

طبقه‌بندی خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت

براساس جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده

سجاد باقری، زهرا مروج، گئورگ قره پتیان

دانشگاه آزاد اسلامی اراک، دانشگاه سمنان، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مداول تشخیص عیوب نظیر آنالیز گازهای محلول در روغن نیز میسر نخواهد شد. در سال‌های اخیر، رله‌های حفاظتی الکتریکی از دیدگاه تکنولوژی ساخت، الگوریتم‌ها و روش‌های ریاضیاتی پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. اما رله‌های حفاظتی با وجود تمام پیشرفت‌های صورت گرفته و روند توسعه فناوری همچنان در شناسایی خطاهای مکانیکی داخلی ترانسفورماتورها کم‌توانند [۱ و ۲].

در [۳]، به تشخیص عیوب جابه‌جایی محوری (AD) و تغییر شکل شعاعی (RD) سیم‌پیچ ترانسفورماتورها با استفاده از امواج الکترومغناطیسی پرداخته شده است که تشخیص عیب در را در کوتاه‌ترین زمان تشخیص و نوع و محل خطا را نیز تشخیص می‌دهد. در [۴]، از روش تطبیق برداری^۳ (VF)، جهت تفکیک خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتورها با دقت بالایی استفاده شده است، اما این روش فاقد دقت مورد نیاز برای تشخیص شدت جابه‌جایی یا مکان تغییر شکل شعاعی است. در [۵]، از روش تطبیق برداری و شبکه عصبی احتمالاتی (PNN) به صورت ترکیبی جهت تشخیص نوع خطاهایی شامل خطاهای تغییر شکل شعاعی، جابه‌جایی محوری، اتصال کوتاه دیسک به دیسک و تغییر فاصله دیسک‌ها استفاده شده است. در [۶]، استفاده از روش‌های هوشمند و تحلیلی به طور همزمان جهت تشخیص خطا از روی تفکیک و طبقه‌بندی نمودن اطلاعات استخراج شده از سیگنال‌های ولتاژ و جریان مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، از روش‌های هوشمند مختلفی جهت تشخیص و طبقه‌بندی انواع خطاها از جمله روش‌های درخت تصمیم‌گیری (DT) [۷]، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) [۸ و ۶]، ماشین بردار پشتیبان (SVM) [۹]، طبقه‌بندی کننده بیزین (BC) [۱۰] و جهت استخراج بردار ویژگی‌ها از تبدیلات هوشمند مانند تبدیل ویولت گسسته حداکثر همپوشانی (MODWT) [۹] [۱۱ و ۱۲]، تبدیل S [۱۳-۱۵]، تبدیل زمان-زمان [۱۶]، تبدیل چیرپلت [۱۷]

چکیده — در این مقاله، ابتدا خطاهای مکانیکی داخلی سیم‌پیچ ترانسفورماتورها از جمله تغییر شکل مکانیکی در راستای شعاعی و جابه‌جایی مکانیکی در راستای محوری سیم‌پیچ در آزمایشگاه FACTSLAB دانشگاه صنعتی امیرکبیر و بر روی یک نمونه سیم‌پیچ واقعی مدل‌سازی می‌گردد. سپس، پارامترهای مدل مشروح در هنگام خطاهای مکانیکی توسط نرم‌افزار متلب استخراج و به محیط نرم‌افزار EMTP منتقل می‌گردد. در مرحله بعد، جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده در هنگام عیوب مکانیکی سیم‌پیچ با درجات مختلف در نرم‌افزار EMTP استخراج و جهت آنالیز و کلاسه‌بندی مجدداً به نرم‌افزار متلب انتقال می‌یابد. در نهایت، از روش کلاسه‌بندی بیزین به منظور تبدیل اطلاعات گرافیکی سیگنال‌های خروجی (جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده) به فرم عددی جهت تمایز رویدادهای مختلف استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی — جابه‌جایی محوری سیم‌پیچ؛ تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ؛ حفاظت دیفرانسیل؛ طبقه‌بندی کننده بیزین.

