

تشخیص و طبقه‌بندی خطاهای الکتریکی ترانسفورماتور قدرت به صورت برخط با استفاده از الگوی هندسی تغییرات پارامترها

مهران حسنی^۱، رضا کاظمی گل خندان^۲، حسین ترکمن^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، Hassani.mehran@sbu.ac.ir

^۲ دکتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، Reza.kazemi@birjand.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، H_Torkaman@sbu.ac.ir

چکیده

ترانسفورماتورها بخشی یکپارچه از سیستم قدرت هستند که پیوند حیاتی بین تولید و مصرف می‌باشند. از همین رو، احتراز از وقوع خطا در ترانسفورماتورهای قدرت، به ویژه خطاهای منجر به شکست ترانسفورماتور، اهمیت زیادی برای بهره‌برداران شبکه دارد. تاکنون روش‌های متعددی برای تشخیص زود هنگام خطاهای داخلی ترانسفورماتور به منظور ارتقاء حفاظت این تجهیزات ارائه شده است. در این مقاله روشی جدید و کارا برای تشخیص و طبقه‌بندی انواع خطاهای الکتریکی داخلی در ترانسفورماتور قدرت، به کمک تشکیل منحنی مکان هندسی تغییرات ولتاژ-تغییرات جریان، برای هر سه فاز ترانسفورماتور ارائه می‌شود. روش معرفی شده به صورت برخط و بدون احتیاج به تجهیزات خاصی و تنها با پایش ولتاژهای اولیه و ثانویه و جریان اولیه ترانسفورماتور پیاده‌سازی می‌شود. در این روش، ابتدا جهت تحلیل رفتار ترانسفورماتور در شرایط خطاهای مختلف داخلی، ترانسفورماتور بر اساس روش اجزاء محدود مدل‌سازی می‌شود. سپس پارامترهای ترانسفورماتور استخراج شده و ویژگی‌های مختلف برآمده از الگوی منحنی مکان هندسی به عنوان شاخص‌ها و الگوهایی برای تشخیص و طبقه‌بندی خطاهای داخلی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که روش مذکور در قیاس با سایر روش‌ها، ساده‌تر و با صرف هزینه کمی قابل پیاده‌سازی است و در تشخیص خطا از دقت مناسبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی

الگوی تغییرات، ترانسفورماتور قدرت، تشخیص و طبقه‌بندی الکتریکی داخلی، روش اجزاء محدود، منحنی مکان هندسی

مقدمه

ترانسفورماتورها یکی از مهم‌ترین و گران‌ترین تجهیزات در سیستم‌های توزیع و انتقال می‌باشند. مدت بهره‌برداری از بسیاری ترانسفورماتورها در سیستم قدرت فراتر از عمر عملیاتی آن‌ها می‌باشد و همین امر احتمال وقوع خطا را در ترانسفورماتورها افزایش می‌دهد [۱]. خرابی‌های الکتریکی و مکانیکی در ترانسفورماتورها هزینه‌های زیادی در پی دارند و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت را کاهش

می‌دهند. لذا، ابزار تشخیص دقیق به منظور کشف خطاهای داخلی بسیار حائز اهمیت می‌باشند [۳ و ۲]. تاکنون روش‌های متعددی برای تشخیص و طبقه‌بندی انواع خطاهای داخلی ترانسفورماتورها ارائه شده‌اند. در [۴]، تشخیص تغییر شکل در سیم‌پیچی ترانسفورماتور با آنالیز پاسخ فرکانسی صورت می‌پذیرد. در بین روش‌های متعدد مکانیکی و الکتریکی که در حال حاضر برای ارزیابی شرایط سالم ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]، آنالیز پاسخ فرکانسی بطور گسترده به عنوان روشی قابل قبول برای تشخیص تغییر شکل-های مکانیکی در ترانسفورماتورهای قدرت بکار گرفته می‌شود [۶]. روش آنالیز پاسخ فرکانسی قادر به تشخیص تنزل در شرایط عایقی سیستم نیز می‌باشد [۷ و ۸]. در [۹]، روشی جدید برای آنالیز پاسخ فرکانسی مطرح شده که در آن تلفیق نمودارهای اندازه و زاویه فاز در یک نمودار قطبی صورت می‌پذیرد. نمودار قطبی استخراج شده با بکارگیری این روش، امکان استفاده از روش‌های پردازش تصویر دیجیتال را فراهم می‌کند. در [۱۰]، روش برخطی برای تشخیص خطای داخلی ترانسفورماتور به منظور مشخص کردن هرگونه تغییر اولیه‌ای در ساختار مکانیکی داخلی ترانسفورماتور مطرح شده است. در [۱۱]، تشخیص برخط خطای داخلی ترانسفورماتور با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان لحظه‌ای و همچنین در نظر گرفتن اثر هارمونیک‌ها انجام می‌شود. بررسی اثر هارمونیک‌ها از طریق شبیه‌سازی غیرخطی ترانسفورماتور با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود سه بعدی صورت می‌پذیرد. در [۱۲]، روشی جدید برای تشخیص خطای حلقه به حلقه ترانسفورماتور با توجه به جریان‌های افزایشی خطا ارائه شده است. عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله مستقل از شرایط کاری ترانسفورماتور است. تشخیص خطای حلقه به حلقه با استفاده از اختلاف بین زاویه فاز مولفه ترادف منفی جریان‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در [۱۳ و ۱۴] توضیح داده شده است.

