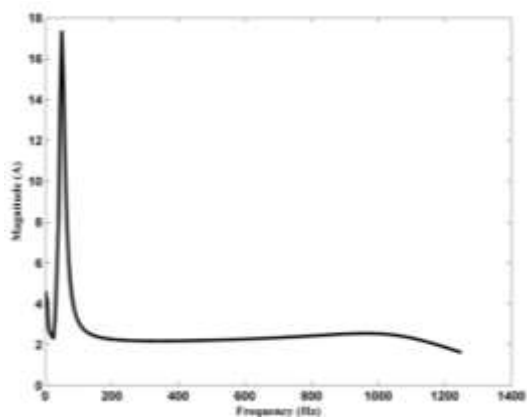
۴- ج - کانتور فرکانس



۵- ب - کانتور ماتریس S



۴- د - نسبت هارمونیک دوم به هارمونیک اصلی

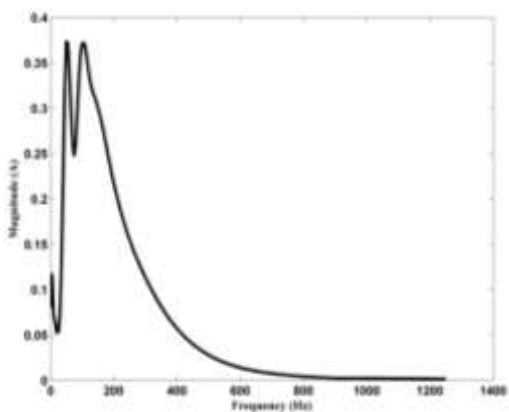


۵- ج - کانتور فرکانس

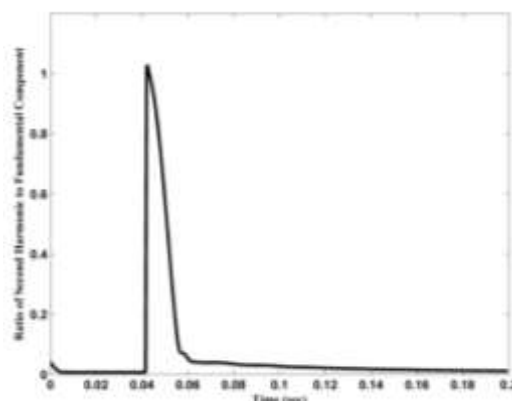
شکل (۴): شکل موج جریان دیفرانسیل فاز A در حین برقرار کردن ترانسفورماتور و شکل موجهای استخراج شده از تبدیل S گسسته سریع

به طور مشابه اشکال کانتورهای معرفی شده بالا برای جریان دیفرانسیل فاز A در حین خطای داخلی و خطای خارجی در حالت اشباع شدید ترانسفورماتور جریان به ترتیب در اشکال (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند.

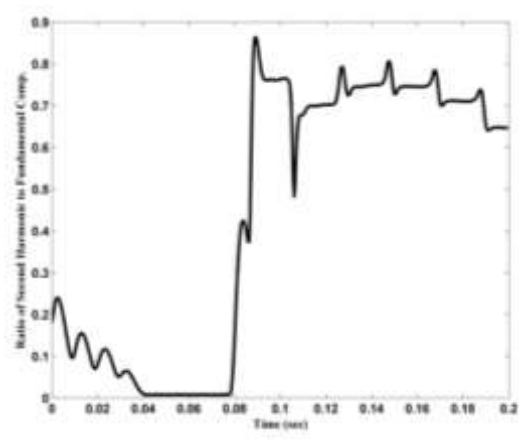
حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت با استفاده از تبدیل S گسسته سریع و ماشین بردار پشتیبان...



