

ارائه روش جدیدی جهت شناسایی بر خط انواع خطاهای سیم بندی داخلی در

ترانسفورماتور قدرت با استفاده از شبکه ی عصبی احتمالاتی

سلیمان حاجی آقاسی^۱، حسین پایدارنیا^۲، کریم عباسزاده^۳ و فاطمه معتبریان^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

Shajiaghasi@gmail.com

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

h.paydarnia@gmail.com

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

abbaszadeh@ee.kntu.ac.ir

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

fateme.moatabarian@gmail.com

چکیده: با توجه به نیاز روز افزون قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت و هوشمندسازی شبکه‌ها و همچنین با نظر به اینکه، ترانسفورماتورها یکی از اجزای اصلی سیستم‌های انتقال و توزیع می باشند، اهمیت پایش وضعیت برخط این تجهیزات در سیستم قدرت امری انکار ناپذیر است. در این مقاله روش جدیدی برای پایش و شناسایی بر خط انواع خطاهای داخلی ترانسفورماتور براساس شار نشتی ارائه شده است. با وقوع خطای سیم پیچی در ترانسفورماتور تقارن شارها از بین رفته و سبب افزایش یا کاهش شار نشتی می شود که با توجه به مکان و شدت خطا میزان تغییرات این شارها متفاوت خواهد بود و می توان از این تغییرات در شناسایی خطا استفاده کرد. در این مقاله برای اندازه گیری شارهای نشتی و شناسایی خطا از کویل‌های جستجو گر که بر روی سیم پیچ‌های فشار قوی نصب شده اند، استفاده شده است. برای شناسایی و کلاس بندی خطاها از شبکه عصبی احتمالاتی استفاده شده است و جهت پایش برخط وضعیت ترانسفورماتور، از تبدیل PCA استفاده شده است. نتایج شبیه سازی با استفاده از نتایج تست آزمایشگاهی تایید شده و کارایی روش پیشنهادی را تایید می کنند.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتور، خطای سیم پیچی داخلی، کویل جستجوگر، شبکه عصبی احتمالاتی

۱- مقدمه

افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، پایش عناصر مختلف شبکه امری اجتناب ناپذیر است. ترانسفورماتورهای قدرت نقشی اساسی در سیستم‌های الکتریکی دارند به نحوی که عملکرد صحیح آنها بر قابلیت اطمینان و امنیت سیستم قدرت اثر مستقیم دارد. از این رو بررسی عملکرد ترانسفورماتورهای قدرت برای شناسایی خطای سیم پیچی در مراحل آغازین اهمیت می یابد.

درصد خطاهای مختلفی که امکان رخ دادن آنها در ترانسفورماتورها وجود دارد در شکل (۱) آورده شده

با گسترش شبکه‌های انتقال و توزیع توان الکتریکی و

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۰۲/۰۶

نام نویسنده مسؤول : سلیمان حاجی آقاسی

نشانی نویسنده مسؤول : ایران - تهران - دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی - دانشکده برق

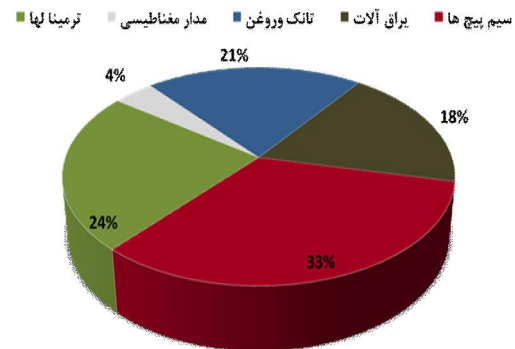
می‌گردد. به دلیل اینکه تاثیر این نوع خطاها در مراحل آغازین در جریان‌های خط اولیه و ثانویه ترانسفورماتور بسیار کم است و لذا امکان استفاده از فیوز و یا رله دیفرانسیل برای شناسایی این خطاها وجود ندارد [۲]. بنابراین اگر خطاهای سیم پیچی در مراحل اولیه تشخیص داده شوند امکان برنامه ریزی برای جایگزینی و یا تعمیرات ترانسفورماتور فراهم می‌شود.

روش‌های مبتنی بر تجزیه و تحلیل گازهای نامحلول (DGA) به منظور تعیین عملکرد ترانسفورماتور به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷-۳]. نسبت گازهای ناشی از تجزیه ی عایق و روغن ایجاد شده در دماهای مختلف می‌تواند برای شناسایی خطای ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گیرد. روش نسبت راجرز و دونرگر برای ایجاد نسبت گازها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با آموزش شناساگرهای هوشمند و با استفاده از این نسبت‌ها می‌توان بسیاری از خطاها را رصد کرد [۸]. ایراد اصلی روش‌های مبتنی بر تجزیه و تحلیل گازهای نامحلول، *offline* بودن و هزینه بالای این روش‌ها است چرا که پس از گسترش خطاهای سیم پیچی اولیه و عملکرد وسایل حفاظتی چنین روش‌هایی کارایی نخواهند داشت.

روش تحلیل پاسخ فرکانسی به عنوان یکی از روش‌های تشخیص خطا ترانسفورماتورهای قدرت بر این اصل استوار است که هر سیم‌پیچی ترانسفورماتور، تابع تبدیل و پاسخ فرکانسی مخصوص به خود را دارد که به تغییرات در ساختار سیم‌پیچی، اعم از تغییرات اجزاء مقاومتی، اندوکتانسی و خازنی که در نتیجه وقوع خطاهای داخلی در ترانسفورماتور ایجاد می‌شوند، حساس است [۹-۱۱]. روش پاسخ فرکانسی نیز روشی *offline* و نیازمند تجهیزات مورد نیاز جهت انجام تست‌های خاص است. اگر چه در سال‌های اخیر تحقیقاتی در رابطه با استفاده از این روش در تحلیل برخط ترانسفورماتورهای قدرت انجام شده است اما همچنان این روش با چالش‌هایی مانند عدم تشخیص مکان و نوع خطا روبرو است [۱۲].

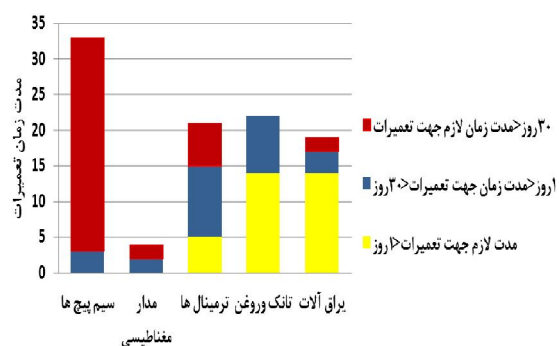
روش دیگری که در تشخیص خطاهای سیم پیچی داخلی کاربرد دارد استفاده از تحلیل لرزش ترانسفورماتور است چرا که با وقوع خطای سیم پیچی

است با توجه به شکل مشخص است که ۳۳ درصد از کل خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور به خطاهای سیم پیچ‌های ترانسفورماتور می‌باشد [۱].



شکل (۱): درصد مربوط به خطاهای مختلف در ترانسفورماتور

مدت زمان لازم جهت تعمیرات ترانسفورماتور در صورت وقوع خطاهای ذکر شده در بالا در شکل (۲) آورده شده است. با توجه به نمودار بالا، ۳۳٪ از خطاهای سیم پیچی به احتمال ۳۰٪، مدت زمان تعمیرات آنها، بیشتر از ۱ ماه است. بنابراین پایش بر خط وضعیت ترانسفورماتور، به منظور پایش وضعیت سیم پیچ‌های آن، اهمیت ویژه‌ای دارد.



شکل (۲): درصد مربوط به خطاهای مختلف در ترانسفورماتور

خطاهای سیم پیچی ماهیتی تشدید شونده دارد و معمولاً در اثر ضعف عایقی ایجاد می‌شود. با بروز نخستین نقاط اتصال کوتاه سیم بندی حرارت موضعی شدیدی در محل اتصال کوتاه ایجاد می‌شود. گرمای ناشی از این حرارت موجب تضعیف عایق سیم بندی و گسترش خطا

نشستی در حالت خطا یکی از دیگر روش‌هایی است که برای شناسایی خطا در ترانسفورماتورها از آن استفاده می‌شود [۲۳]. تغییر شار ناشی باعث ایجاد نیروهای الکترومغناطیسی در راستای محوری و شعاعی می‌شود [۲۴-۲۵]. همچنین در [۲۶-۲۷] جریان هجومی و راه کارهای تفکیک جریان هجومی از خطاهای داخلی بررسی شده است.

