



تشخیص و طبقه‌بندی عیوب داخلی ترانسفورماتورهای قدرت

عمار موسوی شکیب*^۱، سید مجید کشاورز^۲

چکیده:

شبکه گسترده سیستم قدرت دارای تجهیزات بسیار گران‌قیمتی می‌باشد که از جمله آن می‌توان به ژنراتور، بریکر، کابل‌های قدرت و ترانسفورماتور اشاره کرد. ترانسفورماتور قدرت به‌عنوان قلب تپنده این شبکه بوده که همواره تحت تأثیر شرایط بهره‌برداری و محیطی، دچار خطاهای مختلفی شده و در برخی موارد سبب خرابی و خروج از مدار ترانسفورماتور و عدم دسترسی طولانی‌مدت خواهد شد. در نتیجه برنامه‌های تعمیر و نگهداری باید به‌جای مبتنی بر زمان، مبتنی بر شرایط بهره‌برداری و محیطی گردند که این مسئله خود مستلزم آن می‌باشد که از شرایط حال تجهیز نیز آگاه باشیم. لذا استفاده از روش‌های نظارت و تشخیص خطا که توانایی ارزیابی شرایط داخلی تجهیزات را دارند، بسیار بااهمیت خواهد بود. روش‌ها و تست‌های مختلفی به‌منظور ارزیابی شرایط ترانسفورماتور وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌هایی مانند تحلیل پاسخ فرکانسی^۳، آنالیز گازهای محلول^۴، پردازش سیگنال^۵، شار نشستی^۶ و جریان توالی منفی^۷... نام برد. از بین آن‌ها، روش تحلیل پاسخ فرکانسی روشی بسیار محبوب، فراگیر بوده که قابلیت بالایی در تشخیص خطاها داشته و پیاده‌سازی آن ساده و راحت می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ترانسفورماتور، کابل‌های قدرت، ژنراتور

1- مقدمه

جریان خطا در ترانسفورماتور قدرت به سیم‌پیچ‌ها و ساختار مکانیکی متناظر با آن، استرس مکانیکی بسیار شدیدی را وارد می‌کند. این استرس منجر به تغییرات در سیم‌پیچ‌ها شده و خرابی بالقوه ترانسفورماتور را همراه خواهد داشت. این تغییرات بر مقادیر خازنی و اندوکتیو سیم‌پیچ‌ها تأثیر گذاشته و در نتیجه باعث تغییر در پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور شده و از این‌رو به‌راحتی قابل تشخیص خواهند بود.

تحلیل پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور که از سال 1978 ارائه شده است، یک ابزار رایج تشخیص تغییرات سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌باشد. تحلیل پاسخ فرکانسی با تزریق یک سیگنال بین ترمینال‌های ترانسفورماتور و محاسبه دامنه و فاز پاسخ دریافتی در مقابل

¹ نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ناپیوسته، رشته مهندسی تکنولوژی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای پسران یاسوج،

² دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان یاسوج، ایران، Skeshavarz.tvu@ac.i

³ -Frequency Rwsponse Analyse

⁴ -Dissolve Gas Analyse

⁵ -Signal Processing

⁶ - Leakage Flux

⁷ -Negative Current Sequence

فرکانس، پیاده‌سازی خواهد شد [1]. به‌طور کلی این روش، یک تکنیک صنعتی برای افراد ماهر در زمینه خطایابی می‌باشد که پاسخ فرکانسی را با داده‌های تاریخی ثبت شده یا با اطلاعات ترانسفورماتور مشابه (اصطلاحاً ترانسفورماتور خواهر) از نظر ظاهری مورد مقایسه قرار دهند.

تغییر شکل‌های جزئی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور هیچ اثر قابل توجهی بر مشخصات بهره‌برداری ایجاد نمی‌کنند، اما خواص مکانیکی مس ممکن است تغییر کند و هم‌چنین مقاومت ضربه^۱ به‌طور قابل توجهی به خاطر آسیب عایقی و کاهش فواصل، کاهش یابد. هرچند این تغییر شکل‌ها بعد از یک دوره زمانی طولانی مدت از طریق تحلیل روغن یا رله بوخهلتز^۲ قابل شناسایی خواهند بود. این بدان معناست که روش‌های تشخیصی پیشرفته‌تری برای ترانسفورماتور با استفاده از پردازش سیگنال به‌منظور تشخیص خطای داخلی نیاز است. روش‌های پردازش سیگنال برای بیرون کشیدن اطلاعات مفید از سیگنال موردنظر مورد استفاده قرار می‌گیرد. تونرال^۳ یا ترکیبی از آن‌ها باشد. به دلیل اینکه روش‌های موجود برای ارزیابی شرایط داخلی ترانسفورماتور نمی‌تواند همه انواع خطاهای مختلف را نشان دهد، به روش‌های هوشمندی نیاز است تا قادر به تشخیص خطا و نوع آن باشند. در مراجع مختلف روش‌های متفاوتی برای نیل به این مطلب ارائه کرده‌اند.

2-مروری بر مقالات

این قسمت به مروری بر مقالاتی که در این زمینه تحقیق کرده و منتشر شده پرداخته است. در بعضی از این مقالات به مدل‌سازی ترانسفورماتور به‌منظور تعیین پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور متمرکز شده و در بعضی دیگر مسئله تشخیص و طبقه‌بندی خطای ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [2]، مدل شبکه‌ای متوالی الکتریکی^۴ برای سیم‌پیچ فشارقوی انتخاب شده و پاسخ فرکانسی آن محاسبه شده است. پاسخ فرکانسی به سه رنج پایین، میانی و بالا تقسیم شده و ظرفیت خازنی سری در رنج فرکانسی پایین و اندوکتانس در رنج فرکانسی بالا در نظر گرفته نشده است و حساسیت پاسخ فرکانسی به تغییرات پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [3] یک مدل دقیق از ترانسفورماتور تک‌فاز به‌منظور تشخیص خطای جابه‌جایی محوری^۵ و تغییر شکل ارائه شده است. در مدل مزبور مقاومت‌های موازی (تلفات دی‌الکتریک) و سری (تلفات مسی) به‌صورت وابسته به فرکانس در نظر گرفته شده است. البته اثر هسته و اندوکتانس مربوط به آن در فرکانس‌های بالاتر از 10 کیلوهرتز نادیده گرفته شده است. پارامترهای مداری از دو روش تحلیلی و المان محدود^۶ محاسبه شده و حساسیت تست‌های مختلف بر پاسخ فرکانسی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در مراجع [4,5] روش آزمایشگاهی برای تشخیص خطای اتصال کوتاه در ترانسفورماتور با استفاده از پاسخ فرکانسی ارائه شده است. اثر تجهیزات اندازه‌گیری (گوپلینگ‌های سلفی و خازنی) بر روی پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور مورد تحقیق قرار گرفته است.

