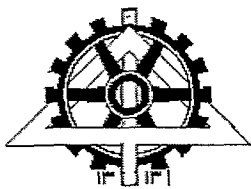


به نام خدا



دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

مدل‌سازی مشروح سیم‌پیچ ترانسفورماتور با کمک روش اجزاء
محدود جهت تحلیل خطای حلقه

نگارش

علی حمزه ساروی

استاد راهنما

دکتر حسین محسنی

استاد راهنمای دوم

دکتر امیر عباس شایگانی اکمل



پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

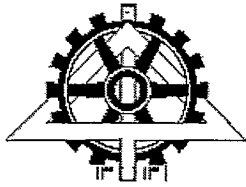
در

مهندسی برق گرایش قدرت

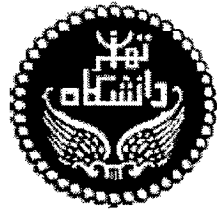
۳۲۸۷ / ۲ / ۲۳

شهریور ۱۳۸۶

۹۳۹۷۵



دانشگاه تهران



پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق
گرایش قدرت

مدل سازی مشروح سیم پیچ ترانسفورماتور با کمک روش اجزاء محدود
جهت تحلیل خطای حلقه
نگارش:

علی حمزه ساروی



این پایان نامه در تاریخ ۸۶/۶/۳۱ در مقابل هیأت داوران دفاع گردید و مورد تصویب قرار گرفت.
معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی پردیس دانشکده‌های فنی: دکتر جواد فیض

رئیس دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر: دکتر پرویز جبه‌دار مارال
معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر: دکتر سعید نادر اصفهانی

استاد راهنما: دکتر حسین محسنی

استاد راهنمای دوم: دکتر امیر عباس شایگانی اکمل

عضو هیأت داوران: دکتر شاهرخ فرهنگی

عضو هیأت داوران: دکتر سعید افشارنیا


عضو هیأت داوران: دکتر اصغر اکبری ازیرانی

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب **علی حمزه ساروی** تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: **علی حمزه ساروی**

امضای دانشجو: 

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانم که از پدر و مادر و خانواده‌ام به پاس تمام فداکاری‌ها، حمایت‌ها و مهربانی‌هایشان تشکر و قدردانی به عمل آورم و همچنین از زحمات جناب آقای دکتر حسین محسنی و جناب آقای دکتر امیر عباس شایگانی اکمل اساتید راهنمای پروژه صمیمانه تشکر و سپاسگزاری کنم. بی شک انجام این رساله بدون راهنمایی و نظرات ایشان مسیر نبود.

چکیده

ترانسفورماتورها یکی از مهم‌ترین ادوات شبکه‌های انتقال و توزیع هستند که به منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، از روش‌های پیشرفته جهت مانیتورینگ و عیب‌یابی آنها استفاده می‌شود. اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور به منظور تشخیص خطا سیم‌پیچ، یکی از این روش‌ها می‌باشد. میان خطاهای مختلف سیم‌پیچ و تغییرات امپدانس سیم‌پیچ که متناسب با نوع خطا است، رابطه وجود دارد. یافتن این روابط در تحلیل نتایج اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی به کار می‌آید.

در این تحقیق با استفاده از مدل مشروح ترانسفورماتور پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ را در فرکانس‌های بالا مدل می‌شود. پارامترهای مدار معادل با اطلاعات طراحی و نرم افزار اجزاء محدود محاسبه و نتیجه با روابط تحلیلی مقایسه شده‌اند. در نظر گرفتن تغییرات فرکانسی عناصر دقت این مدل را در توصیف رفتار ترانسفورماتور بالا برده است. محاسبه تغییرات فرکانسی پارامترها با نرم افزار اجزاء محدود و با تکنیک برازش منحنی انجام شده است. و الگوریتم تحلیل مدار در حوزه فرکانس با MATLAB پیاده‌سازی شده است.

سپس با مدل‌سازی اتصال کوتاه دوره‌دور در زوج‌دیسک‌های درهم و واژگون تغییرات امپدانس ورودی به نسبت حالت سالم مورد بررسی قرار می‌گیرد. و معیارهایی برای تشخیص اتصال حلقه از روی امپدانس ورودی زوج‌دیسک استنتاج می‌شود و صحت این معیارها با مدل‌سازی اتصال حلقه در سیم‌پیچ تایید می‌شود.