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص برخط انواع خطاهای سیم پیچی داخلی و پایش ترانسفورماتور بر مبنای تغییرات شار ناشی ارائه شده است. ابتدا انواع خطاهای سیم پیچی داخلی بر روی یک ترانسفورماتور ۵۰ کیلوولت آمپر مدل شده است. همچنین از ۴ کویل جستجوگر به منظور اندازه‌گیری تغییرات شار ناشی در ترانسفورماتور حامل خطا استفاده شده است. برای تایید نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نتایج حاصله با نتایج تست آزمایشگاهی مقایسه و تایید شده‌اند.

برای تشخیص و کلاس بندی انواع خطاهای رومونیک‌های موجود در ولتاژ القاشده روی کویل‌های جستجوگر با استفاده از تبدیل فوریه به دست آمده و پس از استخراج ویژگی‌های بارز توسط تبدیل مولفه ی اصلی، شناسایی توسط شبکه ی احتمالاتی انجام شده است.

۲- مدل سازی و شبیه سازی خطای سیم پیچی ترانسفورماتور

در این مقاله برای مدل سازی دقیق رفتار ترانسفورماتور از روش المان محدود دوبعدی استفاده شده است. مشخصات کامل ترانسفورماتور مورد مطالعه در پیوست A آورده شده است برای مدل سازی بخش مغناطیسی ابعاد دقیق با استفاده از ترانسفورماتور موجود در آزمایشگاه به دست آمده و در قسمت مغناطیسی نرم افزار مدل سازی شده است. برای مدل سازی و شبیه سازی از نرم افزار ماکسول استفاده شده است. برای محاسبه کمیت‌های مختلف در ترانسفورماتور تحت خطا ابتدا با استفاده از رابطه (۱) بردار پتانسیل مغناطیسی در هسته و سیم پیچ‌ها و در هر مش محاسبه شده و سپس کمیت‌های دیگر، مانند جریان، ولتاژ و سایر

داخلی به دلیل افزایش نیروهای الکترومغناطیسی میزان لرزش ترانسفورماتور افزایش می‌یابد. اما استفاده از این روش به دلیل پیچیده بودن تحلیل لرزش در ترانسفورماتورها به خطاهای معدودی محدود شده است [۱۳-۱۴].

یکی از روش‌های تشخیص خطا با استفاده از سیگنال جریان، روش مؤلفه‌های توالی منفی می‌باشد. ایده استفاده از این روش به عنوان شاخصی برای تشخیص خطا و عیب‌یابی ماشین‌های الکتریکی، به موتورهای القایی باز می‌گردد. از این روش در سال‌های اخیر برای تشخیص آنالین خطاهای سیم پیچی داخلی استفاده شده است [۱۵-۱۶]. اگر چه استفاده از این روش امکان تشخیص وقوع خطا را در ترانسفورماتورها به صورت برخط ایجاد می‌کند اما مکان خطا و میزان شدت خطا با این روش قابل تشخیص نخواهد بود. همچنین در این روش باید از اندازه‌گیری سیگنال‌های جریان خط ترانسفورماتور استفاده کرد که در کاربردهای عملی دشوار خواهد بود.

در سال‌های اخیر استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی جهت تشخیص خطاهای داخلی ترانسفورماتور قدرت بر اساس آنالیز گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور انجام شده است. در این روش با توجه به اینکه روش‌های نسبی، تمام رنج‌های اطلاعات را پوشش نمی‌دهند و فقط تعداد محدودی از کدهای تشخیص خطا را شامل می‌شوند، از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تشخیص خطای ترانسفورماتور استفاده شده است [۱۷-۱۹].

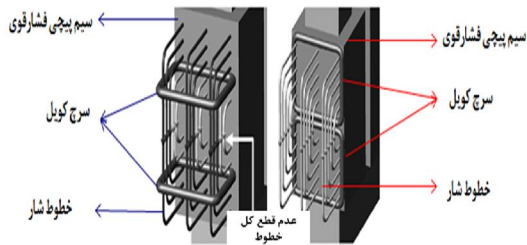
روش فازی نیز یکی از روش‌ها در تشخیص خطاهای ترانسفورماتور است. برای استفاده از نظریه اطلاعات فازی، بایستی یک مجموعه فازی بر اساس سیستم تشخیص خطا ساخته شود. نکته بسیار مهم، تنظیم کردن توابع عضویت فازی بر اساس روش‌های DGA موجود و تجربیات است [۲۰-۲۱].

یک مزیت استفاده از سیستم تشخیص فازی، حساس نبودن به خطاها در نمونه‌های روغن در ذخیره‌سازی و فرآیند تست است و یک اشکال آن وابستگی و محدود بودن به روش‌های DGA قراردادی و عدم یادگیری از نمونه داده‌ها بصورت مستقیم است [۲۲].

روش پایش رفتار ترانسفورماتور بر مبنای تغییر شار

کمیت‌ها محاسبه می شود.

روش‌های مختلفی وجود دارد دو نمونه از این روش‌ها در شکل (۴) آورده شده است با توجه به شکل مشخص است که در روش اول تمامی خطوط شار از کویل‌های جستجوگر عبور می‌کند لذا از روش ۱ برای نصب کویل‌های جستجوگر استفاده شده است. برای هر کویل جستجوگر ۱۰۰ دور در نظر گرفته شده است و نمره سیم کویل‌های جستجوگر ۱، در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): روش‌های قرار دادن کویل‌های جستجوگر بر روی سیم پیچ‌های فشار قوی

شماره کویل‌های جستجوگر قرار داده شده بر روی فازها و مکان هر کویل جستجوگر در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): شماره ونحوه ی قرار گرفتن کویل‌های جستجوگر

مکان کویل جستجوگر	شماره کویل جستجوگر
پایین فاز A	Sca1
بالای فاز A	Sca2
پایین فاز C	Scc1
بالای فاز C	Scc2

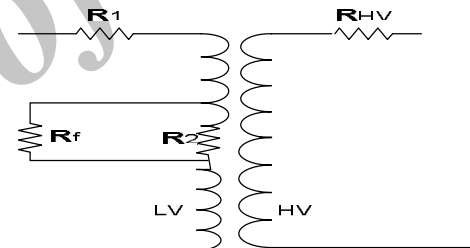
۳- نتایج شبیه سازی

ابتدا شبیه سازی برای حالت کاری سالم ترانسفورماتور انجام شده است. شکل (۵) جریان سمت فشار قوی ترانسفورماتور را نشان می دهد. مشخص است که جریان هجومی درحالت راه اندازی به دلیل خاصیت غیرخطی هسته بوجود می آید و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی جریان هجومی میرا شده و به حالت ماندگار می رسد. جریان سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور درحالت ماندگار در شکل (۶) نشان داده شده است.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = J_s \quad (1)$$

$$\nabla \cdot A = 0$$

برای مدل سازی موقعیت، شدت و درصد خطاهای مختلف از قسمت الکتریکی نرم افزار استفاده شده است شکل (۳) مدل یک خطای دور به دور درست اولیه ترانسفورماتور را نشان می دهد که R1 مقاومت الکتریکی قسمت سالم سیم پیچی فشار ضعیف و R2 مقاومت الکتریکی قسمتی از سیم پیچ است که خطا در آن قسمت رخ داده است. R_{HV} مقاومت الکتریکی سیم پیچ فشار قوی است و R_f مقاومت خطا است که در واقع مدل کننده مقاومت عایقی سیم پیچ‌های اتصال کوتاه شده است.



شکل (۳): مدل الکتریکی درحالت خطای دوره دور فشار ضعیف

در نرم افزار ماکسول معادلات الکتریکی و مغناطیسی به طور همزمان حل می شوند و امکان مدل سازی خاصیت غیرخطی هسته نیز وجود دارد. منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور تحت آزمایش با استفاده از اطلاعات شرکت سازنده به دست آمده است.

برای بررسی نحوه ی تغییر شارهای نشتی و شناسایی خطاهای سیم پیچی در ترانسفورماتور از ۴ کویل جستجوگر که ۲ کویل جستجوگر بر روی سیم پیچ فشار قوی فاز A و ۲ کویل جستجوگر بر روی سیم پیچ فشار قوی فاز C نصب شده اند استفاده شده است.

برای نصب کویل‌های جستجوگر بر روی سیم پیچ‌ها

خطوط شار برای حالت عملکرد سالم در شکل (۱۰الف) آورده شده است.