۱. مقدمه

ترانسفورماتورها یکی از تجهیزات گران‌قیمت صنعت برق محسوب می‌شوند که معیوب شدن آن وقفه‌های طولانی مدتی را به دنبال خواهد داشت و ترمیم و رفع عیب آن نیز هزینه بالایی را می‌طلبد. به دلیل اهمیت ترانسفورماتورها در سیستم‌های قدرت، جهت حفاظت این تجهیز ارزشمند و حیاتی، حفاظت‌های مکانیکی و الکتریکی متنوعی پیش‌بینی شده است تا این تجهیز را از صدمات ناشی از خطاهای بیرونی و داخلی محافظت نماید. گرچه در خطاهای مکانیکی محدود، بخشی از عایق تخریب می‌شود، ولی به دلیل اثر اندک آن در تولید گاز، امکان شناسایی آن توسط روش‌های

عدم اطمینان تقلیل می یابد. این قضیه از آن جهت مفید است که می توان از طریق آن احتمال یک پیشامد را با مشروط کردن نسبت به وقوع یا عدم وقوع یک پیشامد دیگر محاسبه کرد. در بسیاری از حالتها، محاسبه احتمال یک پیشامد به صورت مستقیم کاری دشوار است. با استفاده از این قضیه و مشروط کردن پیشامد مورد نظر نسبت به پیشامد دیگر، می توان احتمال مورد نظر را محاسبه کرد. این رابطه به خاطر بزرگداشت توماس بیز فیلسوف انگلیسی به نام فرمول بیز معروف است. طبق قوانین بیز ارائه شده در (۳)، این تئوری شامل برخی پارامتر هاست که در حین فرآیند آموزش^{۱۰} مشخص شده اند [۱۰]:

$$\text{posterior} = \frac{\text{prior} * \text{likelihood}}{\text{evidence}} \quad (3)$$

که در (۴)، 'd' به عنوان داده ها و 'h' به عنوان فرضیات در نظر گرفته می شود، سپس خواهیم داشت:

$$p(d) = \sum_h p(d | h)p(h) \quad (4)$$

که در آن احتمال اولیه (Prior Probability)، احتمالی است که پیش از مشاهده ی ماهیت اطلاعات نشان داده شده با $p(h)$ موجود بوده است. احتمال وقوع یا (Likelihood)، احتمالیست که فرض h درست باشد و آن را با $p(d|h)$ نشان می دهیم. این نکته نیز قابل ذکر است که $p(h)d)p(d)=p(d|h)p(h)$ با استفاده از قانون جمع سیگما، مخرج کسر در تئوری بیز می تواند با لحاظ مقدار صورت کسر به صورت زیر بسط داده شود.

$$p(h | d) = \frac{p(h) * p(d | h)}{p(d)} \quad (5)$$

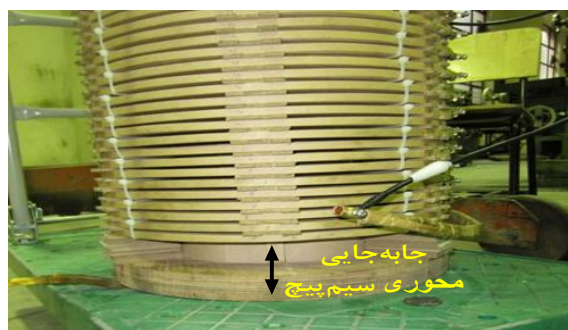
رابطه قوق، احتمال حاشیه ای نیز نام دارد. هدف از (۵)، احتمال ثانویه ای است که در واقع بیانگر میزان احتمال، پس از رویت داده هاست. با استفاده از پایه و مفهوم روابط فوق، BC قادر به تشکیل خواهد بود. برای حصول آن، هدف کلاس ها، مقدار متوسط و واریانس (برای کاربردهای تک بعدی) و یا کوواریانس (برای کاربردهای بیش از یک بعد) برای تمامی سطوح و کلاس ها باید مشخص و محاسبه شود. همچنین برای کلاس مدلسازی، از توزیع گاوسی استفاده می شود. روابط (۶) و (۷)، به ترتیب احتمال اولیه برای کاربرد تک بعدی و بیش از تک بعد را مشخص می کند [۱۰].

$$C_i = \sum_{\theta=0}^{2\pi} \left[\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_0}{r(\theta)}\right)} \right] \Delta\theta \quad (2)$$

نتایج تحقیقات تجربی و عددی [۵-۱]، رابطه بین تغییر پارامترهای مدل مشروح و تغییر شکل مکانیکی سیم پیچ را تأیید می کند.