۶-ج- کانتور فرکانس

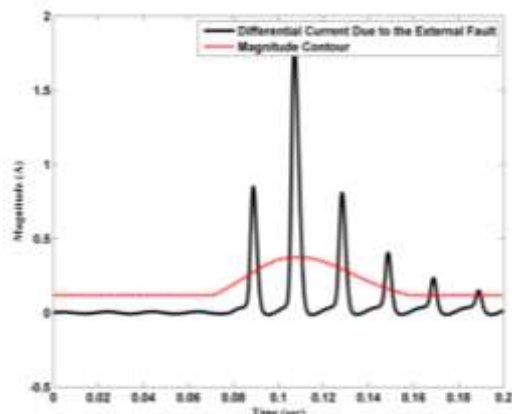


۵-د- نسبت هارمونیک دوم به هارمونیک اصلی



۶-د- نسبت هارمونیک دوم به هارمونیک اصلی

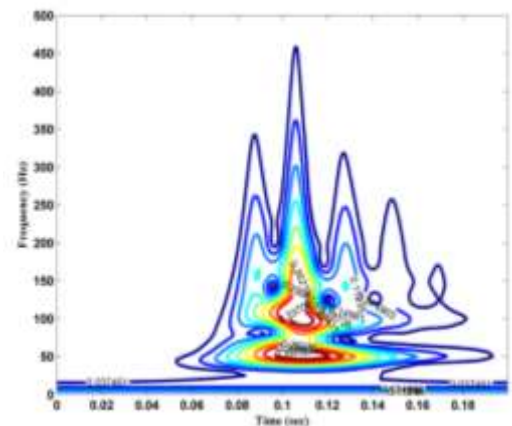
شکل (۵): شکل موج جریان دیفرانسیل فاز A در حین خطای داخلی و شکل موج های استخراج شده از تبدیل S گسسته سریع



۶-الف- جریان خطا (-) کانتور دامنه (**)

شکل (۶): شکل موج جریان دیفرانسیل فاز A در حین خطای خارجی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان و شکل موج های استخراج شده از تبدیل S گسسته سریع

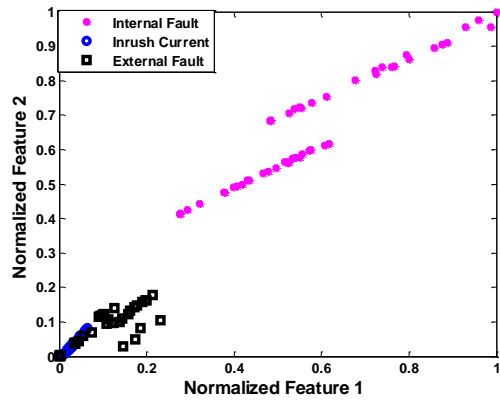
برای هر سیگنال ۹ کانتور برای ماتریس S در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل ۵-ب دیده می شود، برای جریان های خطا، سطح اول در اطراف فرکانس اصلی تمرکز یافته است؛ اما همان طور که در کانتور ماتریس S در اشکال ۴ و ۶-ب دیده می شود، جریان هجومی مغناطیس کننده و خطای خارجی، هارمونیک هایی با فرکانس بالاتر نسبت به جریان خطا دارند. جریان خطای داخلی برخلاف جریان هجومی و خطای خارجی، الگوی منظم تری دارند و فرکانس های بالای آن نسبت به فرکانس اصلی، دامنه کوچکتری دارند.



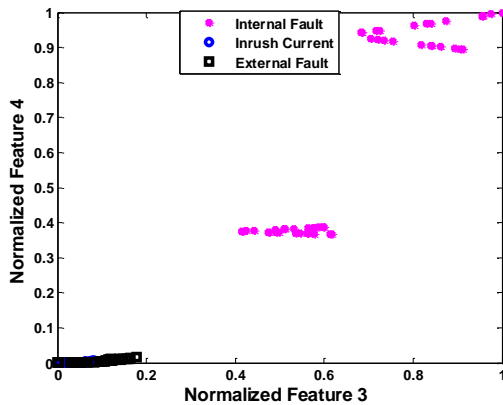
۶-ب- کانتور ماتریس s

۵-۲- بهینه‌سازی طبقه‌بندی کننده

برای بالابردن قدرت تفکیک‌پذیری ماشین بردار پشتیبان و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای C و g، ۱۲۰ نمونه مختلف از خطاهای داخلی و خارجی و جریان هجومی، شبیه‌سازی می‌شوند و مقادیر بهینه پارامترهای طبقه‌بندی‌کننده، به کمک الگوریتم زنبورعسلدر حین آموزش به دست آمده‌اند. نمودار همگرایی تابع هدف در شکل (۷) نشان داده شده است. در نهایت، مقادیر C و g به ترتیب ۶۴۰۰۰۰ و ۲ انتخاب می‌شوند.