دروضعیت کاری سالم ترانسفورماتور، شارنشتی سهم بسیار اندکی از مجموع شار مغناطیسی پیوندی را به خود اختصاص می‌دهد و خطوط شار با عبور از فضای بین سیم پیچی هادرجهت محوری شارش میابند. قانون القای فارادی بیان می‌کند که نیروی محرکه القایی در یک حلقه معادل با تغییرات شار الکترومغناطیسی در داخل آن حلقه می‌باشد، بطوریکه در فرکانس‌های ثابت، میزان شار الکترومغناطیسی ورودی به حلقه، به مقدار نیروی محرکه القایی در ترمینال‌های دو سر حلقه بستگی دارد. بنابراین هنگام اتصال کوتاه شدن حلقه مفروض، ولتاژ دو سر حلقه افت می‌کند و به تبع آن جریان گردشی ایجاد شده در حلقه‌های اتصالی، شار ورودی به حلقه را محدود می‌نماید.

مطابق با قانون لنز، جهت جریان گردشی در حلقه‌های اتصالی باید به نحوی باشد که با عامل به وجود آورنده خود یعنی شار الکترومغناطیسی ورودی مخالفت نماید. در بررسی یک حالت ایده آل زمانی که یک حلقه با هدایت الکتریکی کامل از طریق امپدانس خطای صفر اتصال کوتاه می‌شود، ولتاژ معادل صفر در ترمینال‌های حلقه اتصالی برقرار و از این رو هیچ شاری از داخل حلقه عبور نمی‌کند. بدیهی است که به هر میزان هدایت الکتریکی حلقه کمتر و امپدانس خطا بیشتر شود، حلقه مفروض خطوط شار الکترومغناطیسی بیشتری را از خود عبور خواهد داد و بالعکس. در هر صورت محدودیت ورود شار مغناطیسی به داخل حلقه‌های اتصالی، باعث تمرکز بیشتر شارنشتی در اطراف حلقه‌های اتصالی و از بین رفتن توزیع متقارن شار مغناطیسی در ترانسفورماتور می‌گردد که علت تغییر ولتاژ القا شده بر روی کویل‌های جستجوگر در حالت خطا همین موضوع است. در این مقاله از تغییر ولتاژ القا شده بر روی کویل‌های جستجوگر به دلیل تغییر شارنشتی جهت شناسایی بر خط خطاهای سیم پیچی داخلی ترانسفورماتور استفاده شده است.

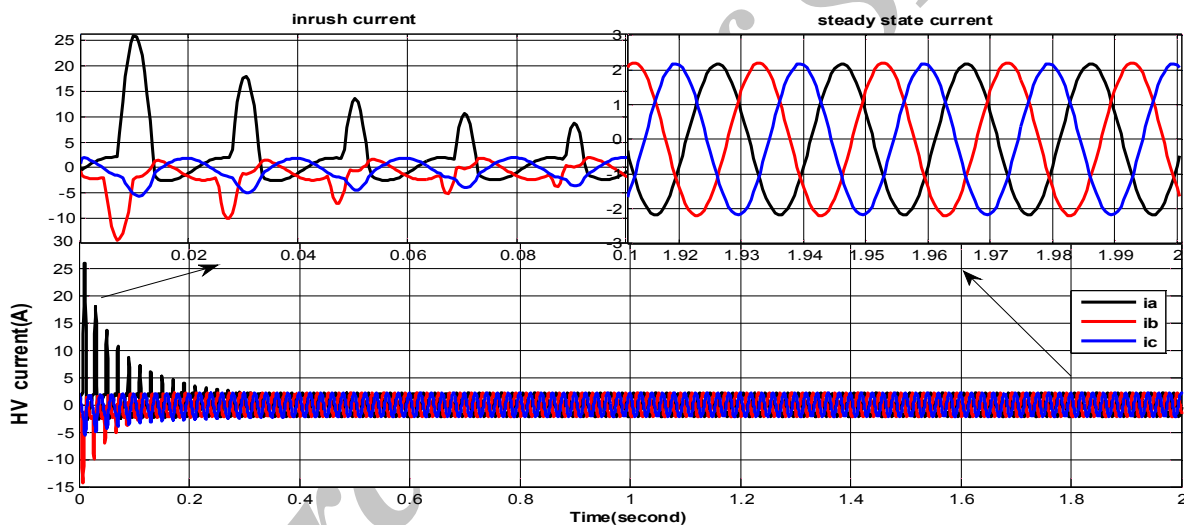
ولتاژ القا شده بر روی کویل‌های جستجوگر در حالت عملکرد سالم ترانسفورماتور در شکل (۷) نشان داده شده است، با توجه به شکل مشخص است مقدار ولتاژ القا شده در هر کویل به لحاظ دامنه برابر است و به لحاظ فازی اختلاف فاز ولتاژهای کویل جستجوگر بالایی و پایینی هر فاز ۱۸۰ درجه است که به دلیل بسته شدن مسیر شار از بالا به پایین هسته است.

در ادامه شبیه سازی برای یک خطای ۳ دوری در لایه اول سیم پیچی فشار ضعیف با مقاومت خطای ۵ میلی اهم انجام شده است. شکل (۸) جریان‌های سمت فشارقوی را نشان می‌دهد. باید توجه داشت در خطاهای سیم پیچی که در سمت فشار ضعیف رخ می‌دهد تنها جریان فاز و خط فشارقوی افزایش می‌یابد. جریان گردشی عبوری از سیم پیچ‌های اتصال کوتاه شده در شکل (۹) آورده شده است، مشخص است که مقدار جریان گردشی در سیم پیچ اتصال کوتاه شده با توجه به شدت خطا (مقاومت خطا) تعیین می‌شود. البته جریان گردشی فقط در سیم پیچ‌های اتصال کوتاه وجود دارد و جریان قسمت‌های دیگر بدون تغییر باقی می‌ماند و فقط وابسته به بار و ولتاژ ورودی است.

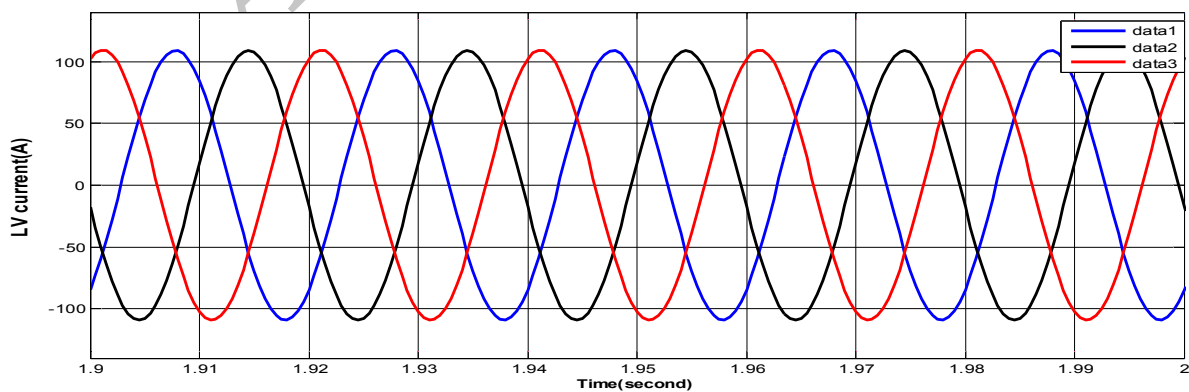
ولتاژ القا شده بر روی کویل‌های جستجوگر در شکل (۷) نشان داده شده است با توجه به شکل و مقایسه آن با حالت بدون خطا مشخص است که ولتاژ القا شده در کویل جستجوگر بالایی فاز A که خطا سیم پیچی در آن قسمت رخ داده است افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است و ولتاژ القا شده روی کویل جستجوگر پایینی فاز A کاهش کمی داشته و ولتاژ القا شده در سایر کویل‌های جستجوگر بدون تغییر باقی مانده است. علت افزایش ولتاژ در این کویل جستجوگر را می‌توان به این صورت بیان نمود که در حالت سالم کاری ترانسفورماتور خطوط شار مغناطیسی به صورت عمودی از فضای بین سیم پیچی‌ها بدون هیچ گونه اعوجاجی عبور می‌کنند. بطوریکه اگر خط افقی گذرنده از وسط ترانسفورماتور به عنوان محور مرجع فرض شود، خطوط شار نسبت به این خط تقارن کامل دارند. نحوه توزیع

استفاده از کویل های جستجوگر برای شناسایی مکان و شدت خطای سیم پیچی میسر می باشد. علت استفاده از ۴ کویل جستجوگر به این دلیل است که برای خطاهای که در فاز A رخ می دهد ولتاژ القا شده روی کویل جستجوگرهای فاز A تغییر محسوسی دارند و برای خطا روی فاز C با توجه به مکان خطای سیم پیچ ولتاژ القا شده روی فاز C تغییر خواهد داشت. همچنین برای خطاهای رخ داده روی فاز B با توجه به مکان خطا و شدت افزایش ولتاژ روی کویل جستجوگرهای فاز A یا C خواهد بود.