۲.۲. جابه جایی محوری سیم پیچ

نیروی محوری در اثر عمل متقابل جریان سیم پیچی و مؤلفه عمودی شار پراکندگی به وجود می آید که در جهت محوری سیم پیچ عمل می نماید. این نیرو می تواند باعث فشردن شدن و در موارد شدیدتر خم شدن سیم پیچ در جهت محوری و شکسته شدن کلمپ بالا و پایین سیم پیچ از یک نقطه گردد. جهت مدل سازی خطای جابه جایی محوری سیم پیچ، فرض می شود که سیم پیچ فشار قوی به تدریج در راستای محورش تغییر مکان داده شود. شکل ۳، چگونگی اعمال این خطا در آزمایشگاه را نشان می دهد.



شکل ۳: خطای جابه جایی محوری سیم پیچ مورد مطالعه

با توجه به مطالعات صورت گرفته در [۱۸ و ۱۹]، بدیهی است که جابه جایی محوری، اجزاء ماتریس اندوکتانس (M) را که توصیف کننده اندوکتانس های متقابل بین اجزاء سیم پیچ هستند، تغییر خواهد داد.

۳. طبقه بندی کننده بیزین

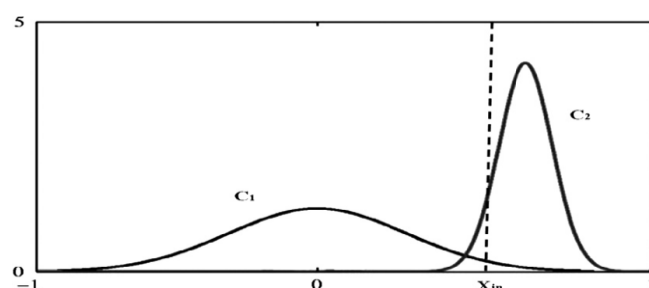
یکی از شناخته شده ترین طبقه بندی کننده های احتمالاتی طبقه بندی بیزین (BC) می باشد که بر مبنای فرضیه بیز^{۱۳} پایه ریزی شده است. فرضیه بیز، روشی برای دسته بندی پدیده ها، بر پایه احتمال وقوع یا عدم وقوع یک پدیده است و در نظریه احتمالات با اهمیت و پر کاربرد است. اگر برای فضای نمونه ای مفروضی بتوانیم چنان افزای انتخاب کنیم که با دانستن اینکه کدامیک از پیشامدهای افزاز شده رخ داده است، بخش مهمی از

$$N(x | \mu, \delta^2) = \frac{1}{(2\pi\delta^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\delta^2}(x - \mu)^2\right\} \quad (6)$$

$$N(x | \mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2}} \frac{1}{|\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1}(x - \mu)\right\} \quad (7)$$

چاییکه بردار D بعدیه μ "میانگین" نامیده شده، δ^2 واریانس و ماتریس $D \times D$ نیز کوواریانس و $|\Sigma|$ نیز نشانگر دترمینان Σ است. برای توضیح چگونگی عملکرد BC به مثال زیر توجه کنید.

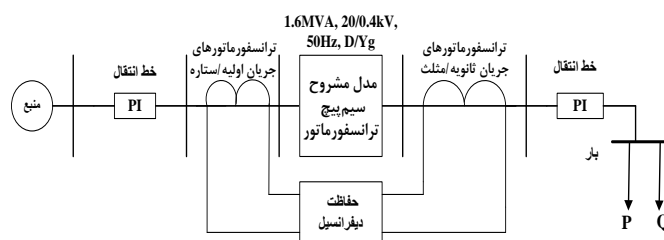
فرض کنید که یک مسأله دو کلاسه وجود دارد، و توزیع معمول یا بیزین هر کلاس از آن‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. در واقع با استفاده از مقدار میانگین و واریانس هر کلاس، این منحنی‌ها رسم شده‌اند. در هنگام تعیین کردن کلاس‌های متناظر، داده‌های تست ورودی X_{in} ، هدف مورد نظر ماست و کلاس آن تنها با مشخص کردن مقدار توزیع بایسین متناظر با داده‌های تست ورودی قابل تعیین است. براساس شکل (۴)، $f_{c2}(X_{in})$ بزرگتر از $f_{c1}(X_{in})$ است، بنابراین داده‌های ورودی تست، مربوط به کلاس c_2 هستند.



