بسم الله الرحمن الرحيم

همه امتیازات این پایان‌نامه به دانشگاه لرستان تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب در مجلات، کنفرانس‌ها یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه لرستان (یا استاد یا اساتید راهنمای پایان‌نامه) و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر اینصورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

دانشگاه لرستان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق- قدرت

حفاظت تطبیقی تفاضلی برای ترانسفورماتورهای قدرت

نگارش

محمد جواد خادمی

استاد راهنما

دکتر فرهاد نامداری

استاد مشاور

دکتر بهروز رضایی علم

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق- قدرت

بهمن ۱۳۹۲

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

قدردانی

شکر و سپاس خدای را که با الطاف ربانی‌اش توفیق داد تا این مجموعه را به پایان رسانده و از خداوند منان توفیق و سعادت همه پویندگان و رهروان علم و دانش را خواهانم.

پس از حمد و ثنای الهی و شکرگزاری به درگاه خداوند متعال به مصداق حدیث شریف:

((مَن لَم یَشکُرِ المَخلوق مَن لَم یَشکُرِ الخالِق))

اینک که حاصل همه تلاشها مثمر ثمر واقع شد بر خود فرض می‌دانم که با بضاعت اندکم در کمال ادب و احترام مراتب سپاس و قدردانی خالصانه و صمیمانه خود را از همه کسانی که من را در این وادی یاری نمودند ابراز داشته بویژه از:

جناب آقای دکتر فرهاد نامداری که با سرپرستی و راهنمایی‌های خود، مسیر انجام این تحقیق را هموار نمودند. بی‌تردید، بدون مساعدت‌های ارزشمند ایشان که با فراهم نمودن تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق، امکان توسعه مجموعه عملی و آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد ترانسفورماتور و همچنین اعتبارسنجی روش مدلسازی ارائه شده در این پایان‌نامه را میسر ساختند و همچنین رهنمودهای بی‌دریغشان در ادامه راه، انجام این تحقیق میسر نبود. همچنین از جناب آقای دکتر بهروز رضایی علم، استاد مشاور این پایان‌نامه به علت راهنمایی‌های ارزنده و حمایت‌های بی‌دریغشان در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه کمال تشکر را دارم.

در نهایت از تمامی اساتید گروه مهندسی برق قدرت دانشگاه لرستان بویژه جناب آقایان دکتر اسماعیل رک‌رک، دکتر محمود رضا شاکرمی و مهندس نادر شجاعی که برای پیشرفت و اعتلای این رشته زحمات فراوانی کشیدند و کلیه دوستانی که به نوعی مرا در انجام این رساله یاری نمودند، کمال تشکر و امتنان را دارم.

چکیده

ترانسفورماتورهای قدرت از مهمترین اجزاء سیستم قدرت به شمار می‌آیند. بنابراین مانیتورینگ و بررسی عملکرد آنها در شرایط مختلف کاری و خطاها علاوه بر اینکه در محاسبات مختلف سیستم قدرت دارای اهمیت است می‌تواند به منظور توسعه یک سیستم حفاظتی عملکرد صحیح آن را تضمین کند و مانع از خسارات جبران ناپذیر به ترانسفورماتور و شبکه متصل به آن شود. به عنوان اولین گام در توسعه روشهای تشخیص خطا و حفاظت ترانسفورماتور، این پایان‌نامه با توسعه مدل اجزاء محدود تزویج مداری گذرای زمانی و پیاده‌سازی یک مجموعه تست عملی مدلی دقیق را به منظور تحلیل عملکرد ترانسفورماتور در حالتهای مختلف کاری و خطا ارائه می‌دهد. این مدل که برگرفته از مشخصات دقیق ترانسفورماتور شامل ابعاد هسته و سیم‌پیچی‌ها و ساختار هندسی آن، همچنین مشخصات الکترومغناطیسی تمامی اجزاء تشکیل‌دهنده ترانسفورماتور بویژه مشخصه غیرخطی هسته آن و معادلات الکتریکی حاکم بر آنها است با مقایسه با نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های عملی مدلی دقیق از ترانسفورماتور را در کلیه حالتهای عملکردی آن ارائه می‌دهد.