در [۱۵] از هارمونیک سوم به منظور تشخیص خطای داخلی حلقه به حلقه استفاده شده است. در [۱۶]، روشی مبتنی بر شار پیوندی و حفاظت شار پیوندی به منظور شناسایی خطای داخلی ترانسفورماتور ارائه شده است. در [۱۷]، تشخیص خطای داخلی و خارجی با استفاده از جریان‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و تعیین علامت معادله تفکیک خطا انجام می‌شود.

در [۱۸]، خطای درون حلقه‌ای سیم‌پیچی با بکارگیری روشی بر مبنای استفاده از تبدیل موجک گسسته تشخیص داده می‌شود. تبدیل موجک به منظور تجزیه سیگنال‌های جریان در پایانه ترانسفورماتور به یک سری از مولفه‌های موجک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. محل خطا و شدت خطا در ترانسفورماتور بر اساس توالی صفر مولفه‌های متقارن در [۲۰] مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله روشی ارائه شده که با بکارگیری آن، تشخیص و طبقه‌بندی سه نوع مهم از خطاهای الکتریکی داخلی ترانسفورماتور از جمله؛ خطای اتصال حلقه به حلقه، خطای اتصال فاز به فاز و خطای اتصال فاز به زمین به کمک منحنی‌های مکان هندسی صورت می‌پذیرد. در ابتدا با شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار اجزا محدود Maxwell [۲۱]، سیگنال‌های ولتاژ و جریان استخراج می‌شوند و با توجه به رابطه‌های استخراج شده بین ولتاژها و جریان‌ها، منحنی‌های مکان هندسی ترسیم می‌شوند. پس از آن به کمک منحنی‌های مکان هندسی بدست آمده از مرحله قبل، نوع خطای داخلی تشخیص داده می‌شود. ساده بودن و هزینه نسبی اندک در مقایسه با روش‌های دیگر و امکان پایش برخط، گواه برتری روش پیشنهادی بر سایر روش‌های ذکر شده است. در پایان فلوجارت مربوط به مراحل تشخیص نوع خطای رخ داده در ترانسفورماتور ترسیم شده است.

خطاهای داخلی ترانسفورماتور

خطاهایی که در داخل محفظه ترانسفورماتور رخ می‌دهند قابل تقسیم به دو دسته کلی خطاهای ابتدایی و خطاهای اکتیو هستند. از جمله خطاهای ابتدایی می‌توان به اضافه دما، اضافه شار و افزایش فشار محفظه بر اثر آزاد شدن گازهایی در ترانسفورماتور اشاره نمود. این دسته از خطاها به تدریج گسترش یافته و چنانچه علت آن شناسایی و اصلاح نشود می‌توانند منجر به شکست کامل عایق و وقوع خطاهای بزرگتر در بین فازهای ترانسفورماتور شوند.

خطاهای اکتیو با شکست سیستم عایقی به وقوع پیوسته و منجر به ایجاد تنش ناگهانی در تجهیز می‌شوند. لذا، نیاز به عملکرد سریع رله‌های حفاظتی دارند. این دسته از خطاها زمانی اتفاق می‌افتد که جریان از یک حلقه به حلقه‌ای دیگر یا از یک هادی فاز به دیگری جاری شود. خطاهای اکتیو شامل موارد؛ ۱) اتصال کوتاه حلقه به حلقه، ۲) اتصال کوتاه فاز به فاز، ۳) اتصال کوتاه فاز به زمین ۴) خطای تانک و ۵) خطاهای هسته می‌شوند. از بین خطاهای ذکر شده، موارد ۲، ۱ و ۳ به دلیل اهمیت بیشتر در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند.

خطای اتصال کوتاه حلقه به حلقه

پدیده خطای حلقه به حلقه سیم‌پیچی که منشأ داخلی دارد، بر میزان طول عمر ترانسفورماتور موثر است. خطای حلقه به حلقه سیم‌پیچی یکی از اصلی‌ترین دلایل مربوط به خروج غیر برنامه‌ریزی شده ترانسفورماتورها می‌باشد. اگر وقوع این خطا در مراحل ابتدایی

تشخیص داده نشود، می‌تواند منجر به یک خطای پرهزینه فاز به زمین شود [۱۲]. این نوع از خطاها به علت آسیب دیدن عایق و اتصال هادی‌های با ولتاژ متفاوت به یکدیگر می‌باشند و برای قابلیت اطمینان ترانسفورماتورها مورد توجه هستند. مطابق استاندارد IEEE C37.91-2000 برای ترانسفورماتورها، در زمان خطاهای اولیه یا به هنگام خطای اتصال کوتاه حلقه به حلقه شامل ۱۰ در صد کل حلقه‌های سیم‌پیچی ترانسفورماتور، تغییر قابل توجهی در دامنه جریان ترمینالی به وجود نمی‌آید که این مسئله حفاظت ترانسفورماتور را دچار مشکل می‌کند. در نتیجه تشخیص خطای داخلی حلقه به حلقه هنگام اتصال کوتاه تعداد اندکی از حلقه‌ها، کاری دشوار است.