شکل ۴: یک مسأله دو کلاسه با توزیع بیزین کلاس‌های c_1 و c_2 آن‌ها [۱۰]

۴. سیستم مورد مطالعه

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، سیستم نشان داده شده در شکل ۵، در نرم افزار EMTP/ATP مدل سازی شده است.



شکل ۵: سیستم قدرت مورد مطالعه در نرم افزار EMTP

سیم پیچ مورد مطالعه، مربوط به یکفاز ترانسفورماتور سه فاز ۱/۶ مگا ولت آمپری با ولتاژ نامی ۲۰/۰/۴ کیلو ولت (۵۰ Hz, D/Yg) است که از یک سیم پیچ فشار قوی ساخته شده از ۳۸ دیسک تشکیل شده است. ۸ دیسک ابتدایی و ۸ دیسک انتهایی این سیم پیچ ۲۰ دوره و ۲۲ دیسک میانی آن دارای ۲۱ حلقه می باشد. سیم پیچ فشار ضعیف آن از دو لایه ۱۳ حلقه ای تشکیل شده است که هر حلقه سیم پیچ فشار ضعیف از سه هادی که در راستای ارتفاع سیم پیچ بصورت موازی نسبت به هم قرار دارند، ایجاد شده است. برخلاف ساختمان سیم پیچ ترانسفورماتورهای توزیع با قدرت های کم و با توجه به سفارش داده شده، سیم پیچی آن به صورت زوج دیسک واژگون در شرکت ایران ترانسفو زنجان پیچیده شده است. لذا با توجه به نوع سیم پیچ، می توان آن را با سیم پیچ ترانسفورماتورهای بزرگ مقایسه نمود. ابعاد هندسی و سیم بندی مجموعه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. جهت شبیه سازی هسته آهنی ترانسفورماتور نیز از یک استوانه توخالی آلومینیومی استفاده شده است. پرس شبان و ثابت دی الکتریک نسبی کاغذ به ترتیب برابر با ۴/۲ و ۳/۲ می باشد.

جدول ۱: مشخصات ابعاد سیم پیچ ترانسفورماتور مورد مطالعه

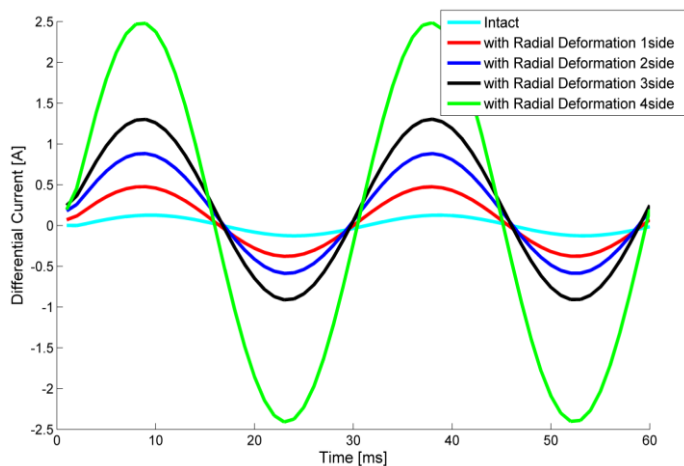
ابعاد (میلی - متر)	توصیف	ابعاد (میلی متر)	توصیف
۳/۳۵×۱۱/۸	سطح مقطع هادی فشار ضعیف	۹۳	شعاع داخلی سیم پیچ فشار ضعیف
۲/۱۲×۸/۵	سطح مقطع هادی فشار قوی	۱۰۶	شعاع خارجی سیم پیچ فشار ضعیف
۰/۵	ضخامت کاغذ عایقی	۴	کانال بین دولایه سیم پیچ فشار ضعیف
۵۳۶	ارتفاع سیم پیچ فشار ضعیف	۱۲/۵	کانال بین دولایه سیم پیچ فشار ضعیف و قوی
۴۹۴	ارتفاع سیم پیچ فشار قوی	۱۱۸/۵	شعاع داخلی سیم پیچ فشار قوی
۹۰	شعاع هسته	۱۷۶/۵	شعاع خارجی سیم پیچ فشار قوی