بدلیل اینکه مهمترین عامل در جهت نقص عملکرد ترانسفورماتور خطاهای داخلی سیم‌پیچی می‌باشند مدل بدست‌آمده از ترانسفورماتور به روش اجزاء محدود علاوه بر تست عملی با یکی از مهمترین مدلهای شبیه‌سازی ترانسفورماتور در حالت خطای اتصال کوتاه داخلی سیم‌پیچی مقایسه شده است.

هدف اصلی این پایان‌نامه، دستیابی به یک الگوریتم حفاظتی پیشرفته است که بتواند در سریع‌ترین زمان ممکن نقص بوجودآمده در ترانسفورماتور را تشخیص داده و در جهت رفع آن اقدام کند. با استناد به الگوی رفتاری ترانسفورماتور حامل خطا این پایان‌نامه یک روش جدید برای پایش بر خط ترانسفورماتورهای قدرت جهت تشخیص تمامی حالتهای کاری ترانسفورماتور شامل حالت کاری نرمال عملکرد در حضور خطاهای خارجی، عملکرد در حضورخطاهای داخلی و بارگذاریهای مختلف که یکی از موارد آن ایجاد جریان هجومی در ترانسفورماتور است را ارائه می‌دهد.

پایش بر خط ضرایب موجک جریانهای ترمینالی و استخراج شناسه‌هایی از آنها که قابلیت توصیف کیفی و کمی عملکرد ترانسفورماتور را داشته باشند، اساس روش تشخیص خطای مبتنی بر پایش سیگنالهای جریانی ترانسفورماتور را تشکیل می‌دهند. مهمترین مزیت این روش، عدم تحمیل نیازمندیهای پیچیده نرم‌افزاری و سخت‌افزاری به سیستم تشخیص خطا و همچنین سرعت بسیار بالا در تشخیص‌دهی

می‌باشد که بهره‌برداری آسان از آن را تضمین می‌کند. الگوریتم حفاظت تفاضلی بهینه‌ای که بر اساس ضرایب انرژی موجک پیاده‌سازی شده و با تولید شاخص‌ها یا ضرایبی که برای هر گروه از حالتهای عملکردی ترانسفورماتور تعریف شده است می‌تواند بخوبی وضعیت ترانسفورماتور را تشخیص داده و سیگنال مناسب جهت عملکرد تجهیزات حفاظتی را در صورت لزوم فراهم آورد. این الگوریتم حفاظتی با داشتن یک ساختار منطقی و تطبیقی در شرایط مختلف عملکرد صحیح سیستم حفاظت را تضمین می-کند.به عبارتی با تعریف یک شاخص جدید الگوریتم حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی، ساختاری تطبیقی به خود می‌گیرد و می‌توان بدون اعمال تنظیمات اضافه‌ای برای دیگر ترانسفورماتورهای مختلف با توان‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

آزمایش‌های عملی مختلف در این رساله از طریق اندازه‌گیری‌ها بر روی یک ترانسفورماتور ۲kVA، ۳۸۰V/۳۸۰V، ۵۰Hz تک فاز صورت گرفته است.

واژه های کلیدی: حفاظت دیفرانسیل، روش اجزاء محدود، روش تحلیل عملی، تبدیل موجک، ساختار تطبیقی.

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه **۱**

۱-۱- خطاهای اتصال کوتاه سیم پیچی در ترانسفورماتورهای قدرت ۲

۱-۲- اهمیت بررسی خطاهای اتصال کوتاه سیم پیچی ۳

۱-۳- هدف تحقیق ٤

۱-٤- روش تحقیق ٥

۱-٥- مراحل انجام تحقیق و ساختار پایان نامه ٥

فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده در حوزه شناسایی خطاهای داخلی سیم‌پیچی ترانسفورماتورهای قدرت **۷**

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- مدل سازی خطاهای اتصال کوتاه سیم پیچی ۸