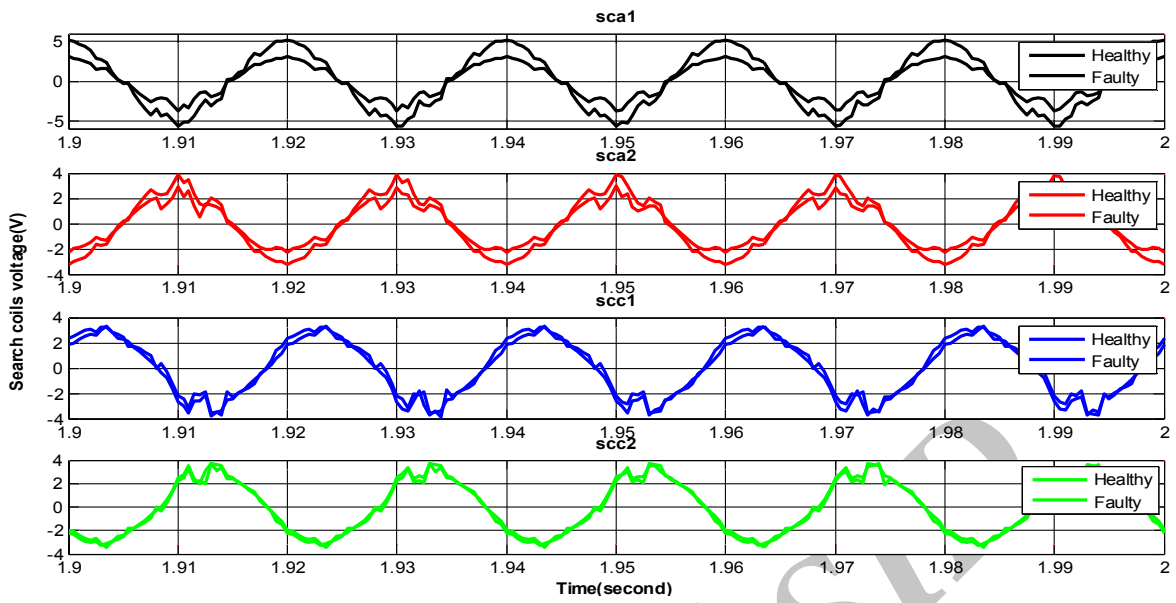
در شبیه سازی های متعددی که برای حالات مختلف عملکرد ترانسفورماتور انجام شده است مشخص شد که با توجه به موقعیت خطای رخ داده روی سیم پیچ ها ولتاژ القا شده روی کویل جستجوگری که در آن ناحیه واقع شده است افزایش محسوسی داشته است. همچنین شبیه سازی برای شدت خطاهای مختلف (که بیانگر شدت ضعف عایقی) انجام شده است و نتایج به دست آمده مشخص می کند که با تغییر شدت خطا مقدار شار ناشی در ترانسفورماتور و به دنبال آن ولتاژ القا شده بر روی کویل های جستجوگر تغییر می کند بنابراین امکان



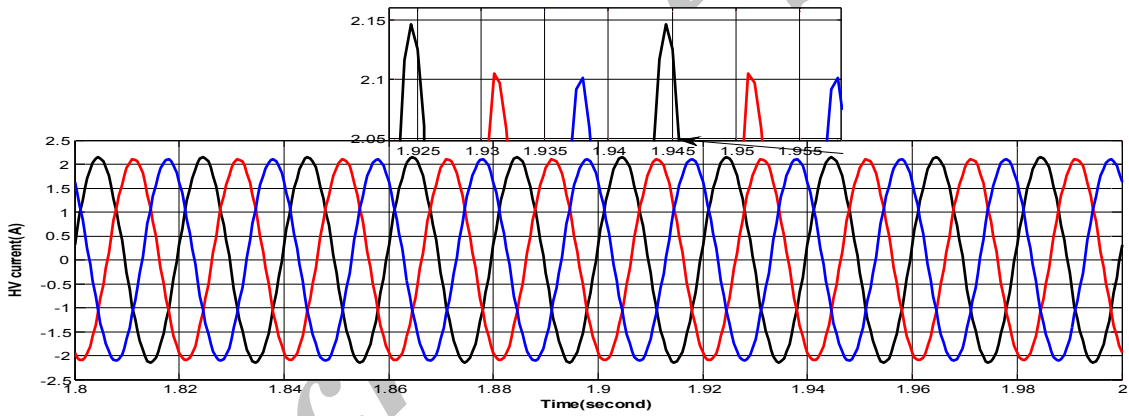
شکل (۵): جریان های سمت فشار قوی از حالت راه اندازی تا حالت ماندگار



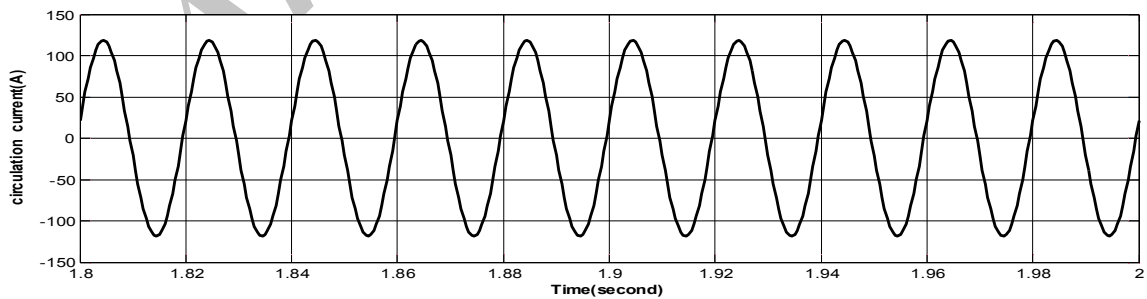
شکل (۶): جریان های سمت فشار ضعیف



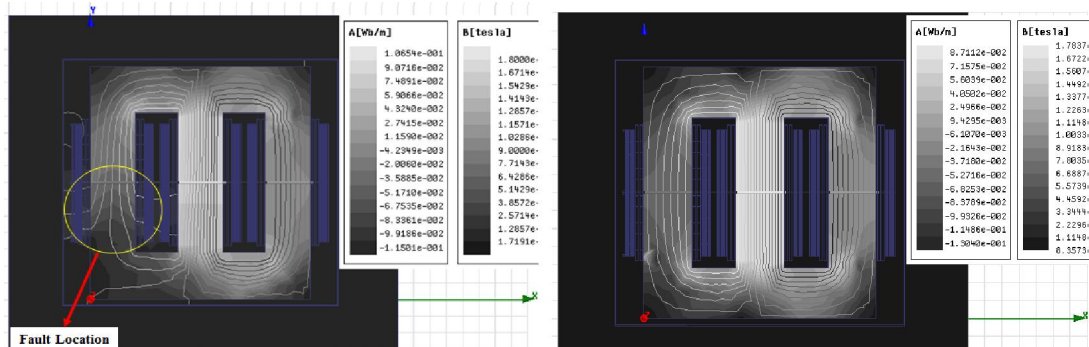
شکل (۷): ولتاژ القا شده بر روی کویل‌های جستجوگر در حالت بدون خطا و برای خطای ۳ دوری بالای سیم پیچ فشار ضعیف



شکل (۸): جریان‌های سمت فشار قوی در حالت خطای دوره دور در سیم پیچی فشار قوی



شکل (۹): جریان گردشی (جریان خطا) در سیم پیچ‌های خطادار



ب) خطدار

الف) بدون خطا

شکل (۱۰): چگالی شار و خطوط چگالی شار برای حالت خطا دار

مقاومت‌های خطا را نشان می‌دهد. با استفاده از این مقاومت‌ها می‌توان تست‌های خطاهای داخلی سیم پیچی با شکست عایقی و یا به عبارتی پیری عایق رامدل سازی نمود. ولتاژهای فاز سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور در حالت ماندگار در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است ولتاژهای فشار ضعیف به دست آمده از تست آزمایشگاهی دربار نامی با ولتاژهای حاصله از شبیه سازی به خوبی یکدیگر را تایید می‌کنند.

شکل (۱۵) جریان‌های سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور را برای حالت بار نامی نشان می‌دهد که بار انتخاب شده بار مقاومتی میباشد. با توجه به نتایج مشخص است که جریان‌های به دست آمده از شبیه سازی و تست آزمایشگاهی به خوبی یکدیگر را تایید می‌کنند.