خطای اتصال کوتاه فاز به فاز

نحوه سیم‌پیچی کردن ترانسفورماتورها به گونه‌ای است که معمولاً سیم‌پیچی فشار ضعیف را به دور هسته می‌پیچند، سپس سیم‌پیچی فشار قوی را به دور سیم‌پیچ فشار ضعیف قرار می‌دهند. علت این امر نیز سهولت در عایق بندی بین سیم‌پیچی فشار قوی و هسته می‌باشد. در یک ترانسفورماتور سه فاز ممکن است بر اثر طول عمر ترانسفورماتور و پیر شدن و کاهش قدرت عایقی، بین سیم‌پیچی‌های فشار قوی دو فاز مجاور هم (AB و BC) خطای اتصال کوتاه رخ دهد.

خطای اتصال کوتاه فاز به زمین

در صورت عدم تشخیص به موقع خطای حلقه، خطا در طول سیم‌پیچی گسترش می‌یابد و منجر به خطاهای شدیدتر، یعنی خطای فاز به زمین می‌گردد.

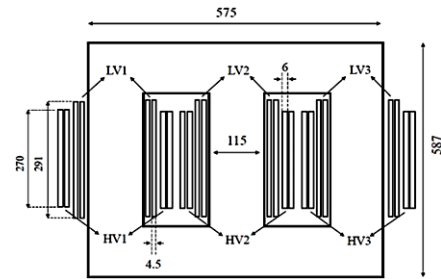
روش تشخیص پیشنهادی

روش پیشنهادی در این مقاله شامل دو مرحله است. در مرحله اول، سیگنال‌های جریان و ولتاژ به کمک نرم‌افزار Maxwell استخراج می‌شوند. در مرحله دوم نیز به کمک روش منحنی‌های مکان هندسی استخراج شده و با توجه به جریان‌ها و ولتاژهای اندازه‌گیری شده، نوع خطای داخلی ترانسفورماتور تشخیص داده می‌شود.

استخراج سیگنال‌های ولتاژ و جریان

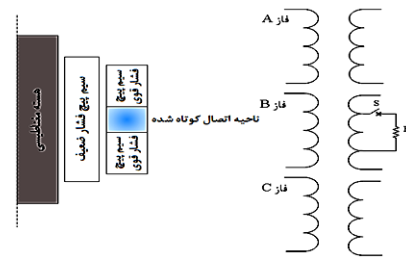
استخراج سیگنال‌های ولتاژ و جریان به کمک نرم‌افزار Maxwell صورت می‌گیرد. مدل طراحی شده، بایستی علاوه بر قابلیت شبیه‌سازی رفتار دقیق ترانسفورماتور تحت خطا و لحاظ نمودن ماهیت غیرخطی ترانسفورماتور، امکان دسترسی به میدان‌های الکترومغناطیسی نامتقارن داخل ترانسفورماتور را فراهم نماید. چرا که در شرایط وقوع خطاهای اتصال کوتاه سیم‌پیچی، مسیر و شدت مؤلفه‌های شار الکترومغناطیسی داخل ترانسفورماتور دچار تغییرات اساسی و جدی می‌شوند. برای شبیه‌سازی ترانسفورماتور به منظور ارضا کردن تمامی ملزوماتی که اشاره شد، از نرم افزار Maxwell 16.0 در این مقاله استفاده شده است. شکل ۱ ترانسفورماتور طراحی

شده در نرم افزار Maxwell به همراه ابعاد آن برحسب میلی متر را نشان می دهد.



شکل ۱: ترانسفورماتور طراحی شده در نرم افزار Maxwell به همراه ابعاد آن برحسب میلی متر

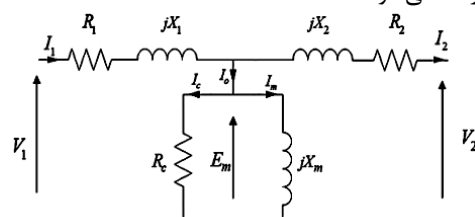
اساس مدل سازی خطای اتصال کوتاه سیم پیچی در ترانسفورماتور قدرت به روش اجزاء محدود، مشابه روش ارائه شده در [۲۲]، تقسیم سیم پیچی حامل خطای اتصال کوتاه به دو ناحیه اتصال کوتاه و ناحیه سالم می باشد. شکل ۲، حوزه های مداری و اجزاء محدود ترانسفورماتور با فرض اینکه خطای اتصال کوتاهی در سیم پیچی ثانویه فاز B ترانسفورماتور رخ داده را نمایش می دهد.