۲-۳- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه حفاظت تفاضلی ترانسفورماتور قدرت ۲۲

۲-٤- نتیجه گیری ۲٦

فصل ۳ مدل سازی خطاهای اتصال کوتاه سیم پیچی در ترانسفورماتور قدرت **۲۷**

۳-۱- مقدمه ۲۸

۳-۲- مدل سیم پیچی گسترده ترانسفورماتور قدرت در حضور خطاهای داخلی سیم پیچی ۲۹

۳-۳- توسعه مدل اجزاء محدود ترانسفورماتور قدرت حامل خطا ۳٥

۳-۳-۱- معادلات روش اجزاء محدود ۳٦

۳-۳-۲- مدل سازی خطای اتصال کوتاه با روش اجزاء محدود ٤۰

۳-٤-مدل اجزاء محدود سه بعدی ترانسفورماتور حامل خطای اتصال کوتاه ٤۳

۳-٥- پیاده سازی روش اجزاء محدود سه بعدی بر روی یک ترانسفورماتور نمونه ٤٦

۳-٦- توسعه خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به سیم‌پیچ دیگر ٤۹

۳-۷- نتیجه‌گیری ٥۱

فصل ٤ الگوریتم تطبیقی بهینه حفاظت تفاضلی ترانسفورماتورهای قدرت به منظور آشکارسازی اتصال کوتاه‌های سیم‌پیچی ترانسفورماتورهای قدرت ٥٢

٤-١- مقدمه ٥٣

٤-٢-روشهای تشخیص خطاهای اتصال کوتاه سیم پیچی در ترانسفورماتور قدرت ٥٤

٤-٢-١- روشهای مبتنی بر پایش وضعیت فیزیکی ترانسفورماتور ٥٤

٤-٢-٢- حفاظت تفاضلی ٥٦

٤-٣-روش تشخیص خطای مبتنی بر تبدیل موجک ٦٤

٤-٣-١-تبدیل موجک ٦٤

٤-٣-٢- ارزیابی عملکرد روش تشخیص خطای مبتنی بر تبدیل موجک ٦٩

٤-٤-الگوریتم تطبیقی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ٧٧

٤-٤-١-فرموله سازی الگوریتم تطبیقی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ٧٧

٤-٤-١-١- تعریف تابع هدف با استفاده از ضرایب موجک ٧٨

٤-٤-١-٢- الگوریتم بهینه سازی جستجوی تصادفیSOA ٨٣

٤-٤-١-٢-١- پیاده سازی الگوریتم بهینه سازی جستجوگر ٨٣

٤-٤-١-٢-٢- مسیر جستجو ٨٤

٤-٤-١-٢-٣-رفتار خود دوستی ٨٤

٤-٤-١-٢-٤- رفتار نوع دوستانه ٨٤

٤-٤-١-٢-٥- رفتار پیش فعالیتی ٨٤

٤-٤-١-٢-٦- مسیر نهایی جستجو ٨٥

٤-٤-١-٢-٧- طول گام ٨٦

٤-٤-٢- پیاده سازی الگوریتم حفاظت تفاضلی ٨٨

٤-٤-٣- پیاده سازی ساختار تطبیقی الگوریتم حفاظت تفاضلی ٩١

٤-٥- نتیجه‌گیری ٩٢

فصل ۵ شبیه سازی ها و نتایج حاصل از پیاده سازی عملی **۹۳**
۵-۱- مقدمه ۹٤
۵-۲- نتایج حاصل از شبیه سازی مدل اجزاء محدود ترانسفورماتور قدرت..... ۹٤
۵-۳- نتایج حاصل از شبیه سازی پیاده سازی الگوریتم حفاظت دیفرانسیل ۱۰۵
۵-٤- نتایج حاصل از پیاده‌سازی ساختار وفقی الگوریتم حفاظت تفاضلی پیشنهادی ۱۱۹
۵-۵- نتیجه گیری ۱۲۳
فصل ٦ جمع بندی و پیشنهادها **۱۲٤**
٦-۱- جمع بندی و نوآوری ۱۲۵
٦-۲- پیشنهادها ۱۲٦
مراجع **۱۲۸**

