بسم الله الرحمن الرحيم
إنه من سليمان وإنه

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی برق

رساله دکتری جهت اخذ درجهٔ دکترای مهندسی برق- قدرت

روش تشخیص جابجایی سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت در حال کار

نگارش:

پیمان کریمی فرد

استاد راهنما:

دکتر گئورک قره‌پتیان

آذر ۱۳۸۶

بسمه تعالي

تاريخ : ۱۳۸۷/۱/۱۷
شماره : .....

فرم اطلاعات پايان نامه
كارشناسي ارشد و دكترا

دانشگاه صنعتي اميركبير
(پلي تكنيک تهران)

معاونت پژوهشي
فرم پروژه تحصيلات تكميلي ۷

مشخصات دانشجو
نام و نام خانوادگي : پیمان کریمی فرد ■ دانشجوي آزاد ☐ بورسيه ☐ معادل

شماره دانشجويي: ۸۰۱۲۳۹۰۷ دانشكده : برق رشته تحصيلي: برق- قدرت

نام و نام خانودگي استاد راهنما : دكتر گئورك قره پتيان

عنوان به فارسي: روش تشخیص جابجایی سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت در حال کار

عنوان به انگليسی:

Method of On-line Detection of Winding Defects in Power Transformers

نوع پروژه: دكترا ■ **كاربردي** ☐ **بنيادي** ☐ **توسعه اي** ■ **نظري**

تاريخ شروع: ۱۳۸۴/۱۲/۲۰ (تاريخ تصويب پروپوزال) تاريخ خاتمه :۱۳۸۶/۹/۲۷ (تاريخ دفاع از رساله) تعداد واحد:۶

سازمان تامين كننده اعتبار :-

واژه هاي كليدي به فارسي : سیم پیچ های ترانسفورماتور، تغییر شکل شعاعی، جابجایی محوری، تابع تبدیل، برازش برداری

واژه هاي كليدي به انگليسي :
Transformer windings, Radial Deformation, Axial displacement, Transfer function and Vector fitting

---

نظرها و پيشنهادها به منظور بهبود فعاليت هاي پژوهشي دانشگاه:

استاد راهنما:

دانشجو:پرداخت مقرري ماهيانه به ميزان كافي براي دانشجويان دكترا جهت تمركز مداوم بر روي رساله تحقيقاتي
امضاء استاد راهنما : تاريخ:

نسخه ۱: معاونت پژوهشي
نسخه ۲ : كتابخانه و به انضمام دو جلد پايان نامه به منظور تسويه حساب با كتابخانه و مركز اسنادومدارک علمي

تقدیم به:

پدر فداکارم

که همواره پشتیبان و مشوق من در تحصیل علم بوده است.

و

مادر مهربانم

که مظهر گذشت و فداکاری است و هرچه دارم از اوست.

و

همسر عزیزم

که در تمام طول دورهٔ دکترا، مشکلات را تحمل نمود و مشوق و همراه من بوده است.

سپاسگزاری

شکر و ستایش خداوند را که در طی مدت تحصیل، استقامت و صبر را به من ارزانی داشت و ناملایمات وکمبودها را رفع نمود.

بدون تردید، دستاوردهای این تحقیق را مرهون نظارت مستمر جناب آقای دکتر گئورگ قره‌پتیان، استاد راهنمای ارجمند می‌دانم. کمک‌های شایان ایشان در مراحل مختلف تحصیل و تلاش ایشان برای رفع مشکلات علمی و تحصیلی شایستهٔ تقدیر است. ایشان الگوی یک استاد نمونه برای من می باشند. امیدوارم در آینده نیز استحقاق بهره‌مندی از راهنمایی های ارزشمند ایشان را داشته باشم.

راهنمایی‌های ارزشمند، جناب آقای پروفسور Stefan Tenbohlen در تکمیل مقالات تهیه شده ، جای تقدیر دارد.

از جناب آقای دکتر قاضی زاده که مشوق اصلی اینجانب جهت ادامه تحصیل بودند، بسیار سپاسگزارم.

ضمناً، مراتب سپاس خود را از اعضاء فرهیخته هیأت داوران در قبول زحمت مطالعه رساله و شرکت در جلسه دفاعیه ابراز داشته و بهروزی آنان را آرزومندم.