۱	۱-۱ مقدمه
۲	۱-۲ تاریخچه پاسخ فرکانسی سیم پیچ
۴	۲-۲ بررسی رفتار سیم پیچ همگن
۴	۲-۱ مقدمه
۴	۲-۲ رفتار ترانسفورماتور در حالت گذرا
۷	۲-۲-۱ تعیین توزیع ولتاژ در طول سیم پیچ در حالت اولیه و نهایی
۱۳	۲-۲-۲ نحوه توزیع ولتاژ بر روی سیم پیچ، ناشی از یک منبع سینوسی
۱۶	۲-۳-۲ محاسبه امپدانس ورودی سیم پیچ
۱۷	۲-۲-۴ بررسی رفتار هسته در حالت گذرا
۲۱	۳- انواع سیم پیچی
۲۱	۳-۱ خصوصیات سیم پیچ
۲۱	۳-۲ انواع رساناهای استفاده شده در ساخت سیم پیچ
۲۳	۳-۳ انواع سیم پیچی
۲۹	۴- روشهای مدلسازی
۲۹	۴-۱ روشهای مدلسازی
۳۱	۴-۱-۱ تحلیل مدل با استفاده از روش جعبه سیاه
۳۲	۴-۱-۲ روش تحلیل pole-removal
۳۳	۴-۱-۳ روشهای فیزیکی
۴۴	۴-۱-۴ استفاده از مدل خط انتقال چندفاز جهت شبیه سازی سیم پیچ
۴۶	۴-۲ انتخاب مناسب ترین روش جهت استفاده در مدلسازی فیزیکی سیم پیچ
۴۷	۵- تعیین پارامترهای مورد نیاز در مدلسازی مشروح
۴۷	۵-۱ روشهای تعیین پارامترهای مدل مشروح
۴۸	۵-۲ تعیین پارامترها به روش نظری
۴۸	۵-۱-۱ اندوکتانس
۵۸	۵-۱-۲ محاسبه ظرفیت
۶۲	۵-۱-۳ محاسبه مقاومت
۶۶	۵-۱-۴ محاسبه هدایت عایقی
۶۸	۶- شبیه سازی اتصال کوتاه دور به دور
۶۸	۶-۱ مشخصات سیم پیچ مدلسازی شده
۶۹	۶-۲ نحوه محاسبه عناصر مدار معادل یک زوج دیسک
۶۹	۶-۲-۱ اندوکتانس

۷۲	۲-۲-۶ ظرفیت
۷۵	۳-۲-۶ مقاومت
۷۶	۴-۲-۶ هدایت
۷۶	۳-۶ مدل‌سازی مدار
۷۷	۱-۳-۶ بررسی صحت برنامه نوشته شده به زبان MATLAB جهت مدل‌سازی سیم‌پیچ
۸۱	۲-۳-۶ مدل زوج دیسک واژگون و درهم سیم‌پیچ ترانسفورماتور نمونه
	۳-۳-۶ بررسی اثر تغییرات مقدار مقاومت و اندوکتانس خودی بر امپدانس ورودی زوج دیسک
۸۵	درهم و واژگون
۸۷	۴-۳-۶ اندازه‌گیری امپدانس ورودی زوج دیسک در هنگام اتصال به زوج دیسک‌های مجاور
۸۹	۴-۶ مدل سازی اتصال کوتاه دوره دور
۹۰	۱-۴-۶ مدل‌سازی اتصال کوتاه دور به دور در زوج دیسک واژگون
۹۰	۱-۴-۶ اثر اتصال کوتاه دور به دور بر زوج دیسک واژگون ایزوله
	۲-۴-۶ اثر وجود دیسک‌های مجاور بر زوج دیسک واژگون نمونه در هنگام وجود اتصال کوتاه دور
۹۱	به دور
۹۲	۳-۴-۶ اثر مقاومت اتصال کوتاه حلقه بر امپدانس ورودی
۹۴	۲-۴-۶ شبیه‌سازی اتصال کوتاه دور به دور در زوج دیسک درهم
۹۴	۱-۲-۴-۶ بررسی اثر اتصال حلقه بر زوج دیسک درهم ایزوله
۹۶	۲-۲-۴-۶ بررسی اثر اتصال حلقه بر زوج دیسک درهم در مجاورت زوج دیسک‌های دیگر
۹۶	۳-۲-۴-۶ اثر مقاومت محل اتصال حلقه بر امپدانس ورودی
۹۹	۵-۶ تحلیل ریاضی نتایج بدست آمده از مدل‌سازی اتصال حلقه در زوج دیسک واژگون و درهم
۱۰۳	۶-۶ مدل سازی اتصال کوتاه دوره دور در سیم‌پیچ
۱۰۵	۷-نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۰۵	۱-۷ نتیجه‌گیری
۱۰۶	۲-۷ پیشنهادات
۱۰۷	مراجع