¹ - Impulse Resistance

² - Bocholtz Relay

³ Neutral Current

⁴ - Ladder Network Model

⁵ - Axial Displacement

⁶ - Finit Element Methode

در مرجع [6] یک مدل دقیق از ترانسفورماتور سه فاز ارائه شده که شامل تلفات وابسته به فرکانس که ناشی از جریان‌های جریان فوکو¹ در هسته و سیم‌پیچ است، ارائه شده است. به منظور تعیین پارامترها از تحلیل المان محدود دوبعدی استفاده شده است. یکی از مشاهدات مهم در این مرجع، قابل توجه بودن اثر هسته و اندوکتانس تا فرکانس یک مگاهرتز می‌باشد.

در مرجع [7] حساسیت پاسخ فرکانسی به اتصالات مختلف اندازه‌گیری و توانایی آن‌ها در تشخیص خطاهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. دو تست نوع اول و سوم نسبت به تشخیص خطاها دارای حساسیت بیشتری خواهند بود.

در مراجع [8-9] یک مدل جامع و کامل از ترانسفورماتور سه فاز ارائه شده است که تمام اثرات وابسته به فرکانس هسته، سیم‌پیچ‌ها و سیستم عایقی لحاظ شده است. این مدل تا فرکانس یک مگاهرتز معتبر می‌باشد.

در مراجع [10-14] از شبکه عصبی² برای تشخیص خطا در درون ترانسفورماتور استفاده شده است. اطلاعات مورد استفاده در شبکه عصبی از تحلیل گازهای محلول استفاده شده است. گازهای مهم و کلیدی منتشر شده از روغن به‌عنوان ورودی شبکه عصبی انتخاب شده است. هم‌چنین در مراجع [15, 16] از ترکیب الگوریتم بردار پشتیبان ماشین³ و تحلیل گازهای محلول برای خطایابی خطا استفاده شده است.

در مرجع [17] با استفاده از ترانسفورماتور سه‌فاز و با تست‌های آزمایشگاهی پاسخ فرکانسی برای اتصال کوتاه بین دورها و بین فازها و سیم‌پیچ‌ها اندازه‌گیری شده است و با استفاده از معیارهای آماری مانند ضریب همبستگی⁴، مجموع مربعات خطا⁵ و مجموع قدر مطلق لگاریتمی خطا⁶ به منظور استفاده در روش تحلیل تجزیه فرکانسی بهره برده شده است.

در مرجع [18] به منظور تشخیص خطای تغییر شکل سیم‌پیچ‌ها از شبکه عصبی و پاسخ فرکانسی بهره برده است. پاسخ فرکانسی در شرایط آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و از دو معیار انحراف معیار⁷ و ضریب همبستگی به‌عنوان ورودی شبکه عصبی اتخاذ شده است.

در مرجع [19] از روش ER⁸ که مبتنی بر اطلاعات پاسخ فرکانسی است، به منظور ارزیابی شرایط سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت بهره برده است. خطای اتصال کوتاه، تغییر شکل و جابه‌جایی محوری شبیه‌سازی شده و با این اطلاعات الگوریتم مورد نظر تشکیل می‌گردد.

در مرجع [20] مدل الکتریکی برای ترانسفورماتور تک فاز به کار گرفته شده و با استفاده از توابع تبدیل مختلف نمودارهای پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی اندازه‌گیری شده است. خطای تغییر شکل و جابه‌جایی محوری مورد مطالعه قرار گرفته و حساسیت توابع تبدیل مختلف در تشخیص به این دو نوع خطا ارزیابی شده است.

در مرجع [21] روشی هوشمند که مبتنی بر منطق فازی⁹ است برای تشخیص خطای ترانسفورماتور به کار گرفته شده است. از نتایج تحلیل گازهای محلول برای استفاده در الگوریتم پیشنهادی بهره جسته است.

¹ - Eddy Current

² - Neural network

³ - Support Vector Machine

⁴ - correlation coefficient

⁵ - Sum Square Error

⁶ - Absolute Sum Logarithmic Error

⁷ - Standard Deviation

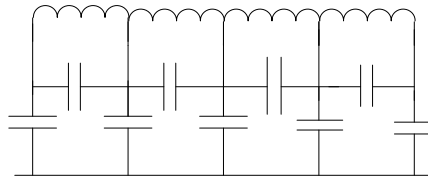
⁸ - Evidential Reasoning

⁹ - Fuzzy Logic

3-مدل سازی ترانسفورماتور

3-1-تاریخچه مدل سازی ترانسفورماتور

مبحث مدل سازی ترانسفورماتور قدرت از ابتدای قرن بیستم شروع شد. در [20] نشان داد شده است که به منظور توزیع ولتاژ ضربه¹ در سراسر سیم پیچ‌ها، نیاز به مدل سازی ترانسفورماتور می‌باشد. در مرجع [21] اثر اندوکتانس خودی و متقابل و نشتی و ظرفیت‌های خازنی بین کویل‌ها و بین سیم پیچ با زمین در نظر گرفته شده است. این مدل را می‌توان در شکل 1 مشاهده نمود.



شکل 1: اولین مدل ترانسفورماتور [21]

روش دیگر مدل سازی که در [22] ارائه شده است، توسعه یک مقیاس از مدل هندسی هسته و سیم پیچ ترانسفورماتور بود. مدل بر مبنای تعریف ترانسفورماتور قدرت به صورت اندوکتانس‌های خودی و متقابل ساخته می‌گردد. اگرچه این مدل نتوانست المان‌های خازنی ترانسفورماتور را نشان دهد و نیازمند ورود ظرفیت‌های خازنی در میان ساختار سیم پیچ‌ها می‌باشد. تا سال 1970 مدل سازی ترانسفورماتور به نقطه‌ای مناسب از نظر کفایت رسید. اگرچه مدل‌ها خطی بودند و بدون تلفات در نظر گرفته می‌شدند.

در سال‌هایی بین 1970 تا 1980 مقالات [25,26] توسط Wilcox ارائه شد که کاملاً متفاوت از کارهای گذشته بود که در آن اثرات وابسته به فرکانس در ترانسفورماتور و تلفات هسته در نظر گرفته شد. مدل سازی ترانسفورماتور هنوز هم به عنوان یک زمینه تحقیقاتی فعال در این دهه باقی مانده است که مقالات زیادی در این زمینه منتشر شده است.