۸-الف- ویژگی ۱ در برابر ۲



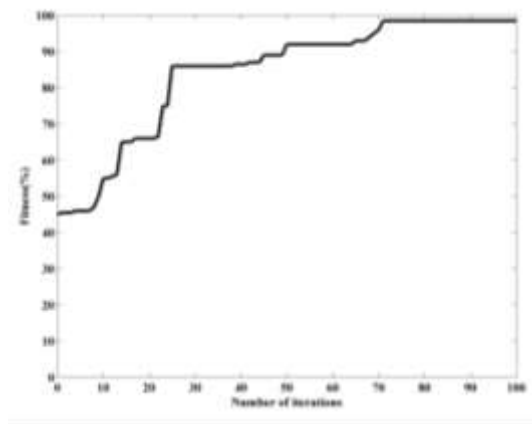
۸-ب- ویژگی ۳ در برابر ۴

شکل (۸): عملکرد طبقه‌بندی‌کننده در برابر ویژگی‌ها

۵-۳- بررسی عملکرد روش پیشنهادی به عنوان

حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور

برای ارزیابی روش پیشنهادی، ترانسفورماتور قدرت برای خطاهای داخلی و خارجی و جریان هجومی با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آن شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق ۱۰۰ نمونه از هر یک از شرایط ذکر شده (۳۰۰ نمونه) برای آموزش و ۵۰ مورد برای تست در نظر گرفته شده‌اند. برای خطای داخلی یک کلاس و برای خطای خارجی و جریان هجومی یک کلاس مجزای دیگر در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با توجه به تفکیک‌پذیری ویژگی‌ها، خطای داخلی به درستی از خطای خارجی و جریان هجومی مغناطیس‌کننده تشخیص داده شده



شکل (۷): نمودار همگرایی تابع هدف

بر اساس پارامترهای بهینه به دست آمده، ۳۰۰ نمونه دیگر از شرایط مختلف خطای داخلی، خارجی و جریان هجومی شبیه‌سازی شده و برای آموزش طبقه‌بندی‌کننده بهینه شده، استفاده می‌شود. برای نشان دادن قدرت تفکیک‌پذیری ویژگی‌های استخراج شده و انتخاب پارامترهای مناسب طبقه‌بندی‌کننده، در شکل (۸) مقادیر نرمالیزه شده ویژگی‌های محاسبه شده برای ۵۰ نمونه مختلف از خطای داخلی و خارجی و جریان هجومی به صورت دو به دو رسم شده‌اند. شکل ۸-الف نمایش ویژگی ۱ در مقابل ویژگی ۲ را نشان می‌دهد که در آن خطای داخلی در ناحیه‌ای قرار می‌گیرد که از خطای خارجی و جریان هجومی کاملاً مجزا شده است. از طرف دیگر با رسم ویژگی ۳ در برابر ویژگی ۴ در شکل ۸-ب، نتایج مشابهی به دست می‌آید. با توجه به قدرت تفکیک‌پذیری بالای ویژگی‌های استخراج شده، طبقه‌بندی‌کننده ماشین بردار

حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت با استفاده از تبدیل S گسسته سریع و ماشین بردار پشتیبان...

برای خطای داخل ناحیه در کمتر از نصف سیکل عملکرد داشته است.

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج شبیه سازی های مشابهی مقایسه شده اند که در مراجع [۳ و ۲۶-۲۹] ارائه شده اند. جدول (۴) مقایسه دقت در تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی و خطای خارجی را نشان می دهد.