۴.۱. مدل سازی سیم پیچ ترانسفورماتور

در تحقیقات صورت گرفته گذشته [۱۳-۱۶]، جهت مدل سازی برخی خطاهای الکتریکی سیم پیچ از جمله خطاهای دوره دور و دوره زمین، از زیرمجموعه شناخته شده BCTRANS در محیط EMTP، که سیم پیچ را به-

پس از جایگذاری این ظرفیت‌ها به جای ظرفیت‌های سالم در مدل مشروح در نرم‌افزار EMTP، خطای مکانیکی ناشی از تغییر شکل شعاعی با درجات مختلف را مدل‌سازی می‌نمایم.

در نهایت، جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده را به ازای درجات مختلف تغییر شکل شعاعی به صورت شکل ۶ و به ازای زمان شبیه سازی برابر ۶۰ میلی ثانیه نشان می‌دهیم.



شکل ۶: جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده از ترانسفورماتور به ازای تغییر شکل‌های شعاعی مختلف

۵.۲. نتایج حاصل از جابه‌جایی محوری سیم‌پیچ

در هنگام خطاهای مکانیکی ناشی از نیروهای محوری، ممکن است سیم‌پیچ HV نسبت به LV بالا بزند [۱۹] و یا LV نسبت به HV بالا بزند [۴] و یا هر دو آن‌ها اتفاق بیفتند.

لذا، با توجه به [۱۲]، مطالعه خود را معطوف به حالت اول می‌نمایم. جهت بررسی این نوع خطا، سیم‌پیچ فشارقوی نسبت به سیم‌پیچ فشارضعیف به صورت مرحله‌ای جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی‌ها با گام‌های ۱۵ میلی-متری به ترتیب تا ۶۰ میلی‌متر به سمت بالا مطابق شکل ۳، انجام گردید. سپس، تابع تبدیل امپدانس ولتاژ ورودی به جریان زمین سمت فشارقوی، در آزمایشگاه، برای مجموعه مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری‌ها توسط دستگاه امپدانس آنالایزر که در شکل ۷ به همراه سیم‌پیچ مورد مطالعه نشان داده شده است، صورت گرفت. سپس، در هر یک از این حالات، القاهای متقابل بین واحدهای سیم‌پیچ HV, LV، دست‌خوش تغییرات گردید که مقادیر این پارامترها توسط الگوریتم ژنتیک و در محیط نرم‌افزار متلب محاسبه شد. در [۱۲]، پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ مورد مطالعه توسط روش

صورت یک ماتریس 6×6 RL مدل می‌نماید، استفاده شده است. اما این مدل، جهت بررسی خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ مناسب نمی‌باشد. در این مقاله، از مدل مشروح [۱۹] که یکی از مناسب‌ترین مدل‌ها برای بررسی و شناخت خطاهای مکانیکی داخلی ترانسفورماتورها می‌باشد، استفاده می‌گردد.

۴.۲. مدل‌سازی ترانسفورماتورهای جریان

به منظور بررسی رفتار واقعی ترانسفورماتورهای جریان در شرایط مختلف از جمله خطاهای داخلی، خطاهای خارجی و در لحظه کلیدزنی ترانسفورماتور، نیاز به مدل دقیق CTها می‌باشد. در این مقاله، از زیر مجموعه اشباع و پسماند مغناطیسی در نرم‌افزار EMTP که در [۱۳] توضیح داده شده است، جهت مدل‌سازی ترانسفورماتورهای جریان استفاده می‌گردد.