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) ترانسفورماتور معیوب بدلیل ایجاد اتصال کوتاه در سیم‌پیچی‌های آن ٤

شکل (۲-۱) اعمال اتصال کوتاه در سرهای ثانویه ی ترانسفورماتور ۸

شکل (۲-۲) ترانسفورماتور تک فاز سه سیم پیچه در مرجع [۱۱] ۹

شکل(۲-۳) مدار معادل ترانسفورماتور در مرجع[۱۱] ۹

شکل (۲-٤) اتصال کوتاه در یکی از سیم پیچی های ترانسفورماتور ۱۰

شکل (۲-۵) مدار معادل ترانسفورماتور تک فاز در حالت اعمال اتصال کوتاه در یکی از سیم‌پیچی‌ها..... ۱۰

شکل(۲-٦) اثر خطای اتصال کوتاه سیم پیچ به همان سیم پیچ بر روی شار و میدان مغناطیسی ۱۱

شکل(۲-۷) خطای اتصال کوتاه سیم پیچ به همان سیم پیچ در ترانسفورماتور ۱۱

شکل(۲-۸) مدار معادل ترانسفورماتور با یک خطای سیم پیچ به همان سیم پیچ ۱۲

شکل(۲-۹) مدار معادل برای سیم پیچی ترانسفورماتور ۱۳

شکل(۲-۱۰) مدل کامل برای یک ساق ترانسفورماتور ۱۳

شکل(۲-۱۱) خطای اتصال کوتاه بین سیم پیچی های تراسفورماتور مرجع [۱۹] ۱۵

شکل(۲-۱۲) تزویج مغناطیسی ترانسفورماتور سه سیم پیچه ۱۷

شکل (۲-۱۳) مدار معادل موازی عایق مرجع[۲۳] ۱۹

شکل(۲-۱٤) دیاگرام فازوری ۱۹

شکل(۲-۱۵) دیاگرام برای عایق نمونه ۲۰

شکل (۲-۱٦) مدل جرقه برای خطاهای داخلی ترانسفورماتور ۲۱

شکل (۲-۱۷) مدل کامپیوتری ترکیبی سری برای شبیه سازی خطاهای داخلی ترانسفورماتور ۲۱

شکل(۲-۱۸) دیاگرام ترسیمی مدار شبیه سازی شده ۲۲

شکل (۳-۱) ترانسفورماتور سه فاز دو سیم پیچه ۲۹

شکل (۳-۲) ترانسفورماتور سه فاز دو سیم پیچه با اعمال خطای فاز به فاز ۳۱

شکل(۳-۳)ترانسفورماتور سه فاز دو سیم پیچه با اعمال خطای فاز به زمین ۳۲

شکل(۳-٤) اعمال یک جریان نمونه به سیم پیچ ترانسفورماتور در حالت وجود خطای داخلی..... ۳۲