در خاتمه، از دوستان بسیار خوبم در دانشگاه صنعتی امیرکبیرکه من را در مراحل مختلف یاری و همراهی نمودند، به نیکی یاد می‌کنم.

چکیده

خطاهای تغییر شکل شعاعی و جابجایی محوری سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت، از جمله مهمترین خطاهای داخلی هستند که باعث خروج ناخواسته و کاهش عمر ترانسفورماتورها می گردند. بنابراین تشخیص نوع، محل بروز و شدت اینگونه خطاها در مراحل اولیه بروز آن، بسیار اهمیت دارد. روش مقایسه تابع تبدیل اندازه گیری شده ترانسفورماتور با تابع تبدیل مرجع مربوط به شرایط سالم بعنوان موثرترین روش تشخیص بروز عیب مکانیکی سیم پیچ شناخته شده است. با این وجود، روش مذکور نوع و محل عیب را مشخص نمی سازد. همچنین، دارای دقت کافی در تشخیص شدت عیب نیست.

جهت رفع عیوب این روش، مطالعه بر روی مدلسازی انواع عیوب بر روی دو نمونه ترانس انجام گرفت. اعتبار مدل های مورد استفاده، در تحقیقات قبلی بوسیله انجام اندازه گیری های عملی تأیید شده اند. نتایج نشان دادند که الگوی جابجایی فرکانسهای تشدید مربوط به منحنی تابع تبدیل، می تواند منجر به شناسایی نوع و محل عیب گردد. همچنین شاخص جدیدی جهت تشخیص دقیق تر شدت عیب معرفی گردید. از طرفی از روش موثر برازش برداری (VF) بعنوان ابزاری جهت تخمین دقیق و پایدار تابع تبدیل در غالب یک تابع کسری استفاده گردید. تغییر پارامترهای تابع تبدیل تخمین زده شده نسبت به شرایط سالم ترانسفورماتور، می تواند بعنوان روش دیگر شناسایی عیب مورد استفاده قرار گیرد. در اینحالت با توجه به نمایش اندازه و فاز قطبهای تابع تبدیل توسط دیاگرام نایکوئیست، امکان تشخیص نوع و محل عیب فراهم می گردد. همچنین در روش پیشنهادی امکان حذف نویز و کاهش خطاهای ناشی از اندازه گیری وجوددارد. بعلاوه، شاخص جدیدی که متناسب با جابجایی قطبهای تابع تبدیل است، جهت تشخیص شدت عیب معرفی شده است. درنهایت، الگوریتم های جدیدی جهت شناسایی نوع، محل و شدت عیب مکانیکی سیم پیچ پیشنهاد گردیده است.

همچنین با توجه به نتایج شبیه سازی های انجام شده دسته بندی بر روی ولتاژهای گذرای شبکه از نظر قابلیت تشخیص نوع و محل عیب انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: سیم پیچ های ترانسفورماتور، تغییر شکل شعاعی، جابجایی محوری، تابع تبدیل، برازش برداری.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	د
فهرست مطالب	ه
فهرست شکل‌ها	ک
فهرست جداول	ن
۱– مقدمه	۱
۱-۱- مروری بر کارهای انجام شده	۳
۱-۱-۱- تشخیص عیوب مکانیکی سیم پیچ ترانس	۳
۱-۱-۱-۱- روش آزمایش اتصال کوتاه	۳
۱-۱-۱-۲-روش آزمایش ضربه فشار ضعیف	۳
۱-۱-۱-۳-روش امواج مافوق صوت	٤
۱-۱-۱-٤-روش تحلیل پاسخ فرکانسی	٤
۱-۱-۲- مدلسازی عیوب مکانیکی سیم پیچ ترانس	٤
۱-۲- طرح رساله	٦
۲– عیوب مکانیکی سیم پیچی ترانسفورماتورهای قدرت	۸
۲-۱- شناخت عیوب مکانیکی سیم پیچی	۱۰
۲-۲- شناسایی عیوب مکانیکی سیم پیچ بوسیله روش تحلیل پاسخ فرکانسی	۱٤
۲-۲-۱- روشهای اندازه گیری تابع تبدیل	۱٤
۲-۲-۱-۱- تعیین تابع تبدیل بااندازه گیری در حوزه فرکانس	۱٥