جدول (۴) مقایسه دقت روش ها

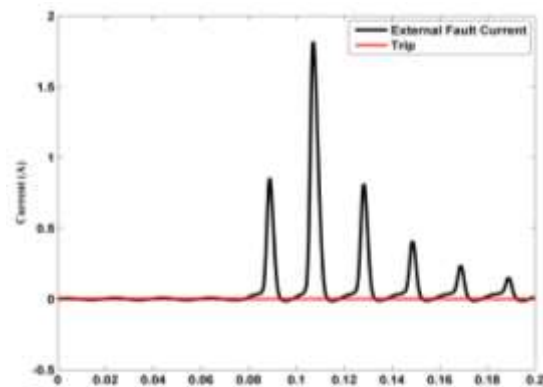
روش های طبقه بندی و استخراج ویژگی	دقت در تشخیص خطا
ANN [۲۶] بدون اثر نویز	۹۷٫۸۲٪
RBFN [۲۷] بدون اثر نویز	۹۸٫۱۱٪
FBPNN [۲۸] بدون نویز	۱۰۰٪
DWT+GMM [۲۹]	کمتر از ۱۰۰٪
ST+PNN [۳]	۱۰۰٪
روش پیشنهادی	۱۰۰٪

همان طور که جدول (۴) نشان می دهد دقت روش های ANN و RBFN و DWT+GMM بدون در نظر گرفتن اثر نویز کمتر از ۱۰۰٪ گزارش شده است؛ در حالی که در روش پیشنهادی اثرات نویز لحاظ شده است و دقت زیادی دارد. همچنین روش پیشنهادی برای تشخیص و طبقه بندی جریان خطا از جریان هجومی و یا خطای خارجی تنها به استخراج چهار ویژگی نیاز دارد و نسبت به روش های دیگر ذکر شده، پیاده سازی آسان تر و بار محاسباتی کمتری دارد.

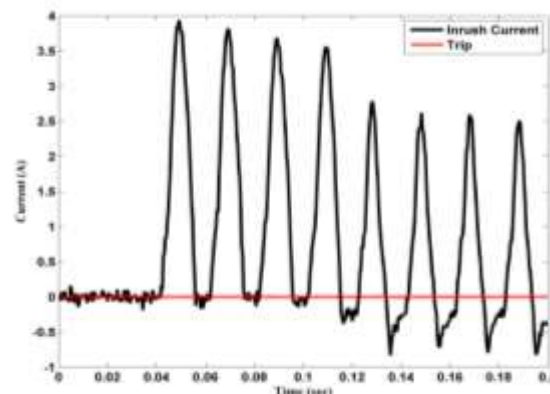
۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، روش مؤثر برای تشخیص خطای داخلی از خطاهای خارجی و جریان هجومی مغناطیس کننده در ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. در طرح حفاظتی ارائه شده تشخیص خطای داخلی با روش ترکیبی پردازش سیگنال و هوش مصنوعی صورت می گیرد. سیگنال های جریان دیفرانسیل با تبدیل S گسسته سریع به عنوان ابزار پردازش فرکانس زمانی مؤثر آنالیز شده اند. با استخراج ویژگی های برتر از شرایط کاری مختلف ترانسفورماتور

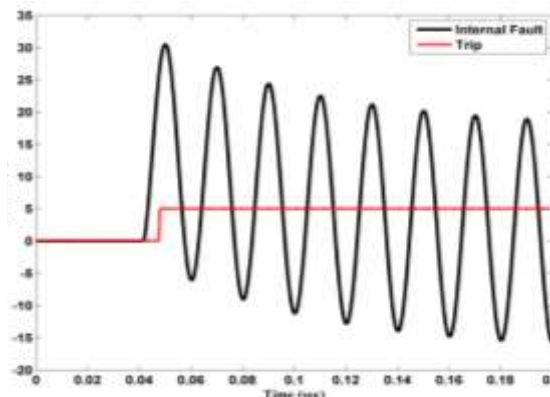
است. شکل های (۹)، (۱۰) و (۱۱) وضعیت عملکرد رله را در شرایط مختلف تست نشان می دهند.