۵. شبیه‌سازی

۵.۱. نتایج حاصل از تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ

در این مطالعه، تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ از نوع اجباری مورد بررسی قرار گرفت. این تغییر شکل می‌تواند درجه یک، درجه دو، درجه سه و درجه چهار باشد که همه این موارد بر روی سیم‌پیچ مورد مطالعه در آزمایشگاه صورت گرفت. در این مجموعه، از نظر طولی هر شش دیسک مجاور یا به عبارتی هر سه زوج دیسک مجاور به عنوان یک واحد برای اعمال فرسودگی مدنظر قرار گرفت. در این حالت مقادیر عمق و پهنای تغییر شکل، مطابق شکل ۱ به صورت $d = 0.1r_0$ و $\theta = 45^\circ$ فرض گردید. این خطا عمدتاً باعث تغییر ظرفیت الکتریکی بین لایه بیرونی سیم‌پیچ فشارقوی و تانک می‌شود بنابراین برای این خطا، ظرفیت الکتریکی موازی بین سیم‌پیچ فشارقوی و زمین برای قسمت‌های معیوب با توجه به (۲)، برای درجات مختلف محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: ظرفیت الکتریکی موازی بین سیم‌پیچ فشارقوی و زمین برای زوج

دیسک‌های معیوب

ظرفیت الکتریکی موازی محاسبه شده (نانوفاراد)	درجه تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ
۰/۰۰۲۵۳۱۳	درجه ۱
۰/۰۰۲۴۴۳۷	درجه ۲
۰/۰۰۲۳۵۶۰	درجه ۳
۰/۰۰۲۲۶۸۴	درجه ۴

۵.۳. نتایج حاصل از مرحله طبقه‌بندی خطاها

در این قسمت، جهت نشان‌دادن توانایی طبقه‌بندی کننده بیزین در آشکارسازی و شناخت خطاهای داخلی سیم‌پیچ ترانسفورماتورها، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل^{۱۷} استفاده شده‌است. طبق این تکنیک، در هر گام از اجراء یکی از داده‌ها کنار گذاشته شده و BC با اطلاعات باقی‌مانده، کار خود را انجام می‌دهد. به عنوان مثال کوواریانس و مقدار میانگین هر کلاس با مقادیر بجامانده محاسبه می‌شود. سپس، برای اینکه مشخص شود آیا این طبقه‌بندی کننده قادر به تشخیص شرایط است یا خیر، اطلاعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. اکنون، سیگنال‌های شبیه‌سازی شده در هنگام خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ (جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده از ترانسفورماتور) که شامل ۴ حالت جابه‌جایی محوری، ۴ حالت تغییر شکل شعاعی و یک حالت شرایط سالم سیم‌پیچ بعنوان ورودی به BC داده می‌شود و مقادیر خروجی‌ها طبق جدول ۳ حاصل می‌گردد.

جدول ۳: مقادیر خروجی BC به ازای شرایط مختلف ترانسفورماتور

مقدار BC	شرایط
۰	سالم
خطای تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ	
۱.۵۴۸	درجه ۱
۱.۶۰۰۷	درجه ۲
۱.۶۱۷۸	درجه ۳
۱.۶۲۲۶	درجه ۴
خطای جابه‌جایی محوری سیم‌پیچ	
۰.۴۴۰۶	جابه‌جایی ۱۵ میلیمتری
۰.۶۸۴۵	جابه‌جایی ۳۰ میلیمتری
۰.۷۴۷۱	جابه‌جایی ۴۵ میلیمتری
۰.۹۸۴۱	جابه‌جایی ۶۰ میلیمتری

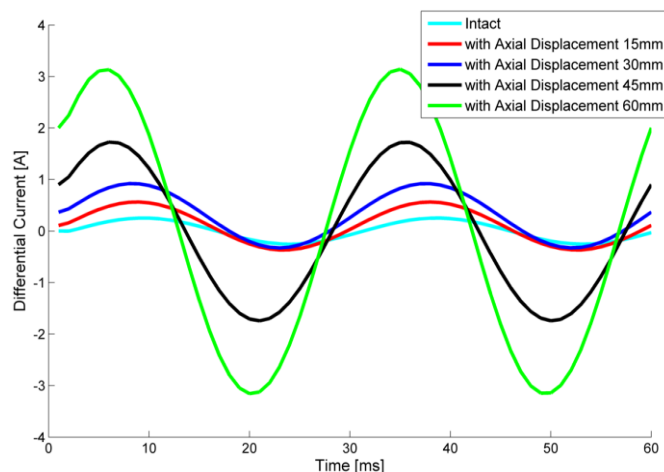
همانطورکه از نتایج موجود در جدول ۳ مشاهده می‌شود، می‌توان دریافت که مقدار خروجی BC به ازای شرایط سالم سیم‌پیچ ترانسفورماتور، برابر صفر خواهد شد. همچنین، به ازای خطاهای مختلف سیم‌پیچ به ازای درجات مختلف، مقادیر BC افزایش خواهد یافت. در نتیجه، می‌توانیم با بررسی نمونه‌های واقعی بیشتر و تشکیل یک پایگاه اطلاعاتی کامل از شرایط مختلف، می‌توانیم از نتایج خروجی‌های طبقه‌بندی کننده بیزین جهت پیاده‌سازی و تنظیم رله‌های دیفرانسیل در حضور خطاها و پیشامدهای مختلف استفاده بسیار مطلوبی نمود. همچنین، بدلیل استفاده از میکروپروسسور و