۲-۲-۱-۲- تعیین تابع تبدیل بااندازه گیری در حوزه زمان ۱۵
۲-۲-۲- مزایای روش تابع تبدیل ۱۸
۲-۲-۲-۱- تشخیص فاز معیوب ۱۸
۲-۲-۲-۲- تشخیص تقریبی میزان خطا ۲۰
۲-۲-۳- معایب روش تابع تبدیل ۲۰
۲-۳- جمع‌بندی فصل ۲۱

۳- مدلسازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور در حالات گذرا ۲۲
۳-۱- بررسی رفتار هسته در حالات گذرا ۲٤
۳-۲- انواع روشهای مدلسازی ترانسفورماتور درحالت گذرا ۲۵
۳-۲-۱- دیدگاه جعبه سیاه ۲٦
۳-۲-۱-۱- تحلیل مُدال ۲۷
۳-۲-۱-۲- روش حذف قطب‌ها ۲۸
۳-۲-۲- دیدگاه فیزیکی ۲۸
۳-۲-۲-۱- روش خط انتقال چند فازه ۲۹
۳-۲-۲-۲- مدل مشروح ۳۰
۳-۲-۳- روش مدلسازی هایبرید ۳۲
۳-۳- انتخاب مناسب‌ترین روش مدل‌سازی ۳۳
۳-٤- پیاده سازی مدل مشروح ترانسفورماتور ۳٤
۳-٤-۱- مدلسازی سیم پیچ ۳۵
۳-٤-۱-۱- معادلات *KVL* در شاخه‌های سلفی ۳٦
۳-٤-۱-۲- معادلات *KCL* در گره‌ها ۳۸
۳-٤-۲- مدلسازی ترانس تکفاز ۳۹
۳-٤-۳- مدلسازی ترانس سه فاز ٤۲

۳-٤-٤- مدلسازی عیوب در سیم پیچ ٤۳
۳-٤-٤-۱- مدلسازی جابجایی محوری سیم پیچ ٤۳
۳-٤-٤-۲- مدلسازی تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ٤٤
۳-۵- نمونه های مورد مطالعه ٤٦
۳-۵-۱- نمونه اول مطالعه ٤٦
۳-۵-۲- نمونه دوم مطالعه ٤۸
۳-٦- جمع‌بندی فصل ۵۰

۴- روش تخمین تابع تبدیل ۵۱
٤-۱- روشهای تخمین تابع تبدیل ۵۳
٤-۱-۱- روش Levy ۵۳
٤-۱-۲- روش Sanathanan and Koerner ۵٤
٤-۱-۳- روش Payne ۵٤
٤-۱-٤- روش Lawrence and Rojers ۵٤
٤-۱-۵- روش Stahl ۵۵
٤-۱-٦- روش Whitfield ۵۵
٤-۱-۷- روش برازش برداری ۵۵
٤-۲- انتحاب روش مناسب برازش تابع تبدیل ٦۰
٤-۳- جمع‌بندی فصل ٦۱

۵- الگوریتم تعیین نوع و محل خطا ٦۲
۵-۱- مدلسازی ترانس تکفاز برای مطالعه عیوب ٦٤
۵-۱-۱- مطالعه بر اساس تغییر شکل منحنی تابع تبدیل ٦٤
۵-۱-۱-۱- مطالعه جابجایی محوری ٦٤