شکل(۳-۵) فرآیند مدلسازی و معادلات روش اجزاء محدود ۳۸
شکل (۳-٦) حوزه مداری اتصال کوتاه داخلی ترانسفورماتور قدرت ٤١
شکل (۳-۷) ساختار هندسی و الکتریکی ترانسفورماتور حامل خطای اتصال کوتاه ٤٢
شکل(۳-۸) ساختار هندسی ترانسفورماتور تحت بررسی حامل خطای اتصال کوتاه بر روی سیم‌پیچی فشارقوی.....٤۳
شکل (۳-۹) حوزه اجزاء محدود ترانسفورماتور تحت بررسی حامل خطای اتصال کوتاه بر روی سیم‌پیچی فشارقوی.....٤۳
شکل (۳-۱۰) مدل اجزاء محدود ترانسفورماتور مورد مطالعه ٤٥
شکل(۳-۱۱)مدل اجزاء محدود ترانسفورماتور مورد مطالعه با وجود مش بندی ٤٦
شکل(۳-۱۲) نمایی از ترانسفورماتور مورد مطالعه ٤۷
شکل(۳-۱۳) منبع تغذیه رله و ترانسفورماتور ٤۸
شکل(۳-۱٤) نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه ٤۹
شکل(۳-۱٥) حوزه مداری خطای اتصال کوتاه سیم پیچ به سیم پیچ دیگر ٥۰
شکل(۳-۱٦) حوزه‌ی مداری ترانسفورماتور در حالت اتصال کوتاه سیم‌پیچ به سیم‌پیچ دیگر با جهت مخالف ورود جریان به سیم‌پیچی.....٥۰
شکل (٤-۱) اصول حفاظت دیفرانسیل الف: وجود خطای داخلی ب: بدون خطا ٥۷
شکل(٤-۲) مشخصه بایاس رله تفاضلی ٥۹
شکل(٤-۳) تغییرات مؤلفه اصلی یا هارمونیک اول جریان دیفرانسیلی ترانسفورماتور در ٥٦
شکل(٤-٤) تغییرات مؤلفه اصلی یا هارمونیک اول جریان تفاضلی ترانسفورماتور در حالت بدون خطا (عملکرد عادی ترانسفورماتور) ٦۲
شکل(٤-٥) تغییرات مؤلفه اصلی یا هارمونیک اول جریان تفاضلی ترانسفورماتور در حالت خطای داخلی، اتصال کوتاه تک فاز به زمین در ٥٥ درصد سیم‌پیچی ٦۳
شکل(٤-٦) تغییرات مؤلفه اصلی یا هارمونیک اول جریان تفاضلی ترانسفورماتور در حالت جریان هجومی ٦۳
شکل(٤-۷) سطوح مختلف تجزیه سیگنال در روش DWT با فیلترینگ و کاهش متوالی تعداد نمونه‌های زمانی با مرتبه ۲ .....٦٦

شکل(٤-٨) ضرایب DWT جریان دیفرانسیلی ترانسفورماتور در وضعیت کاری سالم ترانسفورماتور ٧٠

شکل(٤-٩) ضرایب DWT جریان تفاضلی ترانسفورماتور حامل خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچی در سمت ثانویه ترانسفورماتور در برگیرنده ٤٥ درصد سیم‌پیچی ٧١

شکل(٤-١٠) ضرایب DWT جریان تفاضلی ترانسفورماتور در حالت وجود خطای خارجی..... ٧٢

شکل(٤-١١) ضرایب DWT جریان تفاضلی ترانسفورماتور در حالت کلیدزنی(جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی) ٧٣

شکل(٤-١٢)تغییرات طیفی انرژی ضرایب ویولت جریان دیفرانسیلی در حالت سالم یا بدون خطا ٧٤

شکل(٤-١٣)تغییرات طیفی انرژی ضرایب موجک جریان تفاضلی در حالت خطای داخلی سیم‌پیچ به زمین دربرگیرنده ٥٥درصد سیم‌پیچی ٧٥

شکل(٤-١٤)تغییرات طیفی انرژی ضرایب موجک جریان تفاضلی در حالت جریان هجومی ٧٦

شکل(٤-١٥) متوسط ضرایب DWT جریان تفاضلی ترانسفورماتور در حالت وجود خطای داخلی ٧٩

شکل (٤-١٦) متوسط ضرایب DWT جریان تفاضلی ترانسفورماتور در حالت وجود خطای خارجی ٨٠

شکل (٤-١٧) متوسط ضرایب DWT جریان تفاضلی ترانسفورماتور در حالت جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی ٨١

شکل (٤-١٨) قانون انتخاب نسبی مسیر جستجو ٨٥

شکل (٤-١٩) تابع عضویت بل ٨٧

شکل(٤-٢٠)طرحواره منطق تصمیم گیری رله تفاضلی..... ٩٠

شکل(٥-١) شکل موجهای جریان اولیه(الف) و جریان حلقه اتصالی(ب) در حالت اتصال کوتاه تکفاز به زمین در سمت ثانویه ترانسفورماتور، حاصله از شبیه‌سازی مرجع[١٣]، اجزاء محدود و اندازه‌گیری‌های عملی برای اتصال کوتاه ٢٠٠امین دور به زمین در زمان t=١ ثانیه ٩٦