شکل ۲: حوزه های مداری و اجزاء محدود ترانسفورماتور با فرض خطای اتصال کوتاه در سیم پیچی ثانویه فاز B ترانسفورماتور

به منظور کنترل شدت جریان خطا در حلقه های اتصال، از یک مقاومت سری (R) با حلقه های اتصال استفاده شده است. برای کنترل زمان شروع خطا در طول سیم پیچی، یک سوئیچ زمانی (S) به همراه مقاومت خطا در حلقه های اتصال بکار گرفته شده است که با وصل آن، خطای اتصال کوتاه در حلقه ها آغاز می شود.

تشخیص خطای داخلی به کمک منحنی مکان هندسی در این مقاله روش مورد استفاده به منظور پایش همزمان ترانسفورماتور، تشکیل یک منحنی دو بعدی (X-Y) است که جریان سمت اولیه ترانسفورماتور به عنوان محور X و اختلاف ولتاژ بین ولتاژهای اولیه و ثانویه به عنوان محور Y در نظر گرفته می شود. برای درک بهتر، مدار معادل ترانسفورماتور تکفاز بصورت شکل ۳ در نظر گرفته می شود.



شکل ۳: مدار معادل ترانسفورماتور تکفاز

با در نظر گرفتن ولتاژ سمت ثانویه به عنوان مرجع فاز، روابط ولتاژهای ثانویه و اولیه و جریان اولیه را می توان به صورت (۱) تا (۳) نوشت. V_{1m} ، V_{2m} و I_{1m} به ترتیب مقادیر بیشینه ولتاژ ثانویه، ولتاژ اولیه و جریان اولیه می باشند.

$$v_2(t) = V_{2m} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$v_1(t) = V_{1m} \sin(\omega t + \delta) \quad (2)$$

$$i_1(t) = I_{1m} \sin(\omega t - \phi) \quad (3)$$

جریان اولیه به عنوان متغیر محور X و اختلاف ولتاژهای اولیه و ثانویه به عنوان متغیر محور Y بصورت (۴) و (۵) در نظر گرفته می شوند.

$$x = i_1(t) = I_{1m} \sin(\omega t - \phi) \quad (4)$$

$$y = v_1(t) - v_2(t) = (V_{1m} \sin(\delta) \cos(\omega t) + (V_{1m} \cos(\delta) - V_{2m}) \sin(\omega t)) \quad (5)$$

متغیر محور Y را می توان بصورت (۶) نوشت.

$$y = \sqrt{(V_{1m}^2 + V_{2m}^2 - 2V_{1m}V_{2m} \cos(\delta))} \sin(\omega t + \tan^{-1}(\frac{V_{1m} \sin(\delta)}{V_{1m} \cos(\delta) - V_{2m}})) \quad (6)$$

به منظور ساده سازی، (۷) - (۹) تعریف می شوند.

$$|\Delta V| = \sqrt{(V_{1m}^2 + V_{2m}^2 - 2V_{1m}V_{2m} \cos(\delta))} \quad (7)$$

$$\angle \Delta V = \tan^{-1}(\frac{V_{1m} \sin(\delta)}{V_{1m} \cos(\delta) - V_{2m}}) \quad (8)$$

$$y = |\Delta V| \sin(\omega t + \angle \Delta V) \quad (9)$$

با حذف ωt از (۴) و (۹) معادله دکارتی بین X و Y به صورت رابطه (۱۰) دست می آید.

$$\omega t = \sin^{-1}(\frac{x}{I_{1m}}) + \phi = \sin^{-1}(\frac{y}{|\Delta V|}) - \angle \Delta V \quad (10)$$

رابطه (۱۰) را می توان به صورت (۱۱) ساده سازی نمود.

$$\sin^{-1}(\frac{y}{|\Delta V|}) - \sin^{-1}(\frac{x}{I_{1m}}) = \phi + \angle \Delta V \quad (11)$$

با گرفتن عملگر COS از طرفین (۱۱) و ساده سازی آن، (۱۲) بدست می آید.

$$\sqrt{1 - \frac{y^2}{|\Delta V|^2}} \times \sqrt{1 - \frac{x^2}{I_{1m}^2}} = \cos(\phi + \angle \Delta V) - \frac{xy}{I_{1m} |\Delta V|} \quad (12)$$

با مربع کردن طرفین (۱۲)، (۱۳) استخراج می شود.

$$|\Delta V|^2 x^2 - 2I_{1m} |\Delta V| \cos(\angle \Delta V + \phi) xy + I_{1m}^2 y^2 = |\Delta V|^2 I_{1m}^2 \sin^2(\angle \Delta V + \phi) \quad (13)$$

به منظور ساده سازی، پارامترهای A، B، C و F به ترتیب مطابق (۱۴) تا (۱۷) تعریف می شوند.