۵-۱-۱-۲- مطالعه تغییر شکل شعاعی ٦٦
۵-۱-۱-۳- تشخیص نوع عیب ٦٨
۵-۱-۱-٤- تشخیص محل عیب تغییر شکل شعاعی ٦٩
۵-۱-۲- مطالعه بر اساس تخمین تابع تبدیل به روش برازش برداری ۷۵
۵-۱-۲-۱- مطالعه جابجایی محوری ۷٦
۵-۱-۲-۲- مطالعه تغییر شکل شعاعی ۷۷
۵-۱-۲-۳- تشخیص نوع عیب ۸۰
۵-۱-۲-٤- تشخیص محل عیب تغییر شکل شعاعی ۸٤
۵-۱-۲-۵- تشخیص شدت عیب ۸٤
۵-۲- مدلسازی ترانس سه فاز برای مطالعه عیوب ۸۵
۵-۲-۱- مطالعه بر اساس تغییر شکل و تخمین منحنی تابع تبدیل ۸٦
۵-۲-۱-۱- مطالعه جابجایی محوری ۸۸
۵-۲-۱-۲- مطالعه تغییر شکل شعاعی ۸۸
۵-۲-۱-۳- تشخیص نوع عیب ۸۹
۵-۲-۱-٤- تشخیص محل عیب تغییر شکل شعاعی ۹۱
۵-۲-۱-۵- تشخیص شدت عیب ۹۱
۵-۳- الگوریتم های پیشنهادی ۹٦
۵-۳-۱- الگوریتم بر اساس تغییر شکل منحنی تابع تبدیل ۹۷
۵-۳-۲- الگوریتم بر اساس تخمین منحنی تابع تبدیل به روش برازش برداری ۹۹
۵-۳-۳- الگوریتم ترکیبی ۱۰۱
۵-٤- جمع‌بندی فصل ۱۰۱

۶- امکان سنجی تشخیص عیب ترانس بوسیله ولتاژهای گذرا ۱۰۲
٦-۱- انواع ولتاژهای گذرا در سیستم های قدرت ۱۰۳

٦-١-١- اضافه ولتاژهای موقت ١٠٣
٦-١-٢- اضافه ولتاژهای ناشی از کلید زنی ١٠٤
٦-١-٣- اضافه ولتاژ های صاعقه ١٠٥
٦-١-٤- اضافه ولتاژهای مربوط به کلید زنی پستهای GIS ١٠٥
٦-٢- مدلسازی اضافه ولتاژهای گذرا ١٠٦
٦-٢-١- مدلسازی موج ولتاژ ضربه کامل ١٠٦
٦-٢-٢- مدلسازی موج ولتاژ ضربه شکسته ١٠٨
٦-٢-٣- مدلسازی ولتاژ ضربه سوزنی ١٠٩
٦-٢-٤- مدلسازی ولتاژکلیدزنی ١١١
٦-٢-٥- مدلسازی ولتاژکلیدزنی شکسته ١١٢
٦-٣- دسته بندی امواج گذرای ولتاژ جهت شناسایی عیوب ١١٤
٦-٤- جمع‌بندی فصل ١١٦

٧- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ١١٧
٧-١- دستاوردها ١١٨
٧-٢- پیشنهادات ١٢٠

مراجع ١٢٢
پیوست‌ها ١٣٧
پیوست الف- خطاهای اندازه گیری تابع تبدیل در حوزه زمان ١٣٨
الف-١- خطای برش ١٣٩
الف-٢- خطای پردازش سیگنال ١٤١
الف-٣- خطای تغییر تپ چنجر ١٤١
الف-٤- خطای تغییر درجه حرارت محیط ١٤٢

پیوست ب- روش‌های تحلیلی - تقریبی تعیین پارامترهای مدل مشروح ۱۴۳
ب-۱- محاسبه ظرفیت های سیم پیچی ۱۴۴
ب-۱-۱- محاسبه خازن سری ۱۴۴
ب-۱-۲- محاسبه خازن موازی ۱۴۶
ب-۲- محاسبه اندوکتانس های خودی و متقابل ۱۴۷
ب-۳- محاسبه مقاومت‌ها ۱۴۹
ب-۳-۱- محاسبه مقاومت سری ۱۵۰
ب-۳-۲- محاسبه مقاومت موازی ۱۵۴
پیوست ج- پارامترهای محاسبه شده برای نمونه سیم پیچ های مورد مطالعه ۱۵۵
ج-۱- پارامترهای مربوط به نمونه ترانس اول ۱۵۶
ج-۱-۱- تغییرپارامترها در اثر مدلسازی جابجایی محوری در سیم پیچ فشارضعیف ۱۵۶
ج-۱-۱-۱- تغییر خازن های موازی ۱۵۷
ج-۱-۱-۲- تغییر اندوکتانس ها ۱۵۷
ج-۱-۲- تغییرپارامترها در اثر مدلسازی تغییرشکل شعاعی در سیم پیچ فشارقوی ۱۵۸
ج-۱-۲-۱- تغییر خازن های موازی ۱۵۸
ج-۱-۲-۲- تغییر اندوکتانس ها ۱۵۸
ج-۲- پارامترهای مربوط به نمونه ترانس دوم ۱۵۹
ج-۲-۱- تغییرپارامترها در اثر مدلسازی جابجایی محوری در سیم پیچ فشارضعیف ۱۵۹
ج-۲-۱-۱- تغییر خازن های موازی ۱۶۰
ج-۲-۱-۲- تغییر اندوکتانس ها ۱۶۰
ج-۲-۲- تغییرپارامترها در اثر مدلسازی تغییرشکل شعاعی در سیم پیچ فشارقوی ۱۶۱
ج-۲-۲-۱- تغییر خازن های موازی ۱۶۱
ج-۲-۲-۲- تغییر اندوکتانس ها ۱۶۱