3-2- کاربرد مدل‌های ترانسفورماتور

داشتن یک مدل دقیق از ترانسفورماتور ابزار بسیار مفید برای مطالعه ترانسفورماتور می‌باشد. در این بخش چند کاربرد از مدل ترانسفورماتور در زمینه‌های مختلف به بحث گذاشته شده است.

3-2-1- تحلیل گذرای سیم پیچ

برای کارخانجات مختلف سازنده ترانسفورماتور، تعیین دقیق میزان استرس ولتاژی که توسط بخش‌های مختلف سیم پیچ‌های ترانسفورماتور قابل تحمل خواهد بود، بسیار بااهمیت است. تحلیل گذرای² سیم پیچ معمولاً مبتنی بر تزریق یک سیگنال ولتاژ ضربه استاندارد به مدل الکترومغناطیسی ترانسفورماتور و اندازه گیری آن، می‌باشد.

¹ - Impulse Voltage Distribution

² - Transient Analyse

2-3-2- تحلیل گذرای سیستم

یکی دیگر از کاربردهای مدل، استفاده در سیستم بزرگ قدرت به منظور تحلیل گذرای شبکه‌ها و خطاها می‌باشد. در این کاربرد به‌طور معمول از برنامه گذرای الکترومغناطیسی¹ به منظور مطالعه دقیق روابط پیچیده بین اجزای مختلف شبکه قدرت استفاده می‌شود. این زمینه کاری به خاطر استفاده بسیار زیاد از ترانسفورماتورها در شبکه و خرابی آن‌ها، بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

2-3-3- مکان‌یابی تخلیه جزئی

تخلیه جزئی در حقیقت شکست یک سد عایقی در سیستم بوده که باعث تغییر در شارش بار الکتریکی و جریان الکتریکی می‌شود. تضعیف عایقی یک ناحیه بر اثر تخلیه جزئی می‌تواند منجر به خرابی کامل سیستم عایقی گردد و حتی در بعضی موارد به حوادث فاجعه‌آمیزی تبدیل خواهد شد. در نتیجه نظارت بر تخلیه جزئی یک امری بسیار مبرهن و واضح می‌باشد. نظارت دامنه پالس تخلیه جزئی از 1960 یک روش رایج در زمینه تشخیص خطای تخلیه جزئی می‌باشد [27]. البته روش‌های مختلفی به منظور مکان‌یابی تخلیه جزئی در این سال‌ها ارائه شده است که استفاده از مدل الکتریکی، امواج رادیویی و صوتی جزو جدیدترین این روش‌ها می‌باشند.

2-3-4- تحلیل پاسخ فرکانسی

تحلیل پاسخ فرکانسی یک ابزار عیب‌یابی می‌باشد که می‌تواند به منظور تشخیص خطا در درون ترانسفورماتورها استفاده گردد. این روش بر اساس مقایسه بین اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور در زمان حال با گذشته با همان پیکربندی تست می‌باشد. یکی از کاربردهای مهم مدل‌سازی تحلیل پاسخ فرکانسی، استفاده از مدل ترانسفورماتور به عنوان یک ابزار برای تشخیص و تفسیر تغییرات فیزیکی بر مبنای پاسخ فرکانسی می‌باشد. منطق حاکم بر این روش بر این پایه استوار است که هر تغییر در ساختار و هندسه ترانسفورماتور بر پارامترهای فیزیکی تعریف شده در مدل ترانسفورماتور تأثیرگذار خواهد بود.

3-3-3- انواع مدل‌های ترانسفورماتور

مدل ترانسفورماتور را می‌توان معمولاً به دو کلاس طبقه‌بندی کرد. اولین کلاس، روش مدل‌سازی جعبه سیاه می‌باشد. هدف از این مدل، ایجاد یک پاسخ زمانی یا فرکانسی در ترمینال‌های ترانسفورماتور می‌باشد. این مدل با استفاده از روش‌های ریاضیاتی به منظور تعیین تخمینی از پارامترهای تابع تبدیل ترانسفورماتور² ایجاد می‌گردد. در این روش هیچ اثری از خواص و عناصر فیزیکی ترانسفورماتور مشاهده نمی‌شود.

دسته دوم مدل ترانسفورماتور، مدل فیزیکی می‌باشد. در این مدل روابط پیچیده الکترومغناطیسی متناظر با ساختمان و خواص مواد به کاررفته در ترانسفورماتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل برای فهم بهتر و عمیق‌تر از شرایط درون ترانسفورماتور مناسب می‌باشد و ابزاری مفید برای خطایابی³ می‌باشد. مدل فیزیکی با توجه به نوع کاربرد و تاثیر عناصر مختلف، خود به چند دسته تقسیم می‌شوند که

¹ - Electromagnetic Transient Program

² - Transformer Transfer Function

³ - Diagnostic

از آن جمله می توان به مدل خط انتقال¹، اندوکتانس نشتی²، مبتنی بر اصل دوگان³، میدان الکترومغناطیسی⁴ و متمرکز الکتریکی⁵ اشاره کرد.

3-3-1- مدل خط انتقال

در مدل خط انتقال سیم پیچ ها مانند هادی های خط انتقال رفتار می کنند. روش مدل سازی پارامترهای متمرکز در فرکانس های بالا به خاطر وجود اثرات امواج سیار نمی تواند گزینه مناسبی برای مدل سازی ترانسفورماتور باشد و سیم پیچ ها بیشتر شبیه خطوط انتقال عمل می کنند [29]. این روش تنها بر سیم پیچ های همگن و همسان اعمال می گردد و برای سیم پیچ های پیچیده غیر عملی خواهد بود.

3-3-2- مدل اندوکتانس نشتی

بین سیم پیچ های ترانسفورماتور گولپینگ بسیار قوی وجود دارد. در فرکانس های پایین که پرمابیلیته هسته تأثیر قابل توجهی بر مشخصات هسته دارد، اندوکتانس های خودی و متقابل بسیار به هم نزدیک هستند و در نتیجه ماتریس اندوکتانس که دارای عناصر اندوکتانس های خودی و متقابل می باشد، تبدیل به ماتریس بدحالت⁶ می گردد که برای معکوس سازی دچار مشکل خواهد شد. در حقیقت اندوکتانس نشتی اختلاف بین اندوکتانس خودی و متقابل بین بخش های سیم پیچ را بیان می کند و البته برای توصیف دقیق و صحیح شرایط و روابط داخلی ترانسفورماتور بسیار ضعیف می باشد.