تحلیل پاسخ فرکانسی و دستگاه امیدانس آنالایزر اندازه‌گیری و نتایج شبیه‌سازی نیز در نرم‌افزار EMTP نشان داده شد. جهت اعتبارسنجی مقادیر به دست آمده، مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های عملی در [۱۲] صورت گرفت و تطبیق خوبی بین آن‌ها وجود داشت. مقادیر محاسبه شده برای القاهای متقابل^{۱۶} بین برخی واحدهای HV, LV سیم‌پیچ در خطای جایی محوری در [۱۲و۲] آمده است.



شکل ۷: سیم‌پیچ مورد مطالعه و دستگاه امیدانس آنالایزر

پس از جایگذاری القاهای متقابل سیم‌پیچ‌ها ناشی از جابه‌جایی محوری به جای القاهای متقابل بین سیم‌پیچ‌ها در حالت سالم در مدل مشروح به وسیله نرم‌افزار EMTP، خطای مکانیکی سیم‌پیچ‌ها ناشی از جابه‌جایی محوری را مدل‌سازی می‌نماییم. جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده به ازای جابه‌جایی‌های محوری مختلف، در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده از ترانسفورماتور به ازای

جابه‌جایی‌های محوری سیم‌پیچ

- transformer," Int. J. Electr. Power Energy Syst, vol. 67, pp. 286-297, 2015.
- [9] N. Loganathan and A. Pavithra, "Distinguishing the Various Faults in transformer and Its Protection Using Support Vector Machine," Int. J. Adv. Res. Elec, vol. 4, no. 2, pp. 568-573, 2015.
- [10] M. Yazdani-Asrami, M. Taghipour-Gorjikotaie, and S.M. Razavi, "A novel intelligent protection system for power transformers considering possible electrical faults, inrush current, CT saturation and over-excitation," Electrical Power and Energy Systems, vol. 64, pp. 1129-1140, 2015.
- [11] H. O. Mota, F. H. Vasconcelos and C. L. de Castro, "A Comparison of Cycle Spinning Versus Stationary Wavelet Transform for the Extraction of Features of Partial Discharge Signals," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 23, no. 2, pp. 1106-1118, 2016.
- [12] S. Bagheri and Z. Moravej, G.B. Gharehpetian "Classification and Discrimination among Winding Mechanical Defects, Internal and External Electrical Faults and Inrush Current of Transformer," IEEE Trans. Industrial Informatics, No. 99, 2017.
- [13] A. Ashrafiyan, M. Rostami and G.B. Gharehpetian, "Hyperbolic S-transform-based method for classification of external faults, incipient faults, inrush currents and internal faults in power transformers," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 6, no. 10, pp. 940-950, 2012.
- [14] A. Ashrafiyan, M. Rostami and G. B. Gharehpetian, "Characterization of internal disturbances and external faults in transformers using an S-transform-based algorithm," Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci, vol. 21, no. 2, pp.330-349, 2013.
- [15] Z. Moravej, A. A. Abdoos and M. Sanaye-Pasand, "Power transformer protection scheme based on time-frequency analysis," Int. Trans. Electr. Energy Syst, vol. 23, no. 4, pp. 473-493, 2013.
- [16] A. Ashrafiyan, B. Vahidi and M. Mirsalim, "Time-time-transform application to fault diagnosis of power transformers," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 8, no. 6, pp. 1156-1167, 2014.
- [17] S. K. Murugan, S. P. Simon, P. S. R. Nayak, K. Sundareswaran and N. P. Padhy, "Power transformer protection using chirplet transform," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 10, no. 10, pp. 2520-2530, 2016.
- [18] س. باقری، ز. مروج، گ. قره‌پتیان، "تمایز میان عیوب مکانیکی سیم‌پیچ، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریان‌های هجومی در ترانسفورماتورها با استفاده از روش ترکیبی"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، در دست چاپ، ایران، ۱۳۹۶.
- [19] A. J. Ghanizadeh and G. B. Gharehpetian, "Application of Characteristic Impedance and Wavelet Coherence Technique to Discriminate Mechanical Defects of Transformer Winding," Electr. Power Compon. Syst, vol. 41, no. 9, pp. 868-878, 2013