فهرست شکلها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱): زوج دیسک واژگون (۱٤ حلقه در هر زوج دیسک) ۱۲

شکل (۲-۲): زوج دیسک درهم (۱٤ حلقه در هر زوج دیسک) ۱۲

شکل(۲-۳): اندازه گیری تابع تبدیل در حوزه زمان ۱۵

شکل (۳-۱): یک واحد سیم پیچی فشارقوی از نوع دیسکی ۳۵

شکل (۳-۲): مدار معادل یک واحد سیم‌پیچ در مدل مشروح ۳۵

شکل (۳-۳): مدار معادل سیم پیچ ۳٦

شکل (۳-٤): بخشی از مدل مشروح ترانس تکفاز ٤۰

شکل (۳-۵): بخشی از مدل مشروح یک فاز از ترانس سه فاز ٤۲

شکل (۳-٦): تاثیر جابجایی محوری بر پارامترها ٤٤

شکل (۳-۷): تاثیر تغییرشکل شعاعی بر پارامترها ٤٤

شکل (۳-۸): مدلسازی تغییر شکل شعاعی و انواع آن ٤۵

شکل (۳-۹): ابعاد و سیم بندی ترانسفورماتور نمونه اول مطالعه ٤۷

شکل (۳-۱۰): ابعاد ترانسفورماتور نمونه دوم مطالعه ٤۹

شکل (۵-۱): تابع تبدیل ولتاژ انتقالی شبیه سازی شده ٦۵

شکل (۵-۲): توابع تبدیل مربوط به جابجایی محوری سیم پیچ فشارضعیف ٦۵

شکل (۵-۳): توابع تبدیل مربوط به تغییرشکل شعاعی سیم پیچ قوی در: (a) بخش۱، (b) بخش۲ و (c) بخش۳ ٦۷

شکل (۵-٤): مقدار پریونیت انحراف از اندازه منحنی تابع تبدیل به ازای جابجایی محوری ۷۲

شکل (۵-۵): مقدار پریونیت انحراف از اندازه منحنی تابع تبدیل به ازای تغییرشکل شعاعی ۷۳