3-3-3- مدل مبتنی بر اصل دوگان

با توجه به غالب بودن پرمابیلیته هسته در فرکانس های پایین، مدار مغناطیسی ترانسفورماتور بر پاسخ فرکانس پایین اثرات قابل توجهی خواهد داشت و در نتیجه، برای مطالعه پاسخ فرکانس پایین، داشتن یک مدل دقیق از مدار مغناطیسی بسیار با اهمیت خواهد بود. برای رسیدن به این منظور، روش مدل سازی با اعمال اصل دوگان امکان پذیر خواهد بود. با ایجاد مدلی که مستقیماً از مدار مغناطیسی به دست می آید، مدل سازی دقیق هسته آهنی را تسهیل خواهد نمود.

3-3-4- مدل میدان الکترومغناطیسی

این مدل مبتنی بر استفاده از تحلیل المان محدود می باشد که یک مدل جامع، سه بعدی و الکترومغناطیسی از ترانسفورماتور ارائه می دهد. این مدل از نظر محاسباتی بسیار پرهزینه و زمان بر می باشد و برای کاربرد در زمینه خطایابی غیر عملی خواهد بود.

¹ - Transmission Line Model

² - leakage inductance Model

³ - Duality Model

⁴ - Electromagnetic Field Model

⁵ - Lumped Model

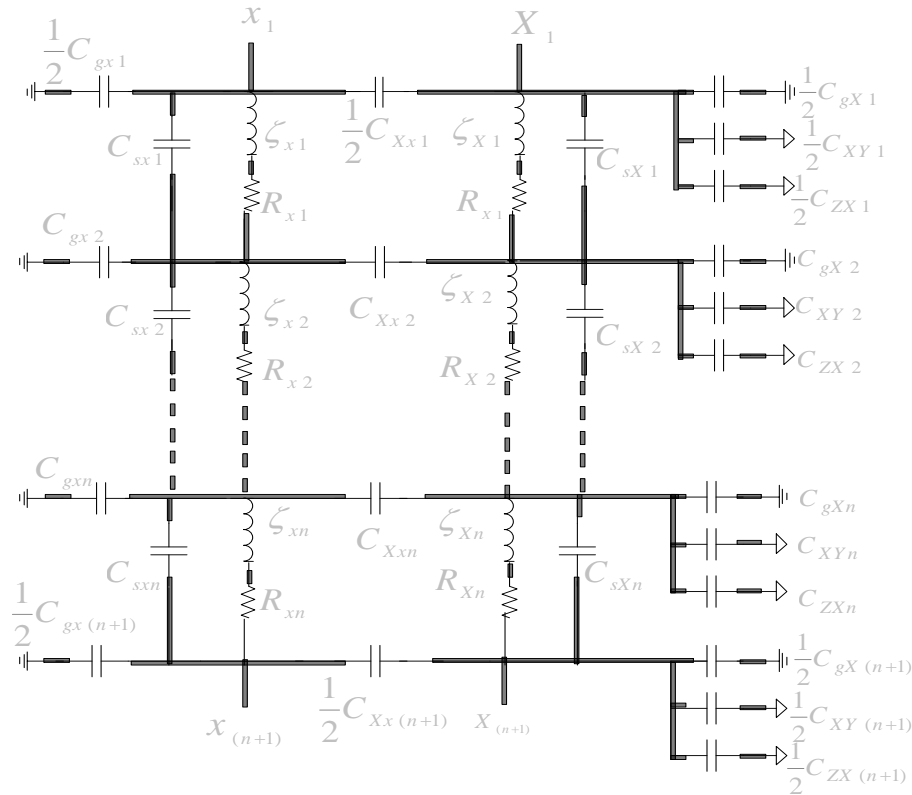
⁶ - ill-Condition

3-3-5- مدل مقاومت اندوکتانس و ظرفیت خازنی هندسی (RLC) (متمرکز)

این مدل از ترکیب اندوکتانس‌های خودی و متقابل، مقاومت و خازن به منظور تعریف رفتار الکتریکی ساختار ترانسفورماتور ایجاد می‌گردد. در این مدل به راحتی می‌توان اثرات غیرخطی و وابسته به فرکانس متناظر با هسته و سیم‌پیچ‌ها را در نظر گرفت. در این روش هر سیم‌پیچ به چند بخش تقسیم می‌گردد که تعداد این بخش‌ها به میزان دقت مدل‌سازی بستگی دارد. در این مدل‌سازی می‌توان یک یا چند دور و یا یک یا چند دیسک را به عنوان یک واحد متمرکز در نظر گرفت [1]. البته با افزایش تعداد بخش‌ها بر حجم محاسبات افزوده خواهد شد و به همین دلیل باید یک توازن بین دقت و پیچیدگی ایجاد گردد. این مدل برای محاسبات ولتاژ و جریان شاخه بسیار مفید می‌باشد. به دلیل تعریف فیزیکی ترانسفورماتور به صورت عناصر الکتریکی، هر تغییر در این عناصر که خود ناشی از خطاهای موجود در درون ترانسفورماتور می‌باشد، تغییری در پاسخ ایجاد شده و در نتیجه این عدم انطباق وجود یک خطا را نشان می‌دهد. از میان مدل‌های فیزیکی مطرح شده، این مدل به عنوان مدل نهایی انتخاب شده است چراکه شرایط داخلی ترانسفورماتور را به خوبی نشان داده و تمامی اثرات مربوط به سیم‌پیچ‌ها و هسته را در آن وارد نموده و هم‌چنین کار با آن راحت بوده و درک خوبی در زمینه خطایابی ترانسفورماتور به کاربر می‌دهد.

3-3-6- مدل متمرکز الکتریکی

هر واحد متمرکز شده از سیم‌پیچ‌ها، مشخصات الکتریکی و مغناطیسی مربوط به خود را دارند که می‌توان هر واحد را با اندوکتانس، ظرفیت خازنی و مقاومت نشان داد. البته این تقسیم‌بندی تنها تا موقعی اعتبار دارد که توزیع ولتاژ بر روی همه عناصر الکتریکی به صورت خطی باشد و یا شارش جریان برای همه واحدها در رنج فرکانسی مورد نظر یکسان باقی بماند و این تنها زمانی برقرار خواهد بود که زیر حد بالای فرکانسی قرار داشته باشیم. مدل متمرکز مورد استفاده در اینجا در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2: مدل متمرکز الکتریکی ترانسفورماتور برای فاز X (30)

4- یافته‌ها

1-4- عوامل خرابی ترانسفورماتور و روش‌های تشخیص آن‌ها

1-4-1- عوامل خرابی ترانسفورماتور

خرابی یک ترانسفورماتور می‌تواند یک تجربه‌ای پرهزینه و فاجعه‌آمیز باشد. به‌منظور ایجاد یک سناریوی دقیق از خرابی و ارائه توصیه‌های مناسب در ارتباط با آن لازم است یک آنالیز عمیق در مورد خرابی‌ها داشته باشیم تا از بازرخداد خطا جلوگیری شود. برای تکمیل این کار ابتدا لازم است که عوامل مختلف خرابی ترانسفورماتور شناسایی گردد. یک ترانسفورماتور می‌تواند به خاطر عوامل الکتریکی، مکانیکی، گرمایی و یا ترکیبی از آن‌ها دچار خرابی گردد [1]. عوامل خرابی ترانسفورماتورها را می‌توان از دو نگاه تقسیم کرد: از نگاه سیستمی و از نگاه مکان خطا.