$$A = |\Delta V|^2 \quad (14)$$

$$B = -2I_{1m} |\Delta V| \cos(\angle \Delta V + \phi) \quad (15)$$

$$C = I_{1m}^2 \quad (16)$$

همچنین، مقادیر مربوط به این حالت در جدول ۱ آورده شده‌اند. در آن، a ، نصف قطر بزرگ، b نصف قطر کوچک، e خروج از مرکز و θ زاویه چرخش منحنی مکان هندسی مورد نظر نسبت به محور X است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ارزیابی برای ترانسفورماتور سالم

پارامترها	a	b	e	θ
فاز A	۰.۴۸/۶	۶۱/۰	۹۹۴/۰	۲/۶۳
فاز B	۰.۴۸/۶	۶۱/۰	۹۹۴/۰	۲/۶۳
فاز C	۰.۴۷/۶	۶۱/۰	۹۹۴/۰	۲/۶۳

خطای حلقه به حلقه

در هنگام رخداد خطای حلقه به حلقه با شدت کم، در جریان و توزیع شار همان فازی که خطا رخ داده است تغییراتی رخ می‌دهد و دو فاز دیگر دچار تغییرات محسوس نمی‌شوند. اما در هنگام وقوع خطای حلقه به حلقه با شدت زیاد، توزیع شار در ستون‌های فازهای سالم نیز دستخوش تغییر می‌شود. شکل ۶ منحنی‌های مکان هندسی سه فاز را قبل و بعد از وقوع خطای حلقه به حلقه با شدت‌های مختلف در اولیه فاز A را نشان می‌دهد. همانطوری که از نتایج پیداست، هنگام رخداد خطای حلقه به حلقه با شدت کم، قطر بزرگ فازی که خطا در آن رخ داده است بیشتر می‌گردد و از طرفی بیضی در جهت ساعتگرد متناسب با شدت خطا چرخش می‌کند. اما برای دو فاز دیگر قطر بزرگ و زاویه دوران بیضی تغییر محسوس نمی‌کند و تنها مقدار بسیار ناچیزی از قطر کوچک آنها کاسته می‌شود. اما با افزایش شدت خطا، همانطور که انتظار می‌رفت منحنی مکان هندسی هر سه فاز بعد از وقوع خطا دچار تغییر می‌شوند. نحوه تغییرات به این ترتیب است که منحنی مکان هندسی فاز A که خطا در آن رخ داده است بعد از وقوع خطا، قطر بزرگ آن نسبت به قطر بزرگ بیضی‌های دوفاز دیگر بزرگتر شده و به میزان بیشتری دچار چرخش می‌شود اما تغییرات چندانی در قطر کوچک منحنی‌ها ایجاد نمی‌گردد. از طرفی قطر بزرگ و قطر کوچک بیضی فاز B با افزایش شدت خطا بزرگتر می‌شود. همچنین زاویه چرخش بیضی فاز B با افزایش شدت خطا در جهت ساعتگرد، می‌چرخد اما میزان چرخش آن در قیاس با چرخش فاز A بسیار کوچک است. اما تغییرات در فاز C از یک قاعده خاص تبعیت نمی‌کند. به این ترتیب که قطر بزرگ بیضی با افزایش تعداد حلقه‌های خطا مقداری افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه ستون فاز C در فاصله بیشتری در قیاس با فاز B، از فاز A قرار دارد، میزان تغییرات قطر بزرگ آن نسبت به فاز B کمتر است.

در حالت کلی در خطای حلقه به حلقه اگر شدت خطا کم باشد، تنها بیضی مربوط به فاز خطادار تغییر می‌یابد این گونه که قطر بزرگ آن مقداری بزرگ می‌شود و در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. اگر خطا شدید باشد، بیضی هر سه فاز دچار تغییر می‌شود. میزان تغییرات فاز خطا دیده بیشتر است.

$$F = |\Delta V|^2 I_{1m}^2 \sin^2(\angle \Delta V + \phi) \quad (17)$$

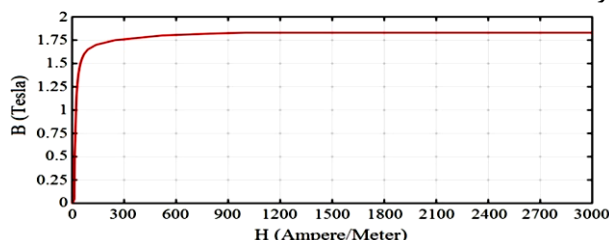
و در نهایت، رابطه نهایی بین X و Y به صورت (۱۸) استخراج می‌شود.

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 = F \quad (18)$$

رابطه (۱۸) معرف یک مقطع مخروطی در صفحه $X-Y$ می‌باشد. از آنجایی که $B^2 - 4AC$ ، به ازای تمامی مقادیر، همواره منفی است و با توجه به غیر صفر بودن مقادیر A, B, C رابطه بین جریان اولیه ترانسفورماتور با اختلاف ولتاژ اولیه و ثانویه آن، یک بیضی است.

شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

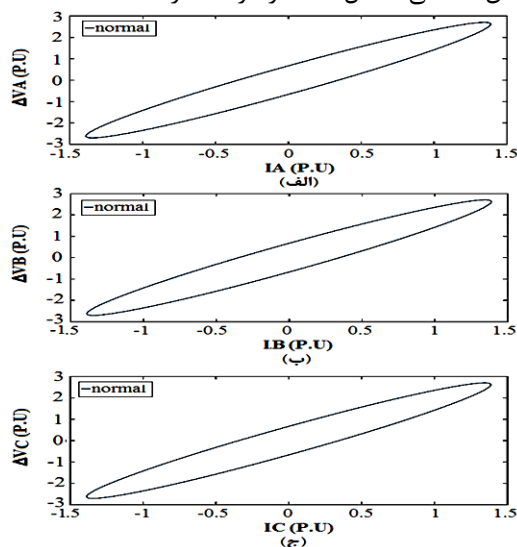
کار برای نشان دادن کارآمدی روش پیشنهادی در این مقاله، ترانسفورماتوری با مشخصه $100 \text{ KVA}, 20 \text{ KV}/0.4 \text{ KV}$ ، در نرم افزار Maxwell شبیه‌سازی شده است. به منظور مدل‌سازی ماهیت غیرخطی هسته، منحنی مغناطیس‌کنندگی هسته که در شکل ۴ نشان داده شده است، به نرم افزار اعمال گردیده و شبیه‌سازی‌ها در دو حالت شرایط کارکرد عادی و شرایط خطا، انجام و مورد بررسی قرار گرفته است.



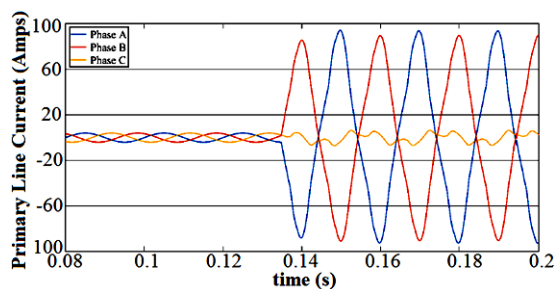
شکل ۴: منحنی مغناطیس‌کنندگی هسته ترانسفورماتور مورد آزمایش

شرایط کارکرد عادی ترانسفورماتور

برای مدل‌سازی شرایط کارکرد عادی ترانسفورماتور، سمت اولیه آن به منبع تغذیه سه فاز ۲۰ کیلوولت و سمت ثانویه به بار مقاومتی ۱.۶ اهم با توان نامی متصل شده است که شکل ۵ نشان دهنده منحنی‌های مکان هندسی حاصل شده در هر سه فاز است.



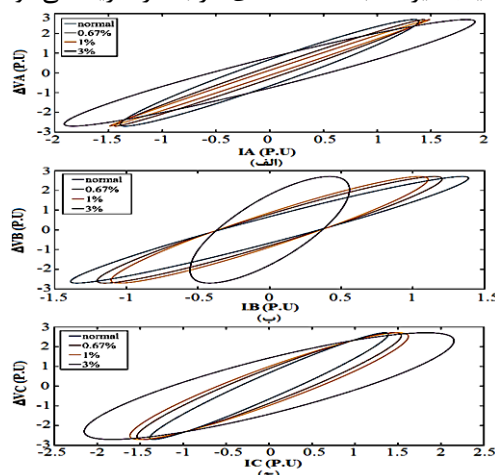
شکل ۵: منحنی مکان هندسی سه فاز A, B, C در شرایط کارکرد نرمال



شکل ۸: جریان‌های سمت اولیه به ازای خطای ۲۱ درصدی فاز به فاز در سمت اولیه

خطای فاز به زمین

شکل ۹ منحنی مکان هندسی ولتاژ-جریان مربوط به هر سه فاز ترانسفورماتور مورد آزمایش برای خطای فاز به زمین با شدت‌های مختلف را نشان می‌دهد. خطا در اولیه فاز A رخ داده است. شدت خطا در اینجا نیز مشابه شدت خطای فاز به فاز تعریف می‌شود.

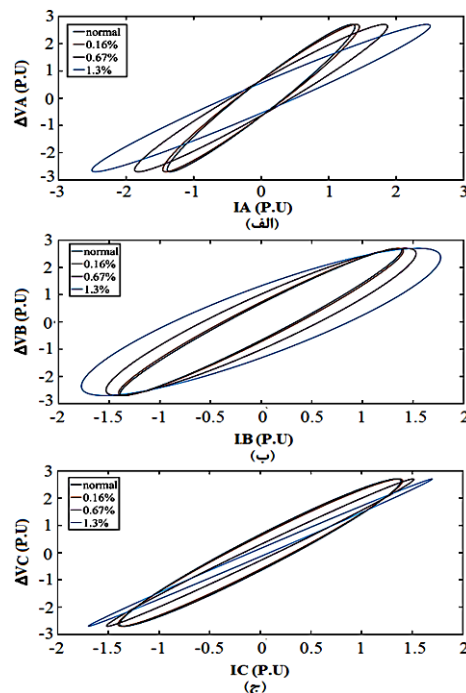


شکل ۹: منحنی مکان هندسی سه فاز ترانسفورماتور برای خطای فاز به زمین با شدت‌های مختلف A2G