شکل (۵-٦): تابع تبدیل ولتاژ انتقالی شبیه سازی شده ۷٦

شکل (۵-۷): توابع تبدیل مربوط به جابجایی محوری سیم پیچ فشارضعیف ۷۷

شکل (۵-۸): توابع تبدیل مربوط به تغییرشکل شعاعی سیم پیچ قوی در: (a) بخش۱، (b) بخش۲ و (c) بخش۳ ۷۹
شکل (۵-۹): خطای برازش توابع تبدیل برای حالت های مختلف سیم پیچ سالم وجابجایی محوری ۸۰
شکل (۵-۱۰): قسمتهای حقیقی و مجازی قطبهای تابع تبدیل ۸۱
شکل (۵-۱۱): دیاگرام نایکوئیست تابع تبدیل تخمین زده شده به ازای جابجایی محوری ۸۱
شکل (۵-۱۲): دیاگرام نایکوئیست تابع تبدیل تخمین زده شده به ازای تغییرشکل شعاعی ۸۲
شکل (۵-۱۳): نحوه اتصالات و اندازه گیری ولتاژها بر روی ترانس مورد مطالعه ۸۷
شکل (۵-۱٤): تابع تبدیل ولتاژ انتقالی شبیه سازی شده فاز A ۸۷
شکل (۵-۱۵): توابع تبدیل مربوط به جابجایی محوری فاز A سیم پیچ فشارضعیف ۸۸
شکل (۵-۱٦): توابع تبدیل مربوط به تغییرشکل شعاعی فاز A سیم پیچ قوی در: (a) بخش۱، (b) بخش۲ و (c) بخش۳ ۹۰
شکل (۵-۱۷): خطای برازش توابع تبدیل برای حالتهای مختلف سیم پیچ سالم وجابجایی محوری ۹٤
شکل (۵-۱۸): قسمتهای حقیقی و مجازی قطبهای تابع تبدیل ۹۵
شکل (۵-۱۹): الگوریتم تشخیص نوع، محل و شدت عیب بر اساس تغییر شکل منحنی تابع تبدیل ۹۸
شکل (۵-۲۰): الگوریتم تشخیص نوع، محل و شدت عیب بر اساس تخمین منحنی تابع تبدیل به روش برازش برداری ۱۰۰
شکل (٦-۱): شکل‌موج ضربه صاعقهٔ استاندارد ۱۰۷
شکل (٦-۲): شکل‌موج ولتاژضربه کامل ۱۰۸
شکل (٦-۳): طیف فرکانسی‌موج ولتاژضربه کامل ۱۰۸
شکل (٦-٤): شکل‌موج ولتاژضربه شکسته ۱۰۹
شکل (٦-۵): طیف فرکانسی‌موج ولتاژضربه شکسته ۱۰۹
شکل (٦-٦): شکل‌موج ولتاژضربه سوزنی ۱۱۰
شکل (٦-۷): طیف فرکانسی‌موج ولتاژضربه سوزنی ۱۱۰

شکل (٦-٨): شکل‌موج ولتاژضربه سوزنی ١١١
شکل (٦-٩): طیف فرکانسی‌موج ولتاژضربه سوزنی ١١٢
شکل (٦-١٠): شکل‌موج ولتاژکلیدزنی شکسته ١١٣
شکل (٦-١١): طیف فرکانسی‌موج ولتاژ کلیدزنی شکسته ١١٣
شکل (الف-١): نحوه عمل روش پنجره سازی جهت کاهش خطای برش ١٤٠
شکل (الف-٢): اعمال توابع پنجره مختلف جهت کاهش خطای برش ١٤٠
شکل (الف-٣): اعمال روشهای مختلف نمونه بردازی ١٤١
شکل (ب-١): جانمایی سیم پیچ های سه فاز در ترانسفورماتور ١٤٦
شکل (ب-٢): دو حلقه هادی موازی ١٤٨
شکل (ب-٣): پارامترهای تعریف شده برای حلقه ١٤٩
شکل (ب-٤): سیم پیچ واحد و مقادیر میدان جهت محاسبه مقاومت سری ١٥١
شکل (ب-٥): شدت میدان هادی معادل یک زوج دیسک ١٥٢

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۳-۱): مشخصات سیم پیچ های ترانسفورماتور نمونه اول مطالعه ٤٦