2-4-2- عوامل خرابی از نگاه سیستمی

اگر ترانسفورماتور به صورت یک تجهیز که تشکیل شده از سه سیستم الکتریکی، مکانیکی و گرمایی در نظر گرفته شود، می توان استنباط کرد که ایجاد خطا در یک سیستم بر سیستم های دیگر تأثیر گذاشته و این مسئله می تواند در تعیین یک شاخص منحصر به فرد در تشخیص نوع خطا مشکل ساز باشد.

2-4-1- سیستم الکتریکی

خرابی در این سیستم معمولاً به صورت آسیب در سیستم عایقی¹ ترانسفورماتور در نظر گرفته می گردد. بعضی از عوامل الکتریکی رایج در ایجاد خطا در زیر آمده است [1]:

- عملکرد ترانسفورماتور تحت شرایط گذرا یا تحمیل اضافه ولتاژ²
- صاعقه³ و یا جرقه ناشی از کلیدزنی
- تخلیه جزئی⁴

2-4-2- سیستم مکانیکی

خرابی در این سیستم می تواند به ایجاد تغییراتی در سیم پیچ های ترانسفورماتور شده که در نهایت منجر به فرسودگی و گسیختگی عایق سلولزی خواهد شد. اگر آسیب به اندازه کافی شدید باشد، سیستم الکتریکی ترانسفورماتور نیز تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

2-4-3- سیستم حرارتی

تضعیف سیستم عایقی⁵ اتفاقی قابل انتظار می باشد. اثرات حرارتی باعث از بین رفتن قدرت فیزیکی عایق می گردند. این عامل عایق کاغذ را تا آنجا ضعیف می کند که سیستم عایقی نمی تواند در برابر نیروهای مکانیکی تحمیلی مقاومت کند. بعضی از عوامل دخیل در سیستم حرارتی به طور خلاصه در زیر آمده است [21]:

- اضافه بار⁶ ترانسفورماتور
- خرابی سیستم خنک کننده
- انسداد کانال های روغن

2-4-3- عوامل خرابی از نگاه مکان خطا

آسیب های ترانسفورماتور قدرت را می توان از نقطه نظر محل رخداد به دو ناحیه خطا در درون ترانسفورماتور و خطا در بیرون ترانسفورماتور تقسیم بندی کرد.

2-4-3-1- خطاهای خارجی

این نوع از خطا، در خارج از زون حفاظتی ترانسفورماتور رخ می دهند.

¹ - Insulation system

² - Over Voltage

³ - Lightning

⁴ - Partial Discharge

⁵ - Insulation Degeration

⁶ -Over Load

- اضافه ولتاژ که منجر به شکست عایقی می‌گردد.
- اضافه‌بار: منجر به افزایش گرما در عایق و آسیب دائمی به ترانسفورماتور می‌گردد.
- افتادن فرکانس: طبق رابطه (1) جریان تحریک¹ در فرکانس‌های کم افزایش می‌یابد که به دلیل اضافه شار² هسته آهنی ترانسفورماتور می‌باشد و باعث شکست عایقی ترانسفورماتور گردد.

$$\Phi_{\max} = \frac{V_p}{4.44Nf} \quad (1)$$

3-4-2- خطاهای داخلی

این نوع از خطا در زون حفاظتی ترانسفورماتور رخ می‌دهند و خود به دو گروه تقسیم می‌شود:

- (1) خطاهای اولیه مانند خطا فاز به زمین، خطای سه فاز، اضافه حرارت، اضافه شار و اضافه فشار که باید حرکتی سریع برای حفاظت آن انجام داد.
- (2) خطاهای اکتیو. که شامل موارد زیر می‌باشند:
 - اتصال کوتاه دور با دور (اتصال حلقه)³
 - خطاهای مربوط به تانک
 - تغییر شکل فیزیکی سیم‌پیچ‌ها
 - خطاهای هسته

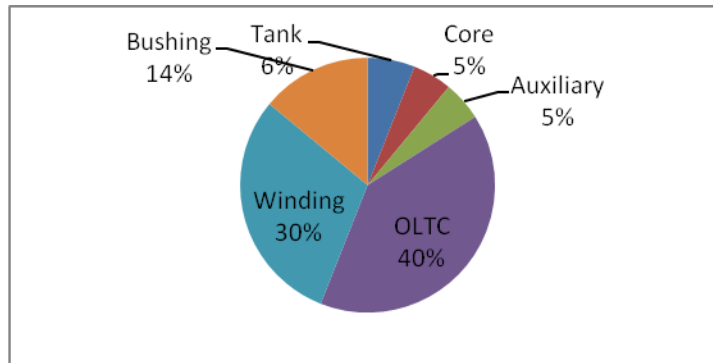
4-4-1- اجزای ترانسفورماتور و نقش آن‌ها در بروز خطا

خطاهای دسته دوم به مرور زمان باعث تضعیف قدرت عایقی بین سیم‌پیچ‌ها و خسارت دیدن ترانسفورماتورها می‌شوند. با نظارت ترانسفورماتورها و تشخیص به موقع این عیوب می‌توان از وارد آمدن خسارات بیشتر به ترانسفورماتور جلوگیری شود و این امکان را ایجاد کند که ترانسفورماتور طبق برنامه در زمان مناسب از مدار خارج و تعمیر گردد. اگر نظارت مورد نظر بر روی ترانسفورماتورها انجام نگیرد، خطاهای کوچک تبدیل به خطاها با دامنه بزرگ‌تر می‌شوند و باعث از دست رفتن شبکه می‌شود. شکل سهم هر قسمت از ترانسفورماتور در ایجاد خطا و عیب در درون ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.