همانطور که از شکل‌ها نتیجه می‌شود، منحنی مکان هندسی مربوط به یک فاز بعد از وقوع خطا در خلاف جهت عقربه‌های ساعت گردش داشته و همچنین قطر بزرگ آن با افزایش شدت خطا دچار کاهش می‌شود. از همین نحوه تغییر به راحتی می‌توان وقوع خطای فاز به زمین داخلی را تشخیص داد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

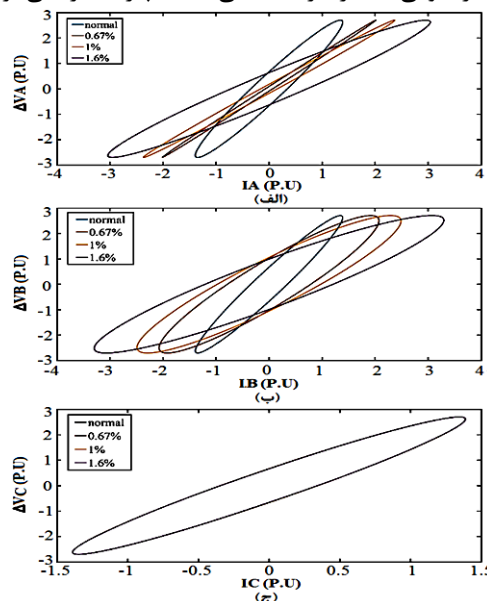
روشی که در این مقاله به منظور پایش برخط ترانسفورماتور قدرت مورد استفاده قرار گرفته است، بر پایه تشکیل منحنی‌های مکان هندسی با استفاده از دو پارامتر (۱) اختلاف بین ولتاژهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور به عنوان متغیر محور Y و (۲) جریان سمت اولیه ترانسفورماتور به عنوان متغیر محور X استوار است. برای انجام بررسی‌ها، منحنی‌های مکان هندسی ولتاژ-جریان برای هر سه فاز ترانسفورماتور مورد بررسی در حالت نرمال و همچنین در حالت خطاهای الکتریکی داخلی (حلقه به حلقه، دو فاز به هم و فاز به زمین) تشکیل شدند. پس از آن به کمک پردازش منحنی‌های حاصل شده و مقایسه آنها با حالت نرمال (بدون خطا)، وجود خطا در



شکل ۶: منحنی مکان هندسی سه فاز در زمان خطای حلقه به حلقه

خطای فاز به فاز

شکل ۷ منحنی مکان هندسی سه فاز ترانسفورماتور را در حضور خطای فاز به فاز A به B نشان می‌دهد. دو فازی که دچار خطا شده‌اند، دارای تغییرات زیادی در قطر بزرگ، قطر کوچک و زاویه چرخش هستند. فاز سوم که درگیر خطا نمی‌باشد دچار تغییر نمی‌گردد.



شکل ۷: منحنی مکان هندسی سه فاز ترانسفورماتور در حضور خطای فاز به فاز A2B

نحوه الگوی تغییرات بیضی‌ها، در شرایط خطای دو فاز B و C نیز به همین ترتیب می‌باشد. شکل ۸، جریان‌های سمت اولیه ترانسفورماتور را هنگام وقوع خطای فاز به فاز بین دو فاز A و B را نشان می‌دهد که در آن شدت خطا ۲۱ درصد از کل سیم‌پیچ را شامل می‌شود.

Bushing Faults and Oil Degradation using FRA Polar Plot Signature". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(1), pp. 428-436.