ولتاژ القا شده بر روی کویل‌های جستجوگر برای حالت بدون خطا در شکل (۱۶) آمده است. با توجه به شکل مشخص است که نتایج شبیه سازی و تست آزمایشگاهی بسیار به هم نزدیک بوده و فرکانس هارمونیک اصلی آن ۵۰ هرتز می‌باشد.

ولتاژ القا شده برای حالت خطا دار (خطای ۳ دوری در سمت فشار ضعیف و بالای سیم پیچ) در شکل (۱۷) آورده شده است با توجه به نتایج مشخص است که ولتاژ القا شده روی کویل جستجوگر بالای سیم پیچ A (با توجه به وقوع خطا در این فاز) افزایش یافته است.

۴- تایید نتایج شبیه سازی با نتایج تست آزمایشگاهی

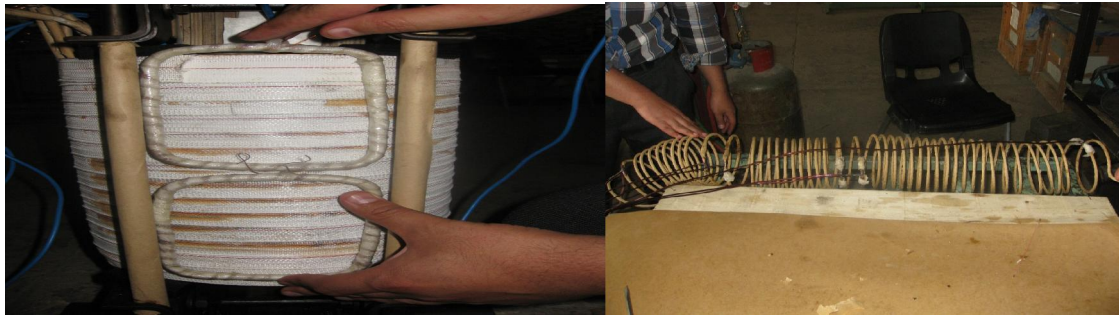
جهت تایید نتایج به دست آمده از شبیه سازی، یک ترانسفورماتور سه فاز ۵۰ کیلو ولت آمپر ساخت شرکت ایران ترانسفورماتور انتخاب شده است. ابتدا اجزای ترانسفورماتور را جدا کرده و پس از انجام اتصالات لازم بر روی سیم پیچ‌ها، سیم پیچی مجدد انجام شده است. نحوه انجام اتصالات روی سیم پیچی در شکل (۱۱الف) آورده شده است.

نحوه ی نصب کویل‌های جستجوگر لازم جهت تشخیص خطای برخط در شکل (۱۱ب) آورده شده است. اتصالات سیم پیچ‌ها جهت ایجاد خطای اتصال کوتاه به دلیل در نظر گرفتن مسایل حفاظتی در سمت فشار ضعیف انجام شده است.

برای ذخیره سازی اطلاعات و شکل موج‌ها از یک اسیلوسکوپ چهار کاناله با سرعت نمونه برداری

4×10^{-5} استفاده شده است. این اسیلوسکوپ قادر است ۴ سیگنال را به طور همزمان ثبت کند و امکان اندازه گیری ولتاژ تا ۲۵۰ ولت میسر است. شکل (۱۲) نحوه ذخیره اطلاعات را نشان می‌دهد.

برای ساخت مقاومت‌های خطا در آزمایشگاه از سیم‌هایی با آلیاژ نیکل کرم استفاده شده است که قابلیت تحمل جریان‌های بالا را دارا می‌باشند و مقاومت آنها وابستگی زیادی به دمای محیط و حرارت ندارد. شکل (۱۳)



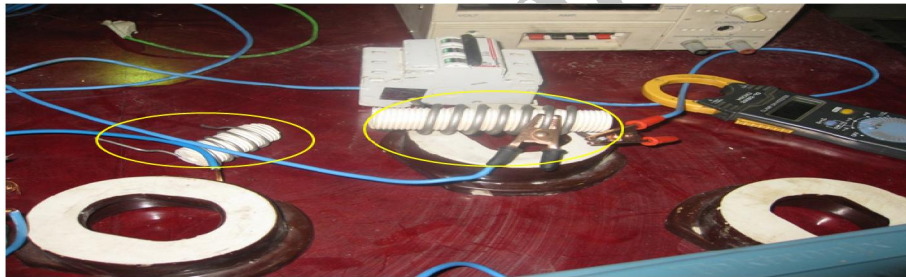
(ب)

(الف)

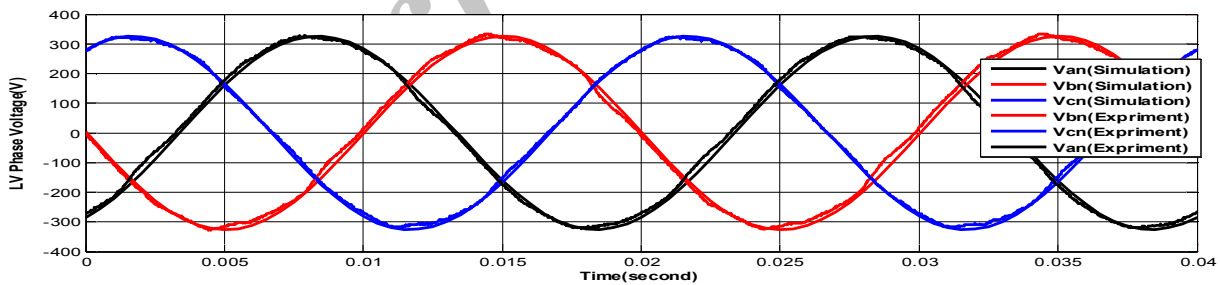
شکل (۱۱): نحوه ی نصب کویل‌های جستجوگر و اتصال سیم‌ها برای ایجاد خطا



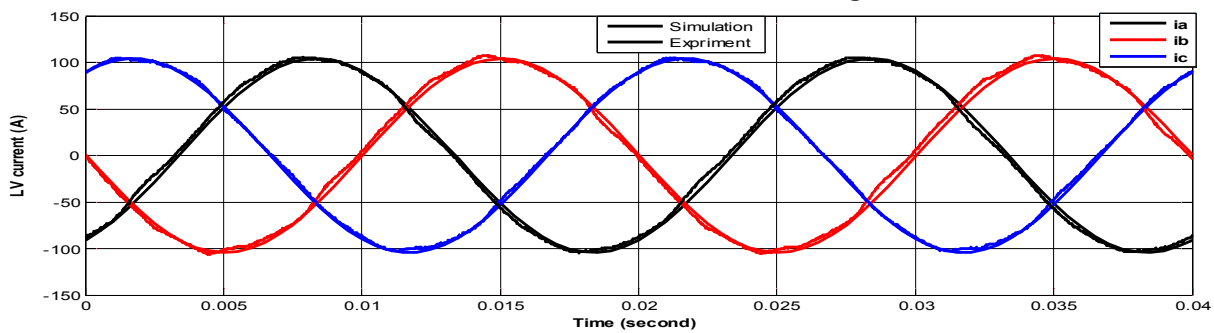
شکل (۱۲): نحوه ی ذخیره اطلاعات نتایج تست آزمایشگاهی



شکل (۱۳): مقاومتهای مختلف ساخته شده جهت ایجاد خطا

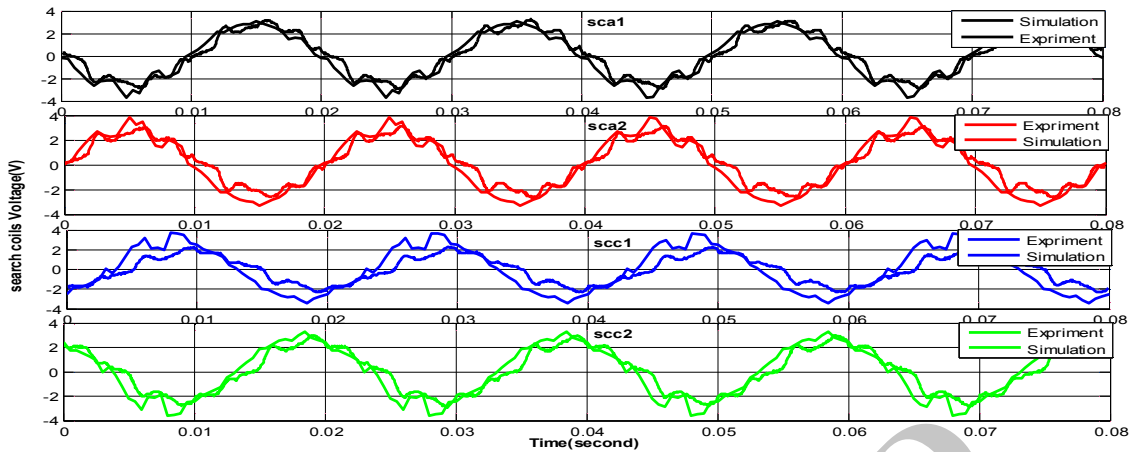


شکل (۱۴): مقایسه نتایج شبیه سازی و تست آزمایشگاهی (ولتاژهای فاز سمت فشار ضعیف)