¹ - Excitation Current

² - Over Flux

³ - Short Turn



شکل 3: میزان تأثیر اجزای ترانسفورماتور در رخداد خطا [2]

4-4-1- خطاهای مربوط به تانک

کاهش میزان روغن از طریق نشت در تانک، شرایط بسیار خطرناکی را در ترانسفورماتور ایجاد می‌کند که خود به دلیل افزایش حرارت می‌تواند باشد. بر اثر قوس‌هایی که در درون ترانسفورماتورها رخ می‌دهد روغن موجود در ترانسفورماتور به گازهای آتش‌زا و انفجاری مانند استیلن¹ و هیدروژن² تجزیه شده که به دلیل عدم تراکم‌پذیری روغن ترانسفورماتور، فشار در تانک ترانسفورماتور افزایش یافته و تانک به آرامی با افزایش حجم گازها، منبسط خواهد شد تا آنجا که فشار در درون تانک از حد قابل تحمل بیشتر شده و ابتدا تانک تغییر شکل داده و سپس منفجر می‌گردد.

4-4-2- خطاهای مربوط به هسته

هرگاه عایق هسته دچار نقص گردد جریان فوکو در ورقه‌های هسته به راه می‌افتد و در نتیجه افزایش حرارت را به دنبال خواهد داشت. این جریان‌ها باعث افزایش تلفات هسته و در نهایت منجر به افزایش گرما خواهد شد اما تغییر قابل توجهی در جریان ورودی ایجاد نمی‌کند و در نتیجه با حفاظت عادی نمی‌توان آن را تشخیص داد. البته با افزایش حرارت در هسته و بالطبع در تانک، روغن به گازهایی تجزیه شده و این گازها وارد کنسرواتور³ شده و زمینه را برای عملکرد رله مکانیکی ایجاد می‌کند.

4-4-3- خرابی تپ‌چنجر زیر بار

تپ‌چنجر⁴ شامل ترمینال‌های تپ، اجزای دورن تانک و نواحی اطراف آن می‌باشد. وظیفه تپ‌چنجر تغییر تپ ارتباطی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور است در حالی که ترانسفورماتور در مدار می‌باشد. تپ‌چنجر می‌تواند در درون تانک اصلی ترانسفورماتور یا خارج از آن قرار بگیرد. تپ‌چنجر تنها بخش قابل حرکت در ترانسفورماتور می‌باشد و ممکن است بر اثر عملکردهای زیاد دچار آسیب شود [1] که با توجه به شکل 3 منشأ حدود 34 درصد از خرابی ترانسفورماتور مربوط به تپ‌چنجر می‌باشد.

4-4-4- خرابی بوشینگ

بوشینگ⁵ یک ساختار جداکننده است. عایق کاغذ-روغن به‌طور گسترده در بوشینگ‌های ترانسفورماتور قدرت استفاده می‌گردند و جزو بهترین عایق‌ها می‌باشند که دارای خواص الکتریکی و تبادل خوب حرارت هستند. اگرچه استرس‌های الکتریکی، گرمایی،

¹ -Ethylene

² -Hydrogen

³ - conservator

⁴ -Tap Changer

⁵ - Bushing

مکانیکی و محیطی می‌توانند این خواص را بدتر کنند و باعث شکست عایقی گردند. اکثر خرابی‌های بوشینگ به خاطر ورود رطوبت به بوشینگ اتفاق می‌افتد که می‌توان توسط بازرسی‌های دوره‌ای از وقوع آن پیشگیری کرد.

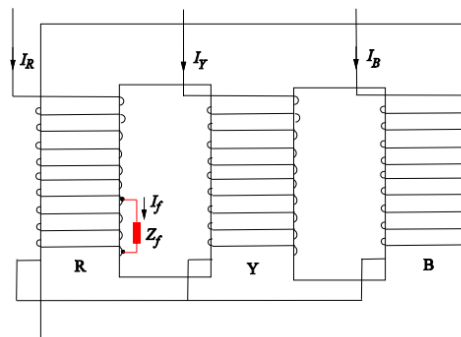
4-4-5- خرابی‌های سیم‌پیچ

خطاهای اتصال کوتاه باعث کاهش فشار بست‌های نگهدارنده سیم‌پیچ شده که توانایی ترانسفورماتور را در برابر تحمل نیروها کاهش می‌دهد. خطاهای سیم‌پیچ را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. خطاهای الکتریکی مانند خطای اتصال حلقه و اتصال فاز به فاز و اتصال فاز به زمین و خطاهای مکانیکی مانند تغییر شکل، واژگونی¹ و مارپیچی شدن².

4-5- خطای سیم‌پیچ از نوع الکتریکی

4-5-1- اتصال کوتاه دور به دور (اتصال حلقه)

یکی از مسائل چالش‌برانگیز در حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت تشخیص اتصال حلقه در سیم‌پیچ‌ها می‌باشد. اتصال حلقه در حقیقت اتصال کوتاه شدن چند دور در سیم‌پیچ‌های یک‌فاز می‌باشد [22]. شکل شماتیک کلی سیم‌پیچ‌ها با اتصال حلقه در یک ترانسفورماتور سه ستونه را نشان می‌دهد. اتصال کوتاه در فاز R و با امپدانس Z_f ایجاد شده است. اگر شدت اتصالی شدید نباشد، افزایش قابل توجهی در جریان‌های سیم‌پیچ ایجاد نمی‌گردد. پس این مسئله در تشخیص خطای اتصال حلقه چالش بزرگی ایجاد می‌کند و در اندازه‌های کم این مسئله شدیدتر خواهد بود [23].



شکل 4: شماتیک ترانسفورماتور سه ستونه با اتصال حلقه [23]

¹ - Titling

² - Spiral

• اتصال کوتاه فاز به فاز

اتصال کوتاه فاز به فاز در دوران ترانسفورماتور به مانند اتصال کوتاه خارجی دو فاز می باشد و جریان شدیدی در ترمینالها ایجاد می کند و بارله های اضافه جریان¹ و رله دیفرانسیل² قابل تشخیص است.

4-6- خطای سیم پیچ از نوع مکانیکی

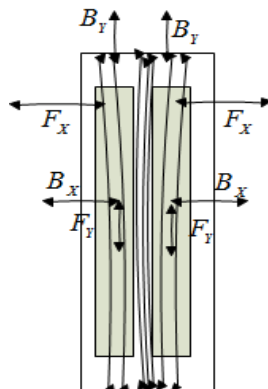
تغییرات مکانیکی ایجاد شده در سیم پیچ های ترانسفورماتور مانند واژگونی، جابه جایی محوری، مارپیچی، تلسکوپی³، پدیده هایی هستند که بعد از رخداد یکی از خطاهای فوق الذکر در ترانسفورماتور ایجاد می گردند. پس وجود تغییرات مکانیکی در ترانسفورماتور می تواند نشان دهنده خطایی در آن باشد و با تشخیص این خطاهای مکانیکی به وجود خطاهای دیگر پی برد.