پردازش سیگنال دیجیتال در ساختمان رله‌های دیجیتالی و نیومریکال، به راحتی قابلیت پیاده‌سازی این مقادیر خروجی در آن‌ها وجود خواهد داشت.

۶. نتیجه‌گیری

این مقاله، بر روی تمایز خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتورها از شرایط سالم براساس جریان‌های دیفرانسیل نمونه‌برداری شده به‌عنوان مهم‌ترین نوآوری مقاله تمرکز می‌کند. جهت تفکیک و تمایز رویدادهای مختلف از روش طبقه‌بندی کننده بیزین استفاده گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته نشان داد که روش BC قابلیت طبقه‌بندی مناسب خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ از شرایط سالم ترانسفورماتور را خواهد داشت. همچنین، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته در محیط آزمایشگاه نشان داد که بررسی و مدل‌سازی عیوب مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتورها شامل جابه‌جایی محوری و تغییر شکل شعاعی و تشخیص آن‌ها از شرایط سالم، کمک زیادی به تعمیر و نگهداری و حفاظت مطلوب ترانسفورماتورها می‌نماید.

منابع

- [۱] س. باقری، ز. مروج، گ. قره‌پتیان، "تأثیر خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت بر روی عملکرد حفاظت دیفرانسیل" رساله دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، شهریور ۱۳۹۶.
- [2] S. Bagheri, Z. Moravej, and G. B. Gharehpetian "Effect of transformer winding mechanical defects, internal and external electrical faults and inrush currents on performance of differential protection," IET Generation, Transmission & Distribution, vol 11, No. 10, pp. 2508-2520, 2017.
- [۳] م. اخوان حجازی، گ. قره‌پتیان، "مروری بر مسئله پایش سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت جهت تشخیص جابه‌جایی محوری و تغییر شکل شعاعی با استفاده از امواج الکترومغناطیسی"، دومین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی ترانسفورماتور، ایران، تهران، ۱۳۹۴.
- [4] P. Karimifard, G.B. Gharehpetian, A.J. Ghanizadeh and S. Tenbohlen, "Estimation of Simulated Transfer Function to Discriminate Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Winding," COMPEL, vol. 31, no. 4, pp. 1277-1292, 2012.
- [5] M. Bigdeli, M. Vakilian and E. Rahimpour, "A Probabilistic Neural Network Classifier-based Method for Transformer Winding Fault Identification Through its Transfer Function Measurement," Int. Trans. Electr. Energy Syst, vol. 23, no. 3, pp.392-404, 2011.
- [6] Z. Moravej, D. N. Vishwakarma and S. P. Singh, "Application of radial basic function neural network for differential relaying of a power transformer," Comput. Electr Eng, vol. 29, no. 3, pp. 421-434, 2003.
- [7] O. Ozgonenel and S. Karagol, "Power transformer protection based on decision tree approach," IET Electr. Power Appl, vol. 8, no. 7, pp. 251-256, 2014.
- [8] H. Balaga, N. Gupta and D. N. Vishwakarma, "GA trained parallel hidden layered ANN based differential protection of three phase power

¹ Axial Displacement (AD)

² Radial Deformation (RD)

³ Vector Fitting method (VF)

⁴ Probabilistic Neural Network (PNN)

⁵ Decision Tree (DT)

⁶ Artificial Neural Network (ANN)

⁷ Support Vector Machine (SVM)

⁸ Bayesian Classifier

⁹ Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform

¹⁰ Chirplet Transform

¹¹ Forced

¹² Free

¹³ Bayes Theorem

¹⁴ Training

¹⁵ Detailed Model

¹⁶ Mutual Inductances

¹⁷ Cross Validation