شکل (۵-۲) شکل موجهای جریان اولیه(الف) و جریان حلقه اتصالی(ب) در حالت اتصال کوتاه تکفاز به زمین در سمت اولیه ترانسفورماتور، حاصله از شبیه‌سازی مرجع[۱۳]، اجزاء محدود و اندازه‌گیری‌های عملی برای اتصال کوتاه ۲۰۰امین دور به زمین در زمان t=۱ ثانیه ۹۷
شکل(۵-۳) شکل موجهای جریان اولیه(الف) و جریان حلقه اتصالی(ب) در حالت اتصال کوتاه سیم‌پیچ به همان سیم‌پیچ در سمت ثانویه ترانسفورماتور، حاصله از شبیه‌سازی مرجع[۱۳]، اجزاء محدود و اندازه‌گیری‌های عملی برای اتصال کوتاه دورهای۳۵٦ به ٤۰۰ در زمان t=۱ ثانیه ۹۸
شکل(۵-٤) شکل موجهای جریان اولیه(الف) و جریان حلقه اتصالی(ب) در حالت اتصال کوتاه سیم‌پیچ به سیم‌پیچ دیگر در ترانسفورماتور درحالت پلاریته ولتاژ موافق، حاصله از شبیه‌سازی اجزاء محدود و اندازه‌گیری‌های عملی، اتصال کوتاه دورهای۳۵٦ به ٤۰۰ در زمان t=۱ ثانیه ۹۹
شکل(۵-۵) شکل موجهای جریان اولیه(الف) و جریان حلقه اتصالی(ب) در حالت اتصال کوتاه تکفاز به سیم‌پیچ به سیم‌پیچ دیگر در ترانسفورماتور در حالت پلاریته ولتاژ مخالف، حاصله از شبیه‌سازی اجزاء محدود و اندازه‌گیری‌های عملی، اتصال کوتاه دورهای۳۵٦ به ٤۰۰ در زمان t=۱ ثانیه ۱۰۰
شکل(۵-٦)- توزیع چگالی شار درون ترانسفورماتور، الف: تحت عملکرد نرمال، ب: تحت شرایط اتصال کوتاه داخلی ۱۰٤
شکل(۵-۷) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت ثانویه، اتصال کوتاه ۹۵ درصد سیم‌پیچی در زمان t=۰/۰۵ ثانیه ۱۰۷
شکل(۵-۸) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت اولیه، اتصال کوتاه ۹۵ درصد سیم‌پیچی در زمان t=۰/۰۵ ثانیه ۱۰۸
شکل(۵-۹) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت ثانویه، اتصال کوتاه ۵۵ درصد سیم‌پیچی در زمان t=۰/۰۵ ثانیه ۱۰۹

شکل(۵-۱۰) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت ثانویه، اتصال کوتاه ۳۰ درصد سیم‌پیچی در زمان t=۰/۰۵ ثانیه ۱۱۰
شکل(۵-۱۱) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت اولیه، اتصال کوتاه ۳۰ درصد سیم‌پیچی در زمان t=۰/۰۵ ثانیه ۱۱۱
شکل(۵-۱۲) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت ثانویه، اتصال کوتاه ۱۰ درصد سیم‌پیچی در زمان t=۰/۰۵ ثانیه ۱۱۲
شکل(۵-۱۳) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت اولیه، اتصال کوتاه ۱۰ درصد سیم‌پیچی در زمان t= ۰/۰۵ثانیه ۱۱۳
شکل(۵-۱٤) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت ثانویه، اتصال کوتاه دورهای ۳٦۰ و ٤۰۰ در زمان t=۰/۷۵ ثانیه ۱۱٤
شکل(۵-۱۵) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت بدون خطا، عملکرد در بار نامی ترانسفورماتور ۱۱۵
شکل(۵-۱٦) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور، کلیدزنی در زمان $\theta = 90$ ۱۱٦
شکل(۵-۱۷) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور، کلیدزنی در زمان $\theta = 0$ ۱۱۷
شکل (۵-۱۸) ضرایب f1 تا f5 استخراج شده از ضرایب سیگنالهای جزئی و انرژی آنها در حالت اتصال کوتاه داخلی سیم پیچ به زمین در سمت ثانویه ترانسفورماتور در زمان t=۰/۰۵ ثانیه ۱۱۸