- [10] Masoum, A. S., Hashemnia, N., Abu-Siada, A., Masoum, M.A.S., Islam, S., 2014. "Finite-element performance evaluation of on-line transformer internal fault detection based on instantaneous voltage and current measurements". *Australian Journal of Electrical and Electronic Engineering (AJEEE)*, 11(4), pp. 1-9.
- [11] Masoum, A. S., Hashemnia, N., Abu-Siada, A., 2017. "Online Transformer Internal Fault Detection Based on Instantaneous Voltage and Current Measurements Considering Impact of Harmonics". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(2), pp. 587-598.
- [12] Farzin, N., Vakilian, M., Hajipour, E., 2019. "Transformer Turn-to-Turn Fault Protection Based on Fault-Related Incremental Currents". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(2), pp. 700-709.
- [13] Gajic, Z., Brncic, I., Hillstrom, B., Ivankovic, I., 2005. "Sensitive turn-to-turn fault protection for power transformers". In *CIGRE Study Committee B5 Colloq.*
- [14] Technical Manual, 2014. "Transformer Protection RET670", ABB, Sweden. [Online]. Available: <http://www.abb.com>.
- [15] Nandi, S., 2007. "A Novel Frequency Domain Based Technique to Detect Transformer Inter-turn Faults". *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 1, pp. 569-574.
- [16] Haghighi, F., Mostafaei, M., Mohammadzadeh, M., 2015. "A Novel Flux-based Protection Scheme for Power Transformers". *The 9th Power Systems Protection and Control Conference (PSPC)*, Tehran, Iran.
- [17] Mahmouda, A. M., El- Naggat, M. F., Shehab-Eldina, E. H., 2012. "A new technique for power transformer protection based on transient components". *Energy Procedia*, 14, pp.318- 324.
- [18] Behjat, V., Vahedi, A., 2011. "A DWT based approach for detection of inter turn faults in power transformers". *COMPEL: The International Journal of Computations and Mathematics in Electrical and Electronic*, 30(2), pp. 483-504.
- [19] فلاح، مهدی، کاظم‌زاده، رسول، توکلی بینا، محمد، نجفی اقدم، اسماعیل، ۱۳۹۴. "بهبود پاسخ گذرا و دائم روش جبران‌سازی تئوری توان لحظه‌ای با استفاده از حداقل مربعات بازگشتی و تبدیل موجک در شرایط ولتاژ غیر ایده‌آل". سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق، ۱۳(۱)، ۱۳۹۴، صفحه ۵-۲۱.
- [20] Díaz, G., Gómez-Aleixandre, J., Arbolea, P., 2004. "Diagnosis of a turn-to-turn short circuit in power transformers by means of zero sequence current analysis". *Electric Power Systems Research Journal*, 69(2-3), pp. 321-329.
- [21] A. Group, "Ansoft Maxwell," 16.0.0 ed. Australia Leading Engineering Application Providers Australia, 2013.
- [22] Bastard, P., Bertrand, P., Meunier, M., 1994. "A transformer model for winding fault studies". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(2), pp. 690-699.

ترانسفورماتور تشخیص داده شد و طبقه‌بندی نوع خطا صورت پذیرفت. مشاهده شد که منحنی مکان هندسی حاصله همواره بیضوی شکل است. معیار و ملاک مورد استفاده برای طبقه‌بندی خطای ترانسفورماتور، نحوه تغییرات منحنی مکان هندسی ولتاژ- جریان مربوط به هر یک از سه فاز بعد از وقوع خطا نسبت به منحنی مکان هندس همان فاز در حالت نرمال است. در واقع می‌توان گفت، نحوه تغییرات منحنی‌های مکان هندسی بیضوی سه فاز در شرایط مختلف منحصر بفرد می‌باشد. پر واضح است که اگر نحوه آرایش سیم‌پیچ ترانسفورماتور تغییر کند نتایج حاصل شده نیز تغییر می‌کنند. به عبارتی نحوه تغییرات حاصل شده در منحنی‌های مکان هندسی در این مقاله تنها مختص ترانسفورماتوری با آرایش YZn5 می‌باشد. در نهایت با استفاده از کدنویسی متلب، آنالیز روی شکل‌های بدست آمده صورت گرفت و نحوه تغییرات قطر بزرگ، قطر کوچک، زاویه‌ی چرخش و خروج از مرکز بیضی‌ها برای حالت‌های مختلف بدست آورده شدند.

مراجع و منابع

- [1] IEEE Std C57.149-2012, 2013. "IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers". pp. 1-72.
- [2] Hyun-Mo, A., Ji-Yeon, L., Joong-Kyoung, K., Yeon-Ho, O., Sang-Yong, J., Sung-Chin, H., 2011. "Finite-Element Analysis of Short- Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(3), pp. 1267-1272.
- [3] Abu-siada, A., Islam, S., 2012. "A Novel Online Technique to Detect Power Transformer Winding Faults". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), pp. 849-857.
- [4] Abu-Siada, A., Hashemnia, N., Islam, S., Masoum, M. A. S., 2013. "Understanding power transformer frequency response analysis signatures". *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 29(3), pp. 48-56.
- [5] Abu-Siada, A., Islam, S., 2012. "A new approach to identify power transformer criticality and asset management decision based on dissolved gas-in-oil analysis". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(3), pp. 1007-1012.
- [6] Aljohani, O., Abu-Siada, A., 2015. "Minimum detection of power transformer short circuit fault using frequency response analysis". *Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-5.
- [7] Yousof, M. F. M., Ekanayake, C., Saha, T. K., 2015. "Examining the ageing of transformer insulation using FRA and FDS techniques". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2), pp. 1258-1265.
- [8] Hashemnia, N., Abu-Siada, A., Islam, S., 2016. "Detection of power transformer bushing faults and oil degradation using frequency response analysis". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(1), pp. 222-229.
- [9] Alijohani, O., Abu-Siada, A., 2017. "Application of Digital Image Processing to Detect Transformer