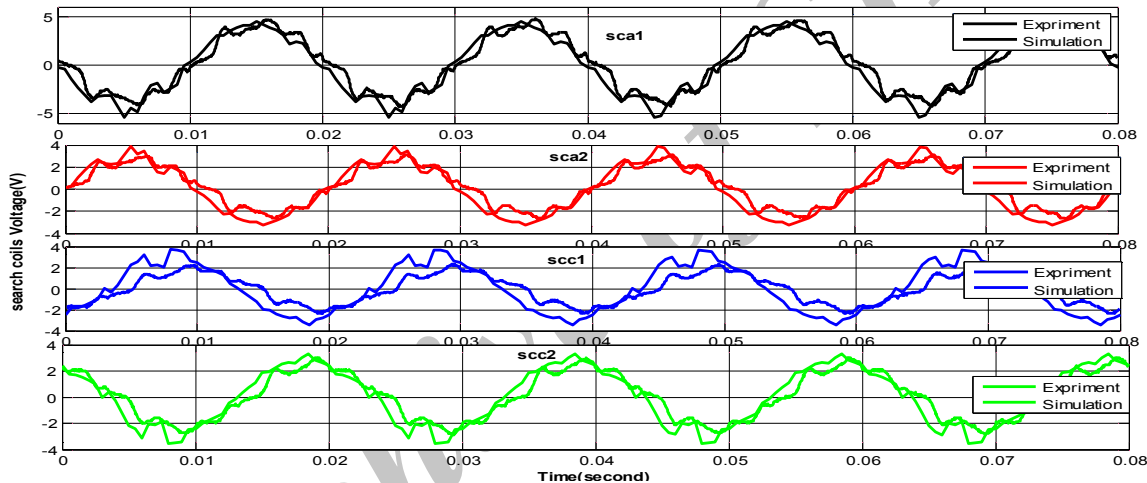


شکل (۱۵): مقایسه نتایج شبیه سازی و تست آزمایشگاهی (جریان‌های سمت فشار ضعیف)

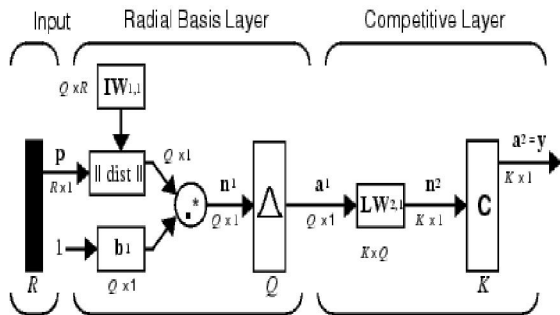
ارائه روش جدیدی جهت شناسایی بر خط انواع خطاهای سیم بندی داخلی در ترانسفورماتور قدرت..... ۱۰



شکل (۱۶): مقایسه نتایج شبیه سازی و تست آزمایشگاهی (ولتاژالفا شده روی کویل های جستجوگر برای حالت بدون خطا)



شکل (۱۷): مقایسه نتایج شبیه سازی و تست آزمایشگاهی (ولتاژالفا شده روی کویل های جستجوگر برای حالت خطا)



شکل (۱۸): بلوک دیاگرام شبکه ی عصبی احتمالاتی
 $a_1 = \text{radbas}(\|IW_{1,1} \cdot p\| biI)$
 $a_2 = \text{compet}(LW_{2,1}a_1)$

داده های خروجی تبدیل مولفه های اصلی، ورودی شبکه عصبی را تشکیل می دهد. پس از آموزش شبکه ی عصبی و

۵- شناسایی خطای سیم پیچی داخلی

ترانسفورماتور

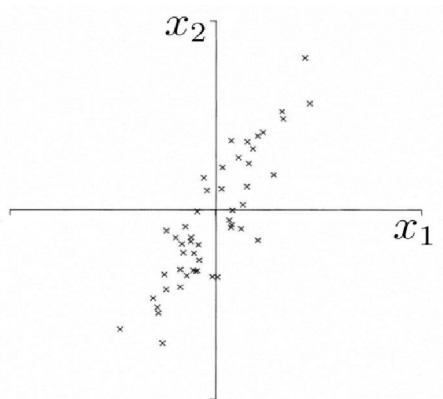
۵-۱ ساختار شبکه عصبی

برای شناسایی خطای ترانسفورماتور در این مقاله از شناساگر شبکه ی عصبی احتمالاتی استفاده شده است. این شبکه برای شناسایی تعلق داده به کلاس خاص از قانون بیز استفاده می کند. بلوک دیاگرام شبکه عصبی مورد استفاده در شکل (۱۸) آورده شده است.

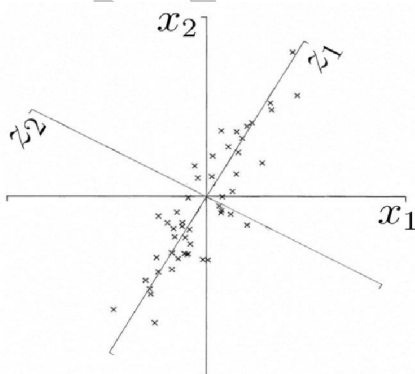
ویژه می‌باشد. علت استفاده از این تبدیل در ورودی شبکه عصبی این است که در پایش برخط ترانسفورماتور هر داده‌های ورودی کمتر شود سرعت پایش وضعیت ترانسفورماتور سریعتر صورت گرفته و میزان حافظه مورد نیاز برای دستگاه‌های پایش اطلاعات کاهش می‌یابد.

شکل (۲۱) بلوک دیاگرام کلی مراحل شناسایی خطا را نشان می‌دهد.

داده‌های ورودی به شبکه عصبی ولتاژ ۴ کوپل جستجوگر نصب شده بر روی ترانسفورماتور و همچنین اختلاف کوپل‌های جستجوگر بالایی و پایینی هر فاز است یعنی در مجموع ۶ داده ورودی به شبکه عصبی وجود دارد.



شکل (۱۹): قبل از اعمال تبدیل PCA



شکل (۲۰): پس از اعمال تبدیل PCA

انتخاب کلاس‌های خطا به دقت شناساگر و تفکیک پذیری کلاس‌ها از هم بستگی دارد. در شکل (۲۲) نحوه ی

مشخص شدن ماتریس اوزان IW ، فاصله ی داده‌های ورودی نسبت به این داده ی ماتریس اوزان محاسبه شده و در بایاس‌های b ضرب می‌شوند. حاصل این ضرب به عنوان ورودی اصلی n وارد تابع گوسی می‌شود. این تابع نقش قاعده ی بیز را در دسته بندی داده‌ها داراست. بر اساس این قاعده داده به کلاسی تعلق دارد که مقدار چگالی احتمال آن بیشترین مقدار را به ازای آن دارا باشد. عملکرد تابع گوسی با رابطه (۲) مشخص می‌شود. لایه ی آخر بیشترین تابع چگالی احتمال را به عنوان کلاس شناسایی شده نشان می‌دهد.

$$f(X_i, W_i) = \exp\left[-\frac{(X - W_i)^T (X - W_i)}{2\delta^2}\right] \quad (2)$$

ابعاد داده‌های ورودی شبکه ی عصبی PNN بر پیچیدگی آن اثر مستقیم دارند. جهت کاهش ابعاد ماتریس ورودی به شبکه عصبی از تبدیل PCA استفاده شده است. اساس این تبدیل انتقال ابعاد ماتریس داده‌ها به جهاتی است که حداکثر پراکندگی را داشته باشند.