شکل (۹): وضعیت سیگنال تریپ در شرایط خطای خارجی به همراه اشباع CT



شکل (۱۰): وضعیت سیگنال تریپ در شرایط جریان هجومی



شکل (۱۱): وضعیت سیگنال تریپ در شرایط خطای داخلی

همان طور که از اشکال پیداست رله دیفرانسیل در شرایط خطای خارجی و جریان هجومی پایدار بوده است و

- on Optimal Probabilistic Neural Network", IEEE Trans. Power Del., Vol. 25, No. 1, pp. 102–112, 2010.
- [8] Vahidi, B., Ghaffarzadeh, N., Hosseinian, S. H., "A Wavelet-Based Method to Discriminate Internal Fault from Inrush Currents Using Correlation Coefficient", Int. J. Elect. Power Energy Syst., Vol. 32, No. 7, pp. 788–793, 2010.
- [9] Gaouda, A. M., Salama, M. M., "DSP Wavelet-Based Tool for Monitoring Transformer Inrush Current and Internal Fault", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1258–1267, 2010.
- [10] Medeiros, R.P., Costa, F.B., Silva, K.M., "Power Transformer Differential Protection Using the Boundary Discrete Wavelet Transform", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 31, No. 5, pp. 2083–2095, 2016.
- [11] Moravej, Z., Abdoos, A. A., Sanaye Pasand, M., "Power Transformer Protection Using Improved S-transform", Electric Power Components and Systems, Vol. 39, No. 1, pp. 1151–1174, 2011.
- [12] Geethanjali, M., Slochanal, S.M.R., Bhavani, R., "A Novel Approach for Power Transformer Protection Based Upon Combined Wavelet Transform and Neural Networks (WNN)", Seventh Int. Power Engineering Conf., pp. 1–6, 2005.
- [13] Hoang Viet, N., Tuan Dung, N., "New Approach for Classifying Transient Phenomena in Power Transformer Using Discrete Wavelet Transforms (DWT) and Fuzzy Logic", Int. Symp. on Electrical and Electronics Engineering, pp. 261–265, HCM City, Vietnam, 2007.
- [14] Jazebi, S., Vahidi, B., Hosseinian, S. H., "A Novel Discriminative Approach Based on Hidden Markov Models and Wavelet Transform to Transformer Protection", Simulation, Vol. 86, No. 2, pp. 93–107, 2010.
- [15] Komar, R., Singh, B., Shahani, D.T., Chandra, A., Alhaddad, K., "Recognition of Power Quality Disturbances Using S-Transform-Based ANN Classifier and Rule-Based Decision Tree", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 51, No. 2, pp. 1249–1258, 2015.
- [16] Pinnegar, C. R., Mansinha, L., "The S-Transform with Windows of Arbitrary and Varying Shape", Geophysics, Vol. 68, No. 1, pp. 381–385, 2003.
- [17] Dash, P. K., Samantaray, S. R., Panda, G., Panigrahi, B. K., "Time-Frequency Transform Approach for Protection of Parallel Transmission Lines", Inst. Eng. Technol. Gen. Transm. Distrib., Vol. 1, No. 1, pp. 30–38, 2007.
- [18] Stockwell, R. G., "A Basis for Efficient Representation of The S-Transform", Digital Signal Process., Vol. 17, No. 1, pp. 371–393, 2007.
- [19] Krishnanand, K. R., Dash, P. K., "A New Real-Time Fast Discrete S-Transform for Cross-Differential Protection of Shunt-Compensated Power Systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 28, No. 1, pp. 402–410, 2013.
- [20] Dash, P. K., Das, S., Moirangthem, J., "Distance Protection of Shunt Compensated Transmission Line Using a Sparse S-Transform", IET Generation Transmission & Distribution, Vol. 9, No. 12, pp. 1264–1274, 2015.

قدرت، ماشین بردار پشتیبان به عنوان هسته طبقه‌بندی‌کننده، آموزش داده شده و سپس برای بررسی عملکرد آن با داده‌های دیده‌نشده تست شده است.