شکل(۵-۱۹) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت ثانویه، اتصال کوتاه ۵۵ درصد سیم‌پیچی در زمان t=۰/۰۶ ثانیه ۱۲۰
شکل(۵-۲۰) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به زمین در سمت اولیه، اتصال کوتاه ۱۰ درصد سیم‌پیچی در زمان t= ۰/۰۶ ثانیه ۱۲۱
شکل(۵-۲۱) شکل موج‌های سیگنال a) تریپ رله، b) جریان دیفرانسیلی، c) جریان اولیه و d) جریان ثانویه ترانسفورماتور در حالت وقوع خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ به سیم‌پیچ در سمت ثانویه، اتصال کوتاه دورهای ۳۶۰ و ۴۰۰ در زمان t=۰/۰۶ ثانیه ۱۲۲

فهرست جداول

جدول (۳-۱) مقادیر نامی ترانسفورماتور تحت بررسی ٤٤
جدول (٤-۱) دامنه هارمونیک های مختلف یک ترانسفورماتور نمونه در حالت جریان هجومی ٦١
جدول (٤-۲) خروجی زیرتابع های الگوریتم تشخیص خطا ۸۹
جدول (۵-۱) نتایج حاصل از شبیه سازی ها و تست عملی ۱۰۱
جدول (۵-۲) نتایج حاصل از شبیه سازی ها و تست نمونه عملی..... ۱۰۳
جدول (۵-۳) نتایج حاصل از شبیه سازی ها و تست نمونه عملی..... ۱۰۳
جدول (۵-٤) ضرایب بدست آمده از الگوریتم بهینه سازی برای استفاده در الگوریتم پیشنهادی... ۱۰٦

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- خطاهای اتصال کوتاه سیم پیچی در ترانسفورماتورهای قدرت

ترانسفورماتورهای قدرت به عنوان یکی از مهمترین و گرانترین اجزای شبکه‌های توزیع و انتقال انرژی الکتریکی به شمار می‌آیند که با توجه به افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی تحلیل حالتهای خطا در ترانسفورماتورهای قدرت و بویژه خطاهای منجر به شکست ترانسفورماتور نزد بهره‌برداران شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است. آسیب دیدن ترانسفورماتور علاوه بر تحمیل هزینه‌های تعمیر و جایگزینی آن باعث قطع انتقال توان نیز می‌شود و به علت پایین آوردن قابلیت اطمینان سیستم تبعات دیگری را نیز به همراه دارد.

این موضوع مخصوصاً در سالهای اخیر که بحث خصوصی‌سازی شبکه‌ها مطرح است اهمیت دوچندانی به خود گرفته است. با این حال، وقوع خطا در ترانسفورماتور قدرت به دلایل مختلف، از جمله فرسودگی ترانسفورماتور، امری اجتناب‌ناپذیر است. اجزایی مانند سیم‌پیچی‌ها، هسته، تانک، سیستم خنک‌کننده، روغن و تپ‌چنجرهای تحت‌بار و عملکرد صحیح‌شان، سلامت کاری ترانسفورماتور را تضمین می‌نمایند[۱]. با توجه به مطالعات آماری انجام‌شده در مراجع مختلف، بیشترین سهم از عوامل شکست ترانسفورماتورهای قدرت نیروگاهی و انتقال به خطاهای اتصال کوتاه سیم‌پیچی و خطاهای تپ‌چنجر تحت بار اختصاص دارد[۲و۳].