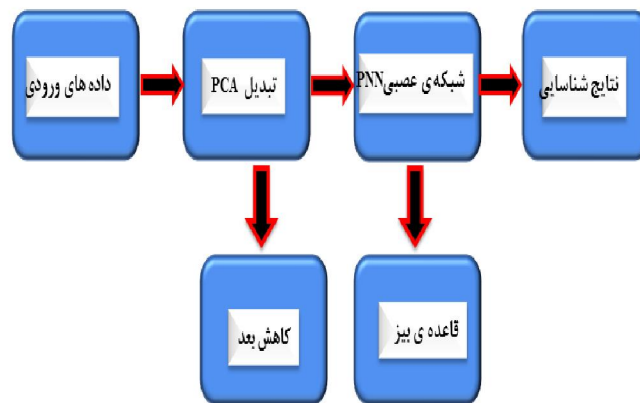
برای توضیح بیشتر این تبدیل همانطور که در شکل نمایانگر ۱۹ داده‌ها در یک سیستم دو بعدی نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود داده‌ها در دو راستا پراکندگی دارند از این رو نمی‌توان جهت (بُعدی) را حذف کرد. با گردش نمودار در راستای محورهای Z_1 و Z_2 شکل (۲۰) حاصل می‌شود، مشاهده می‌شود که داده‌ها در راستای Z_2 پراکندگی کمتری نسبت به Z_1 دارند از این رو می‌توان این راستا را حذف کرد. با حذف بعد Z_2 مقداری از اطلاعات از دست می‌رود از سوی دیگر حجم داده‌ها کاهش می‌یابد. از این خاصیت در شناسایی برای کاهش بعد اطلاعات شناسایی استفاده شده است. در روش مولفه‌های اصلی به دنبال ماتریس ضرایبی هستیم که جهات X_1 و X_2 را به Z_1 و Z_2 منتقل کند. در این روش اثبات می‌شود که این ضرایب برابر ماتریس بردارهای ویژه ی ماتریس داده‌ها است. معیار ریاضی پراکندگی داده‌های نیز ماتریس مقادیر

سیستم شناسایی انجام شده است. یعنی ابتدا شبیه سازی‌هایی برای آموزش شبکه شبکه و کلاس‌ها انجام شده است و در ادامه شبیه سازی‌هایی با شدت و مکان مختلف انجام شده و برای شناسایی به شبکه عصبی داده شده است. نتایج شبیه سازی و تاثیر کاهش ابعاد بر روی نتایج حاصله در جدول (۲) آورده شده است. ردیف اول روند کاهش تعداد داده‌های ورودی به شبکه عصبی با تبدیل PCA را نشان می‌دهد با توجه به نتایج مشخص است استفاده از ۱۱ بعد اول پس از اعمال این تبدیل به نتیجه ۸۱/۶۹ درصد برای شناسایی خطا می‌رسیم که نتیجه قابل قبولی است. با توجه به جدول با افزایش ابعاد باز هم به نتایج بهتری خواهیم رسید ولی از آنجا که مبنای این تبدیل بر استفاده از ویژگی‌های مهم سیگنال‌ها است افزایش بعد پس از ۱۱ بعد تاثیر قابل توجهی در افزایش دقت ندارد و استفاده از ۱۱ بعد اول این تبدیل کافی خواهد بود.

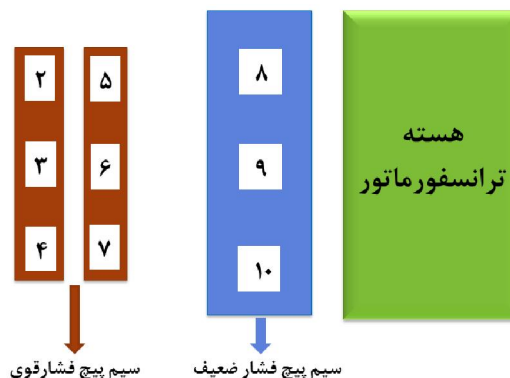
انتخاب کلاس‌های خطا نشان داده شده است. هدف از شناسایی در این مطالعه یافتن محل و شدت خطا در سیم بندی است. از این رو خطاهای با شدت ضعیف مورد مطالعه قرار گرفتند. در انتخاب این کلاس‌ها از خطای بین فاز و اتصال کوتاه‌هایی که منجر به عملکرد رله‌های حفاظتی می‌گردد چشم پوشی شده است. همانطور که از شکل مشخص است به طور کلی ۱۰ حالت برای کلاس بندی در نظر گرفته شده است بطوریکه کلاس ۱ حالت بدون خطا، کلاس‌های ۲-۷ خطاهای فشار قوی و کلاس‌های ۸-۱۰ خطاهای مربوط به فشار ضعیف است علت در نظر گرفتن کلاس‌های بیشتر برای فشار قوی امکان وقوع خطاهای بیشتر و همچنین تعداد لایه‌های بیشتر فشار قوی است.

۵-۲ نتایج شناسایی

پس از آموزش شبکه عصبی با استفاده از داده‌های ۱۰ کلاس، شبیه سازی‌های دیگری برای آزمایش



شکل (۲۱): بلوک دیاگرام روند شناسایی



شکل (۲۲): نحوه کلاس بندی خطاهای مختلف سیم پیچی

جدول (۲): نتایج به دست آمده از شناسایی خطا

دقت شناسایی	کلاس ۱۰	کلاس ۹	کلاس ۸	کلاس ۷	کلاس ۶	کلاس ۵	کلاس ۴	کلاس ۳	کلاس ۲	کلاس ۱	تعداد ابعاد
۲۷/۲۳	۲۳	۳۶	۴۳	۱۱	۱۹	۱۱	۶	۲۰	۸	۰	۱
۴۵/۲۳	۱۴	۳۹	۵۲	۲۴	۴۷	۳۲	۱۴	۴۳	۲۸	۱	۲
۵۳/۵۴	۱۹	۴۷	۶۰	۳۳	۴۷	۳۹	۲۴	۴۸	۳۰	۱	۳
۵۵/۰۸	۲۰	۴۵	۶۵	۳۴	۴۷	۴۰	۳۰	۴۷	۲۸	۲	۴
۵۵/۲۳	۱۷	۴۷	۶۳	۳۱	۴۷	۴۰	۳۵	۴۷	۳۰	۲	۵
۵۶/۹۲	۲۲	۴۳	۷۱	۳۵	۴۵	۳۸	۳۸	۴۷	۲۹	۲	۶
۶۰	۱۸	۴۲	۸۰	۴۲	۴۵	۳۹	۴۰	۴۷	۳۴	۳	۷
۶۲/۴۶	۲۳	۴۹	۸۱	۴۳	۴۶	۳۹	۴۰	۴۷	۳۴	۴	۸
۷۱/۶۹	۵۰	۷۱	۸۳	۴۶	۴۶	۴۰	۳۹	۴۷	۳۸	۶	۹
۷۹/۶۹	۸۳	۷۴	۹۳	۴۶	۴۶	۴۴	۴۰	۴۷	۳۹	۶	۱۰
۸۱/۶۹	۸۳	۷۸	۹۳	۴۶	۴۷	۴۴	۴۲	۴۸	۴۰	۱۰	۱۱
۸۰/۷۷	۷۹	۷۷	۹۱	۴۶	۴۷	۴۴	۴۳	۴۸	۳۹	۱۱	۱۲
۸۰	۷۸	۷۷	۹۰	۴۶	۴۶	۴۴	۴۴	۴۸	۳۷	۱۰	۱۳
۸۰/۴۶	۷۸	۷۶	۹۰	۴۶	۴۶	۴۵	۴۴	۴۸	۳۹	۱۱	۱۴
۸۰/۴۶	۷۸	۷۶	۹۰	۴۶	۴۶	۴۵	۴۴	۴۸	۳۹	۱۱	۱۵
۷۹/۶۹	۷۶	۷۴	۹۲	۴۶	۴۶	۴۳	۴۴	۴۸	۳۸	۱۱	۱۶
۷۹/۶۹	۷۶	۷۵	۹۱	۴۶	۴۶	۴۳	۴۴	۴۸	۳۸	۱۱	۱۷
۷۹/۳۸	۷۶	۷۵	۹۰	۴۶	۴۶	۴۳	۴۴	۴۸	۳۷	۱۱	۱۸
۸۰/۱۵	۷۷	۷۴	۹۱	۴۶	۴۷	۴۳	۴۴	۴۸	۳۹	۱۲	۱۹
۸۰/۲۳	۷۴	۷۳	۹۰	۴۶	۴۷	۴۳	۴۳	۴۸	۳۸	۱۳	۲۰
۸۴/۶۱	۷۴	۷۲	۸۹	۴۵	۴۷	۴۳	۴۵	۴۹	۳۶	۵۰	۱۷۴