در مواردی مانند خطای داخلی به همراه اشباع ترانسفورماتورهای جریان که در آن روش‌های مبتنی بر هارمونیک دوم عملکردی ندارند، الگوریتم ارائه‌شده به تشخیص خطای داخلی پیش از به اشباع‌رفتن ترانسفورماتورهای جریان قادر است. از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهند در حین برقدارشدن ترانسفورماتورهای قدرت و حتی اشباع ترانسفورماتورهای جریان که به عملکرد نادرست رله دیفرانسیل درصدی منجر می‌شود، روش هوشمند ارائه‌شده به خوبی کار تفکیک خطا را انجام می‌دهد. علاوه بر این، الگوریتم هوشمند ارائه‌شده در شرایط خطای خارجی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان، هیچ‌گونه عملکردی ندارد. از طرفی، روش پیشنهادی، سرعت تشخیص زیادی دارد و از نویز تأثیر نمی‌گیرد.

مراجع

- [1] Heathcote, M. J., The J & P Transformer Book, A Practical Technology of the Power Transformer, 13th ed. Oxford, U.K.: Elsevier Sci. Technol. Books, 2007.
- [2] Dashti, H., Sanaye-Pasand, M., "Power Transformer Protection Using a Multiregion Adaptive Differential Relay", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 29, No. 2, pp. 777–785, 2014.
- [3] Moravej, Z., Abdoos, A. A., and Sanaye-Pasand, M., "New Approach Based on S-Transform for Discrimination and Classification of Inrush Current from Internal Fault Currents Using Probabilistic Neural Network", Electric. Power Compon. Syst., Vol. 38, No. 10, pp. 1001–1018, 2010.
- [4] Ahmadyfard, A. R., Banejad, M., Rasoulpoor, M., "A Correlation Based Method for Discriminating Inrush Current from Short Circuit Current Using Wavelet Transform in Power Transformer Differential Protection", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 39–54, 2013.
- [5] Shin, M. C., Park, C. W., Kim, J. H., "Fuzzy Logic-Based Relaying for Large Power Transformer Protection", IEEE Trans. Power Del., Vol. 18, No. 3, pp. 718–724, 2003.
- [6] Zhang, H., Wen, J.F., Liu, P., Malik, O. P., "Discrimination Between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers Using Short Time Correlation Transform", Electrical power and energy system, Vol. 24, No. 7, pp. 557–562, 2001.
- [7] Tripathy, M., Maheshwari, R. P., Verma, H. K., "Power Transformer Differential Protection Based

- [25] Ren, Y., Bai, G., "Determination of Optimal SVM Parameters by Using GA/PSO", *Journal of Computers*, Vol. 5, No. 8, pp.1160-1168, 2010.
- [26] Moravej, Z., "Evolving Neural Nets for Protection and Condition Monitoring of Power Transformer", *Electric. Machines Power System*, Vol. 33, No.11, pp.1229-1236, 2005.
- [27] Moravej, Z., "Minimal Radial Basis Function Neural Network Based Differential Protection of Power Transformer", *Eur. Trans. Elect. Power*, Vol. 14, No.4, pp.235-245, 2004.
- [28] Tripathy, M., Maheshwari, R. P., and Verma, H. K., "Neuro- Fuzzy Technique for Power Transformer Protection", *Electric Power Compo. Syst.*, Vol. 36, No.3, pp.299-316, 2008.
- [29] Jazebi, S., Vahidi, B., Hosseinian, S. H., and Faiz, J., "Magnetizing Inrush Current Identification Using Wavelet Based Gaussian Mixture Models", *Simulation, Model Practice Theory*, Vol.17, No.6, pp.991-1010, 2009.
- [21] Refan, M. H., Dameshghi, A., Kamarzarrin, M., "Best Subset Selection of GPS Satellites Using Hybrid PSOSVM Algorithm to Increase Positioning Accuracy", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol.6, No.4, pp.63-76, 2016.
- [22] Bufler, T.D., Narayanan, R.M., "Radar Classification of Indoor Targets Using Support Vector Machines", *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 10, No.8, pp.1468-1476, 2016.
- [23] Matic-Cuka, B., Kezunovic, M., "Islanding Detection for Inverter-Based Distributed Generation Using Support Vector Machine Method", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol.5, No.6, pp.2676-2686, 2014.
- [24] Karaboga D., Akay B., "A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.2, No.14, pp. 108-132. 2009.