جدول (۳-۲): مشخصات ابعادترانسفورماتور نمونه اول مطالعه ٤٧

جدول (۳-۳): مشخصات سیم پیچ های ترانسفورماتور نمونه دوم مطالعه ٤٨

جدول (۳-٤): مشخصات ابعادترانسفورماتور نمونه دوم مطالعه ٤٩

جدول (۳-۵): مشخصات سیم پیچ فشارضعیف ترانسفورماتور نمونه دوم مطالعه ٤٩

جدول (۵-۱): مشخصات ٤ درجه تغییرشکل شعاعی در سیم پیچ فشارقوی ٦٦

جدول (۵-۲): جهت جابجایی ۳ فرکانس رزونانس نمونه به ازای جابجایی محوری ٦٨

جدول (۵-۳): جهت جابجایی ۳ فرکانس رزونانس نمونه به ازای تغییرشکل شعاعی ٦٨

جدول (۵-٤): شاخص انحراف از اندازه به ازای جابجایی محوری ۷۰

جدول (۵-۵): شاخص انحراف از اندازه به ازای تغییرشکل شعاعی ۷۰

جدول (۵-٦): شاخص انحراف از فرکانس به ازای جابجایی محوری ۷۱

جدول (۵-۷): شاخص انحراف ازفرکانس به ازای تغییرشکل شعاعی ۷۱

جدول (۵-۸): شاخص مجموع مطلق انحراف به ازای جابجایی محوری ۷٤

جدول (۵-۹): شاخص مجموع مطلق انحراف به ازای تغییرشکل شعاعی ۷۵

جدول (۵-۱۰): مشخصات ٤ درجه تغییرشکل شعاعی در سیم پیچ فشارقوی ۷۷

جدول (۵-۱۱): جهت جابجایی ۳ بیضی دیاگرام نایکوئیست به ازای جابجایی محوری ۸۳

جدول (۵-۱۲): جهت جابجایی ۳ بیضی دیاگرام نایکوئیست به ازای تغییرشکل شعاعی ۸۳

جدول (۵-۱۳): شاخص مجموع مطلق جابجایی قطب ها به ازای جابجایی محوری ۸۵

جدول (۵-۱٤): شاخص مجموع مطلق جابجایی قطب ها به ازای تغییرشکل شعاعی ۸۵

جدول (۵-۱۵): جهت جابجایی ۳ فرکانس رزونانس نمونه به ازای جابجایی محوری ۸۹

جدول (۵-۱٦): جهت جابجایی ۳ فرکانس رزونانس نمونه به ازای تغییرشکل شعاعی ۸۹

جدول (۵-۱۷): شاخص انحراف از اندازه به ازای جابجایی محوری ۹۱
جدول (۵-۱۸): شاخص انحراف از اندازه به ازای تغییرشکل شعاعی ۹۲
جدول (۵-۱۹): شاخص انحراف از فرکانس به ازای جابجایی محوری ۹۳
جدول (۵-۲۰): شاخص انحراف ازفرکانس به ازای تغییرشکل شعاعی ۹۳
جدول (۵-۲۱): شاخص مجموع مطلق جابجایی قطب ها به ازای جابجایی محوری ۹۶
جدول (۵-۲۲): شاخص مجموع مطلق جابجایی قطب ها به ازای تغییرشکل شعاعی ۹۶
جدول (٦-۱): مقادیر پارامترهای ثابت منحنی شکل موج ولتاژ ضربه صاعقه استاندارد ۱۰۷
جدول (٦-۲): مقادیر پارامترهای ثابت منحنی شکل موج ولتاژ کلیدزنی استاندارد ۱۱۱
جدول (٦-۳): جهت جابجایی ۸ فرکانس رزونانس نمونه به ازای عیوب مکانیکی سیم پیچ ۱۱۵
جدول (ج-۱): مقدار خازن موازی بین دو سیم پیچ فشارقوی و فشارضعیف در شرایط مختلف ۱۵۷
جدول (ج-۲): مقدار اندوکتانس های متقابل بین دو سیم پیچ فشارقوی و فشارضعیف در شرایط مختلف بر حسب $\mu[H]$ ۱۵۷
جدول (ج-۳): مقادیر خازن های موازی در شرایط مختلف ۱۵۸
جدول (ج-٤): مقدار اندوکتانس های خودی ومتقابل در شرایط مختلف بر حسب $\mu[H]$ ۱۵۹
جدول (ج-۵): مقدار خازن موازی بین دو سیم پیچ فشارقوی و فشارضعیف در شرایط مختلف ۱٦۰
جدول (ج-٦): مقدار اندوکتانس های متقابل بین دو سیم پیچ فشارقوی و فشارضعیف در شرایط مختلف بر حسب $\mu[H]$ ۱٦۰
جدول (ج-۷): مقادیر خازن های موازی در شرایط مختلف ۱٦۱
جدول (ج-۸): مقدار اندوکتانس های خودی ومتقابل در شرایط مختلف بر حسب $\mu[H]$ ۱٦۲

فصل ۱

مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از عناصر اصلی و گران قیمت شبکه های انتقال برق هستند که نقش و ارزش زیادی در کاهش تلفات و افت ولتاژ شبکه به وسیله تغییرسطح ولتاژ دارند. از این رو خروج از مدار آنها باعث افزایش ریسک خاموشی می گردد. در سیستم های نوین مدیریت شبکه مبتنی بر بازار برق تشخیص به موقع عیوب ترانس به وسیله مونیتورینگ[۱] آن اهمیت زیادی خواهد داشت [۱]. زیرا علاوه بر جلوگیری از خروج ناخواسته ترانس، از مزمن شدن عیوب ترانس و افزایش و گسترش خسارت بیشتر ناشی از بهره برداری از ترانس معیوب جلوگیری می کند.