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای پایش برخط ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شد. با توجه به نتایج حاصله از مدل سازی ترانسفورماتور برای حالت کاری بدون خطا و حالت خطادار و مقایسه این نتایج با نتایج تست آزمایشگاهی مشخص است که شبیه سازی انجام شده دارای دقت بالایی بوده و به خوبی نتایج تست آزمایشگاهی این موضوع را تایید می کند. ولتاژ القا شده بر روی کویل‌های جستجوگر مشخص می کند که با وقوع خطای سیم پیچی شار نشی بر حسب شدت و مکان خطا تغییر کرده و می توان

از این موضوع در شناسایی خطا استفاده کرد. استفاده از تبدیل PCA جهت کاهش داده‌های ورودی به سیستم‌های پردازشی انجام گرفت زیرا در شناسایی بر خط رفتار ترانسفورماتور نیاز به پایش داده‌ها در هر لحظه ضروری است و نتایج حاصله نشان می دهد که کاهش داده‌ها با استفاده از این روش، باعث پردازش سریعتر اطلاعات و کارایی روش می شود. همچنین نتایج شناسایی خطا مشخص می کند که استفاده از شبکه عصبی احتمالاتی در شناسایی برخط خطای سیم پیچی داخلی و همچنین تعیین مکان خطاروش موثر و کارایی است. از روش پیشنهادی

- No. 3, pp. 5-11, July 1999.
- [5] S. A. Saleh, , and M. A. Rahman "Real-Time Testing of a WPT-Based Protection Algorithm for Three-Phase Power Transformers" IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 41, No.4, July/August 2005
- [6] Saha, T.K., "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , Vol.10, No.5, pp.903-917, Oct. 2003
- [7] Akbari, A.; Setayeshmehr, A.; Borsi, H.; Gockenbach, E.; Fofana, I., "Intelligent agent-based system using dissolved gas analysis to detect incipient faults in power transformers," Electrical Insulation Magazine, IEEE, Vol.26, No.6, pp.27,40, November-December 2010
- [8] R. R. Rogers, "Experiences in the interpretation of incipient faults in power transformers by dissolved gas-in-oil chromatography analysis (A Progress Report)," in Proc. Minutes Forty-Second Int. Conf. Double Clients, 1975.
- [9] Secue, J.; Mombello, E., "New methodology for diagnosing faults in power transformer windings through the Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)," Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES , Vol., No., pp.1,10, 13-15 Aug. 2008
- [10] Islam, S.M., "Detection of shorted turns and winding movements in large power transformers using frequency response analysis," Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE , vol.3, no., pp.2233,2238 Vol.3, 23-27 Jan 2000
- [11] C. Sweetser and T. McGrail, Sweep frequency response analysis transformer applications, Tech. paper from Doble Eng., Jan. 2003.
- [12] Behjat, V.; Vahedi, A.; Setayeshmehr, A.; Borsi, H.; Gockenbach, E., "Diagnosing Shorted Turns on the Windings of Power Transformers Based Upon Online FRA Using Capacitive and Inductive Couplings," Power Delivery, IEEE Transactions on , Vol.26, No.4, pp.2123,2133, Oct. 2011
- [13] Nafar, M; Bahmanifrouzi, B and Jabbari,M "Transformer Monitoring by using Vibration Analysis" Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(11)pp 984-990, 2011
- [14] ZBerler, Z.; Golubev, A.; Rusov, V.; Tsvetkov, V.; Patterson, C., "Vibro-acoustic method of transformer clamping pressure

همچنین می توان در حالت خاموشی و تعمیرات ترانسفورماتور استفاده کرد چون در اکثر ترانسفورماتورهای بزرگ پایش وضعیت وپیش بینی مکان خطا می تواند بسیاری از هزینه تعمیرات را کاهش دهد.

ضمیمه ۱

$P_n=50(KVA)$	توان نامی
۴۰۰/۲۰۰۰۰	نسبت تبدیل
$V)19200/20800$	نسبت ولتاژ
۴۱۵۵	تعداد دور فشار قوی
۴۵*۲	تعداد دور فشار ضعیف
۵Yzn	گروه اتصالی
%۲/۷۵	جریان بی باری
(m)۱۰۰۰	ارتفاع از سطح دریا
(T)۱,۷۶۴	چگالی شار
$D_s=100(mm)$	قطر هسته
$E_s=106(mm)$	فاصله بین دو ساق
$L_s=292(mm)$	طول پنجره
$(\Omega)0,0078$	مقاومت فشار ضعیف
(A)۱,۴۴	جریان نامی فشار قوی
(A)۷۲	جریان نامی فشار ضعیف

مراجع

- [1] Oliveira, L.M.R.; Cardoso, A. J M, "A Permeance-Based Transformer Model and Its Application to Winding Interturn Arcing Fault Studies," Power Delivery, IEEE Transactions on , Vol. 25, No. 3, pp. 1589,1598, July 2010
- [2] Behjat, V.; Vahedi, A., "Numerical modelling of transformers interturn faults and characterising the faulty transformer behaviour under various faults and operating conditions," Electric Power Applications, IET , Vol.5, No.5, pp.415,431, May 2011
- [3] Mirzaie,M; Gholami,A; Farrokhi,M" transformer insulation faults Detection by analysis of dissolved gases in oil using neural networks - Fuzzy" 19th International Power System Conference,Tehran iran,2004
- [4] A. J. Marques Cardoso, Luís M. R. Oliveira, "Condition Monitoring and Diagnostics of Power Transformers," International Journal of comadem, Vol. 2,

- Remote Condition Monitoring," Power Delivery, IEEE Transactions on , Vol. 22, No.3, pp.1591,1602, July 2007
- [24] Hyun-Mo Ahn; Ji-Yeon Lee; Joong-Kyoung Kim; Yeon-Ho Oh; Sang-Yong Jung; Sung-Chin Hahn, "Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer," Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol.47, No.3, pp.1267,1272, May-June 2011
- [25] Ahn Hyun-Mo Ahn; Yeon-Ho Oh; Joong-Kyoung Kim; Jae-Sung Song; Sung-Chin Hahn, "Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer," Magnetics, IEEE Transactions on, Vol.48, No.2, pp.819,822, Feb. 2012
- [26] Moradi A, Ebadian M, Daryabar M. "Discrimination of Inrush Currents from Faults Current in Power Transformers using Gravitational Search Algorithm" Computational Intelligence in Electrical Engineering, vol.1, pp 43-58, 2011
- [27] Rasoulpoor M, Banejad M, Ahmadyfard A. "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.3, pp39-54, 2013
- monitoring," Electrical Insulation, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on , Vol., No., pp.263,266, 2000
- [15] Guzmán Díaz González, Javier Gómez-Aleixandre Fernández, Pablo Arboleya Arboleya "Diagnosis of a turn-to-turn shortcircuit in power transformers by means of zero sequence current analysis", Electric Power System Research, Vol. 69, Issue 2-3, pp. 321-329, May 2004
- [16] Vahedi, A, Behjat ,V, "Online monitoring of power transformers for detection of internal winding short circuit faults using negative sequence analysis", Euro. Trans. Electr. Power Vol 21, Issue 1, pp 196-211, January 2011.
- [17] Vahedi, A, Behjat ,V, "A DWT-based approach for detection of interturn faults in power transformers", The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 30, No. 2, 2011.
- [18] H. Monsef, S. Lotfifard, "Internal fault current identification based on wavelet transform in power transformers," Electric Power System. Vol. 77, Issue 12, pp 1637-1645, October 2007
- [19] Vanamadevi, N.; Arivamudhan, M.; Santhi, S., "Detection and classification of impulse faults in transformer using wavelet transform and artificial neural network," Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on , Vol., no., pp.72,76, 24-27 Nov. 2008
- [20] Zaeri, A .Hoshmand, R. Kafi, M. " Intelligent fault detection in Power Transformers using insoluble gas analyzers based on different standards using fuzzy logic" Majlesi Journal of Electrical Engineering, 2007
- [21] Sheng, J.L.; Zhou, M. S.; Guo, Z.P.; Liu, Z., "Fault diagnosis for transformer based on fuzzy entropy," Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007. CEIDP 2007. Annual Report - Conference on, Vol., No., pp.759,762, 14-17 Oct. 2007
- [22] An-Pin. Chen, Chang-Chun. Lin, "Fuzzy approaches for fault diagnosis of transformers," Fuzzy Sets and Systems , Volume 118, Issue 1, 16 February 2001, Pages 139-151
- [23] Cabanas, M.F.; Melero, M.G.; Pedrayes, F.; Rojas, C.H.; Orcajo, G.A.; Cano, J.M.; Iglesias, J.G., "A New Online Method Based on Leakage Flux Analysis for the Early Detection and Location of Insulating Failures in Power Transformers: Application to