4-6-1- نیروهای اتصال کوتاه

معادله اساسی برای محاسبات نیروهای الکترومغناطیسی از معادله (Error! No text of specified style in document.) پیروی می کند:

$$F = LI \times B \quad (\text{Error! No text of specified style in document.})$$

در این معادله، B بردار چگالی شار نشتی⁴ در سیم پیچ ها، I بردار جریان و L طول سیم پیچ می باشد. اگر تحلیل نیروها به طور دوطرفه و به صورت شکل در نظر گرفته و چگالی جریان در جهت محور Z باشد، آنگاه چگالی شار نشتی در هر نقطه دارای دو مؤلفه خواهد بود، یک مؤلفه در جهت شعاعی B_x و مؤلفه دیگر در جهت محوری B_y خواهد بود. در حقیقت نیروهای شعاعی⁵ در جهت x ناشی از چگالی شار نشتی محوری و نیروهای محوری⁶ در جهت y هم ناشی از چگالی شار نشتی شعاعی می باشد [19].



شکل 5: توزیع شار نشتی و نیروهای شعاعی و محوری ایجاد شده توسط آن

نیروهای شعاعی باعث می شود که سیم پیچ بیرونی به سمت خارج کشیده شود و در حالی که سیم پیچ های داخلی که نیروهای شعاعی را تحمل می کنند، به سمت داخل منقبض می شوند و در صورت شدید بودن این نیروها، سیم پیچ درونی متلاشی خواهد شد. حال اگر

¹ - Over Current Relay

² - Differential Relay

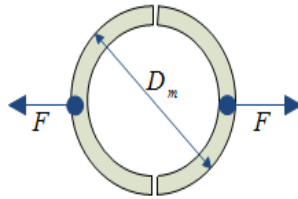
³ -Telescoping

⁴ - Leakage Flux Density Vector

⁵ - Radial Forces

⁶ - Axial Forces

سیم پیچ بیرونی در نظر گرفته شوند، نیروهای وارده بر بخش قطر داخلی سیم پیچ بیرونی بیشترین نیرو را متحمل خواهد شد. این مطلب در شکل نشان داده شده است.



شکل 6: برش از بالا- نیروی وارده بر استوانه سیم پیچ

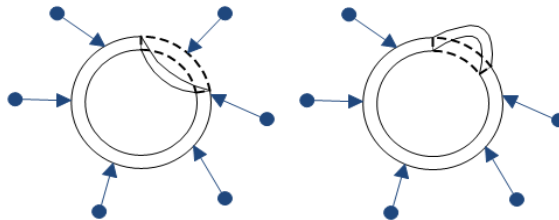
در شرایط ایده آل که سیم پیچ‌ها هم ارتفاع هستند، توزیع آمپر- دور در سراسر سیم پیچ یکنواخت خواهد بود. برای هر سیم پیچ بیرونی یا درونی، نیروهای شعاعی با اندازه‌های متفاوت و با جهت یکسان ایجاد می‌گردد که مجموع این دو نیرو در مرکز سیم پیچ‌ها بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشند. این نیروی محوری باعث حرکت و جابه‌جایی سیم پیچ‌ها در جهت عمودی خواهند شد که اصطلاحاً به جابه‌جایی محوری معروف است.

4-6-2- تغییر شکل

تغییرات شعاعی سیم پیچ‌ها شامل دو حالت می‌باشد:

- Force buckling
- Free buckling

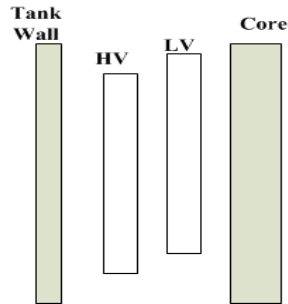
این دو تغییر را می‌توان در شکل مشاهده نمود.



شکل 7: تغییر شکل - سمت راست: Free - سمت چپ: Force

4-6-3- جابه‌جایی محوری

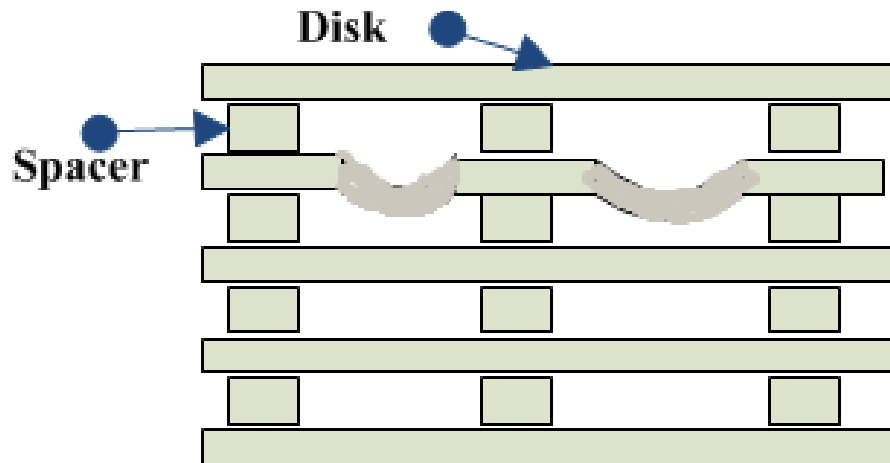
این نوع خطا هم که جزو خطاهای تغییر شکل دسته‌بندی می‌گردد منجر به جابه‌جایی شعاعی دیسک‌ها می‌گردد. این جابه‌جایی می‌تواند در دو جهت چپ و راست می‌تواند رخ دهد که در شکل نشان داده شده است.



شکل 8: جابه‌جایی محوری سیم‌پیچ‌ها نسبت به هم

4-6-4- تغییر فضای بین دیسک

این خطا جزو رایج‌ترین خطاهای داخلی ترانسفورماتور محسوب می‌گردد و حتی حدود هشتاد درصد از خطاهای داخلی مربوط به این خطا می‌باشد [28]. بر اثر خطاهای اتصال کوتاه و ایجاد نیروی الکترومغناطیسی بر دیسک‌ها، بعضی از بست‌های نگهدارنده دیسک‌ها استحکام کافی را نداشته و جابه‌جایی محوری محلی ایجاد می‌شود و به این معناست که فاصله بین دو دیسک متوالی تغییر کند. شکل تغییر فضای دیسک برای سیم‌پیچ دیسکی را نشان می‌دهد.