از جمله این عیوب که به دلیل عدم دسترسی به داخل ترانس به سختی قابل تشخیص است، تغییرات مکانیکی در هندسه و ساختار **سیم‌پیچی** های ترانس است. با توجه به شدت عیب، رخدادهای متفاوتی می تواند بروزکند [۲]. عیب مکانیکی[۲] شدید **سیم‌پیچ** ها می تواند به اتصال کوتاه الکتریکی و درنهایت عملکرد رله های حفاظتی برای خروج ترانس از مدار منجرگردد. عیب با شدت کمتر باعث آسیب عایقی و پدیده تخلیه جزئی[۳] می شود. این حالت با آنالیز روغن یا به وسیله عملکرد رله بوخ هلتس[۴] قابل تشخیص است. عیب مکانیکی خفیف سیم پیچ ها هیچ تغییر قابل ملاحظه ای را در عملکرد عادی ترانس ایجاد نمی کند. در عین حال این خطا می تواند به خرابی عایق و کاهش استقامت عایقی ترانسفورماتور منجر گردد. بنابراین تشخیص نوع، محل و شدت عیب سیم پیچ می تواند وضعیت

[۱] Monitoring
[۲] Mechanical defect
[۳] Partial discharge
[۴] Bucholtz relay

ترانس را نشان داده و از خروج ناخواسته آن جلوگیری کند. در حال حاضر روش مطمئنی جهت شناسایی و تفکیک عیوب مکانیکی سیم پیچی های ترانس وجود ندارد.

۱-۱- مروری بر کارهای انجام شده

تشخیص به موقع عیوب مکانیکی سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت می تواند از گسترش و تبدیل آن به عیوب عایقی و در نهایت اتصال کوتاه داخلی و ایجاد خاموشی در شبکه برق جلوگیری نماید.

۱-۱-۱- تشخیص عیوب مکانیکی سیم پیچ ترانس

به طور کلی در سالهای اخیر روش های مختلفی برای تشخیص عیوب سیم پیچی های ترانس در حالت خارج مدار معرفی شده است که در ادامه به شرح مختصری از مهمترین آنها می پردازیم [۳].

۱-۱-۱-۱- روش آزمایش اتصال کوتاه[۱]

در یک ترانسفورماتور قدرت، در صورتیکه سیم پیچ تغییر شکل یابد و ابعاد فیزیکی آن تغییر کند، راکتانس اتصال کوتاه آن نیز عوض خواهد شد. بنابراین به وسیله مقایسه دو مقدار راکتانس اتصال کوتاه در زمانهای قبل و بعد از رخداد اتصال کوتاه می‌توان تخمین خوبی از تأثیر نیروهای الکترودینامیکی بر روی سیم پیچ ها به دست آورد. مطابق استاندارد IEC تغییر بیش از ۲ درصد در میزان راکتانس اتصال کوتاه می‌تواند نمایانگر تغییر شکل در سیم پیچ ها باشد [٤]. این روش هیچ اطلاعاتی در مورد محل و نوع تغییر شکل سیم پیچ ها در اختیار نمی‌گذارد. مزیت این روش آن است که اندازه گیری راکتانس اتصال کوتاه می تواند هم زمان با بهره برداری از ترانس انجام پذیرد.

۱-۱-۱-۲-روش آزمایش ضربه فشارضعیف[۲]

این روش در واقع یک تحلیل پاسخ ضربه ولتاژ پایین در حوزه زمان می‌باشد. در این روش یک ضربه ولتاژ پایین به یک سر سیم پیچ اعمال شده و شکل موج پاسخ خروجی در سر دیگر سیم پیچ

[۱] SC: Short Circuit method
[۲] LVI: Low Voltage Impulse method