تحقیقات دیگری نیز که صورت گرفته است، ثابت می‌نماید که مهمترین عامل نقص ترانسفورماتورهای قدرت، وقوع خطاهای اتصال کوتاه بر روی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور می‌باشد که به علت عدم شناسایی در مراحل اولیه، در طول سیم‌پیچی گسترش یافته و در نهایت شکست و فروپاشی کامل ترانسفورماتور را در پی داشته اند[٤و٥].

تخریب عایقی بین حلقه‌های سیم‌پیچی، مهمترین عامل در شکل‌گیری خطای اتصال کوتاه بر روی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتورهای قدرت ارزیابی می‌گردد. در شرایط کار عادی ترانسفورماتور، عایق سیم‌پیچی، تحت میدان الکتریکی شدیدی قرار دارد که همین میدان می‌تواند به پیری و تخریب تدریجی آن منجر شود، اما وجود تنش‌های حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و رطوبت، فرآیند تخریب تدریجی عایق را شتاب و شدت بیشتری می‌بخشند. اضافه بارهای ترانسفورماتور و حرارت ناشی از آن، عامل اصلی ایجاد تنش‌های حرارتی در عایق سیم‌پیچی محسوب می‌شوند. تنش‌های الکتریکی

ایجاد شده در عایق سیم‌پیچی ترانسفورماتور در نتیجه افزایش گرادیان ولتاژ در سطح عایق نسبت به ولتاژ شکست عایق، بوجود می‌آیند. تنش‌های مکانیکی می‌توانند ناشی از ارتعاشات ایجاد شده در اثر نیروهای اتصال کوتاه شدید در ترمینالهای سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور باشند. رطوبت نیز که از طریق ایجاد یک مسیر هادی در سطح عایق و یا کنش متقابل با ماده عایقی، باعث ایجاد تغییرات شیمیایی و به تبع آن، کاهش استقامت عایقی سیم‌پیچی می‌شود از دیگر عوامل در تخریب عایقی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور محسوب می‌شود. استمرار این تنش‌ها، باعث تغییر خواص الکتریکی و مکانیکی عایق می‌گردد و در نهایت با شکست الکتریکی کامل عایق در آن محل، اتصال کوتاه بین حلقه‌های مجاور رخ می‌دهد[٦و٧].

۱-۲- اهمیت بررسی خطاهای اتصال کوتاه سیم پیچی

بهره‌مندی از ترانسفورماتورهایی با قابلیت اطمینان بالا و اطمینان از تداوم انتقال انرژی الکتریکی، امروزه با توسعه شبکه‌های خصوصی و تجدید ساختاریافته، بیش از پیش ضرورت یافته است. بهره-بردار شبکه برق مایل است در کنار حداکثر بارگیری از ترانسفورماتور تا حد امکان از حداکثر عمر آن نیز استفاده نماید. همه‌ی این‌ها بدین معنی است که تحلیل و شناسایی خطاهای ترانسفورماتور و بویژه خطاهای اتصال کوتاه سیم‌پیچی که مهمترین عامل شکست ترانسفورماتورهای قدرت محسوب می‌شوند و در صورت گسترش، تبعات اقتصادی جدی برای ترانسفورماتور و شبکه‌ی متصل به آن خواهندداشت، نقش بسیار حیاتی در عملکرد بهینه ترانسفورماتور و شبکه‌ی الکتریکی ایفا می‌نماید. این مسأله مخصوصاً در ترانسفورماتورهایی که مدت زیادی بهره‌برداری شده‌اند، اهمیت بیشتری دارد. هرچند در مورد ترانسفورماتورهای جدید نصب‌شده در شبکه نیز پیشرفت‌های چشمگیر اخیر در فرآیندهای طراحی و ساخت آنها باعث نشده تا این تجهیزات، از بروز خطاها مصون بمانند. شکل (۱-۱) یک ترانسفورماتور قدرت که در سیم‌پیچی‌های آن اتصال کوتاهی به وقوع پیوسته است را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در صورت عدم شناسایی به موقع خطای داخلی در ترانسفورماتور و پیشروی خطا تبعات سنگینی متوجه ترانسفورماتور خواهد شد.