شکل 9: تغییر فضای بین دو دیسک متوالی

5- نتیجه‌گیری

شبکه گسترده سیستم قدرت دارای تجهیزات بسیار گران‌قیمتی می‌باشد که از جمله آن می‌توان به ژنراتور، بریکر، کابل‌های قدرت و ترانسفورماتور قدرت اشاره کرد. ترانسفورماتورهای قدرت همواره تحت استرس‌های مختلفی بوده و دچار خطاهای گوناگونی خواهند شد در نتیجه نیاز به روش‌های مختلف به منظور تشخیص خطا در درون ترانسفورماتور خواهد بود که تحلیل پاسخ فرکانسی یکی از بهترین روش‌های مؤثر در زمینه تشخیص خطاهای الکتریکی و مکانیکی در درون ترانسفورماتور می‌باشد.

6- منابع

1. P. Picher, J. Lapworth, T. Noonan, and J. Christian, "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis," Cigre Report, vol. 342, 2008.
2. S. Islam, "Detection of shorted turns and winding movements in large power transformers using frequency response analysis," in Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, 2000, pp. 2233-2238.
3. E. Rahimpour, J. Christian, K. Feser, and H. Mohseni, "Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 18, pp. 493-505, 2003.
4. V. Behjat, A. Vahedi, A. Setayeshmehr, H. Borsi, and E. Gockenbach, "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, pp. 2123-2133, 2011.
5. V. Behjat, A. Vahedi, A. Setayeshmehr, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Sweep frequency response analysis for diagnosis of low level short circuit faults on the windings of power transformers: An experimental study," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 42, pp. 78-90, 2012.
6. E. Bjerkan, "High frequency modeling of power transformers: stresses and diagnostics," Norwegian University of Science and Technology, 2005.
7. J. Jayasinghe, Z. Wang, P. Jarman, and A. Darwin, "Winding movement in power transformers: a comparison of FRA measurement connection methods," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 13, pp. 1342-1349, 2006.
8. K. N. B. Abeywickrama, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, "Exploring possibilities for characterization of power transformer insulation by frequency response analysis (FRA)," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 21, pp. 1375-1382, 2006.
9. K. Abeywickrama, A. D. Podoltsev, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, "Computation of parameters of power transformer windings for use in frequency response analysis," Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 43, pp. 1983-1990, 2007.
10. N. Abeywickrama, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, "High-frequency modeling of power transformers for use in frequency response analysis (FRA)," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 2042-2049, 2008.
11. N. Joshi, Y. Sood, R. Jarial, and R. Thapliyal, "Transformer Internal Winding Faults Diagnosis Methods: A Review."
12. K. Meng, Z. Y. Dong, D. H. Wang, and K. P. Wong, "A self-adaptive RBF neural network classifier for transformer fault analysis," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 25, pp. 1350-1360, 2010.

13. S. Xin and S. Qing, "Fault Diagnosis For Power Network Based on Adaptive Wavelet Kernel Relevance Vector Machine Algorithm," *Journal of Information and Computational Science*, vol. 8, p. 13, 2011.
14. S. ZHANG, F. KUANG, Y. WANG, and L. WANG, "A Novel SVM Model with PSO on Power Transformer Fault Diagnosis," *Journal of Computational Information Systems*, vol. 8, pp. 5973-5982, 2012.
15. J.-W. Kim, B. Park, S. C. Jeong, S. W. Kim, and P. Park, "Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 169-178, 2005.
16. D. Xu, C. Fu, and Y. Li, "Application of artificial neural network to the detection of the transformer winding deformation," 1999.
17. A. Shintemirov, W. Tang, and Q. Wu, "Transformer winding condition assessment using frequency response analysis and evidential reasoning," *Electric Power Applications, IET*, vol. 4, pp. 198-212, 2010.
18. M. Florkowski and J. Furgał, "Detection of transformer winding deformations based on the transfer function—measurements and simulations," *Measurement Science and Technology*, vol. 14, p. 1986, 2003.
19. S. V. Kulkarni and S. Khaparde, *Transformer engineering: design and practice vol. 25*: CRC Press, 2004.
20. M. Babiy, R. Gokaraju, and J. C. Garcia, "Turn-to-turn fault detection in transformers using negative sequence currents," in *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011 IEEE*, 2011, pp. 158-163.
21. R. Bhide, M. Srinivas, A. Banerjee, and R. Somakumar, "Analysis of winding inter-turn fault in transformer: A review and transformer models," in *Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 1-7.
22. N. Hashemnia, A. Abu-Siada, M. A. Masoum, and S. M. Islam, "Characterization of transformer FRA signature under various winding faults," in *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 446-449.
23. P. H. Thomas, "Static Strains in High Tension Circuits and the Protection of Apparatus," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. 19, pp. 213-264, 1902.
24. L. Blume and A. Boyajian, "Abnormal voltages within transformers," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. 38, pp. 577-620, 1919.
25. P. Abetti, "Transformer models for the determination of transient voltages," *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 72, pp. 468-480, 1953.
26. D. Wilcox, W. Hurley, and M. Conlon, "Calculation of self and mutual impedances between sections of transformer windings," in *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, 1989, pp. 308-314.
27. D. Wilcox, W. Hurley, T. McHale, and M. Conlon, "Application of modified modal theory in the modelling of practical transformers," in *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, 1992, pp. 513-520.
28. S. Hettiwatte, P. Crossley, Z. Wang, A. Darwin, and G. Edwards, "Simulation of a transformer winding for partial discharge propagation studies," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*, 2002, pp. 1394-1399.
29. C. Zhao, J. Ruan, Z. Du, S. Liu, Y. Yu, and Y. Zhang, "Calculation of parameters in transformer winding based on the model of multi-conductor transmission line," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 463-467.
30. S. D. Mitchell, "Power transformer modelling to support the interpretation of frequency response analysis| NOVA. The University of Newcastle's Digital Repository," 2011.

Diagnosis and classification of internal defects of power transformers

The extensive network of the power system has very expensive equipment, including generators, breakers, power cables and transformers. The power transformer is the beating heart of this network, which is always affected by operating and environmental conditions, it suffers various errors, and in some cases, it will cause the transformer to fail and go out of the circuit and not be accessible for a long time. As a result, the maintenance programs should be based on operating and environmental conditions instead of time based, which requires us to be aware of the current equipment conditions. Therefore, it will be very important to use monitoring and error detection methods that have the ability to evaluate the internal conditions of the equipment. There are various methods and tests to evaluate the condition of the transformer, including frequency response analysis, dissolved gas analysis, signal processing, leakage flux, and negative sequence current. Among them, the frequency response analysis method is a very popular and comprehensive method that has a high ability to detect errors and its implementation is simple and convenient.

Keywords: transformer, power cables, generator