- شکل (۱-۲) سیم پیچ تک لایه ترانسفورماتور و ظرفیتهای سری و موازی ۵
- شکل (۲-۲) مدل ریاضی ساده شده یک لایه از سیم پیچی ترانسفورماتور ۵
- شکل (۳-۲) مدار معادل ریاضی یک جزء دیفرانسیلی ۶
- شکل (۴-۲) منحنی توزیع ولتاژ سیم پیچ در حالت اولیه بر حسب پرینیت (انتهای سیم پیچ زمین شده است) ۹
- شکل (۵-۲) تغییرات ولتاژ در طول سیم پیچ در حالت اولیه بر حسب پرینیت (انتهای سیم پیچ زمین شده است) ۱۰
- شکل (۶-۲) منحنی توزیع ولتاژ سیم پیچ در حالت اولیه بر حسب پرینیت (انتهای سیم پیچ زمین نشده است) ۱۱
- شکل (۷-۲) تغییرات ولتاژ در طول سیم پیچ در حالت اولیه بر حسب پرینیت (انتهای سیم پیچ زمین نشده است) ۱۲
- شکل (۸-۲) منحنی‌های محاسبه شده پوش نوسانات ولتاژ به ازای مقادیر مختلف α ۱۳
- شکل (۹-۲) توزیع ولتاژ سیم پیچ در حالت دائم سینوسی ($\omega = 0.5\omega_{cr}$) به ازای $\alpha = 5, 10$ ۱۵
- شکل (۱۰-۲) تغییرات ولتاژ در وسط سیم پیچ به ازای تغییرات α و فرکانس ۱۵
- شکل (۱۱-۲) تغییرات امپدانس ورودی به ازای تغییرات فرکانس منبع و ظرفیت سری و ضریب a ۱۷
- شکل (۱-۳) انواع مختلف سیم پیچ لایه‌ای ۲۴
- شکل (۲-۳) سیم پیچ چند لایه ۲۵
- شکل (۳-۳) سیم پیچ دیسکی ۲۵
- شکل (۱-۴) مدار معادل تحلیل مدال ۳۱
- شکل (۲-۴) مدل مداری یک حلقه از سیم پیچ بعنوان به عنوان واحد سیم پیچ ۳۵
- شکل (۳-۴) مدار معادل زوج دیسک ۳۶
- شکل (۴-۴) ساختمان یک زوج دیسک واژگون و درهم ۳۷
- شکل (۵-۴) مدار معادل سیم پیچی جهت تحلیل در فضای حالت ۴۲
- شکل (۶-۴) سیستم Π فازه خط انتقال به عنوان مدل فرکانس بالای سیم پیچ ۴۵
- شکل (۱-۵) محاسبه اندوکتانس متقابل بین دو حلقه هم‌محور با سطح مقطع ناچیز ۵۰
- شکل (۲-۵) نمایش ابعادی ۸ حلقه از زوج دیسک که برای محاسبه اندوکتانس استفاده شده است ۵۲
- شکل (۳-۵) توزیع جریان در دو حلقه از زوج دیسک مرجع [۳] در فرکانس‌های $10KHz, 100KHz$ ۵۵
- شکل (۴-۵) منحنی تغییرات چگالی جریان در فرکانس‌های مختلف ۵۵
- شکل (۵-۵) منحنی تغییرات اندوکتانس خودی بر حسب فرکانس در حلقه‌های مختلف سیم پیچ ۵۶
- شکل (۶-۵) برازش منحنی اندوکتانس خودی بر حسب فرکانس ۵۸
- شکل (۷-۵) منحنی تغییرات مقاومت اهمی حلقه بر حسب فرکانس ۶۴

- شکل (۵-۸) مدار معادل فاستر n طبقه ۶۵
- شکل (۵-۹) برازش منحنی مقاومت اهمی بر حسب فرکانس ۶۶
- شکل (۶-۱) ابعاد پنجره هسته و سیم پیچ ۶۸
- شکل (۶-۲) اندوکتانس خودی حلقه‌های زوج دیسک بر حسب فرکانس ۷۲
- شکل (۶-۳) مقاومت اهمی حلقه‌های زوج دیسک بر حسب فرکانس ۷۵
- شکل (۶-۴) مدار معادل یک زوج دیسک وازگون دلخواه مدلسازی شده در نرم‌افزار اسپایس ۷۷
- شکل (۶-۵) امپدانس ورودی زوج دیسک دلخواه مدل‌سازی با اسپایس، فضای حالت و روش‌گره اصلاح شده ۷۹
- شکل (۶-۶) مدار معادل یک زوج دیسک درهم دلخواه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اسپایس ۸۰
- شکل (۶-۷) امپدانس ورودی زوج دیسک دلخواه مدل‌سازی با اسپایس، فضای حالت و روش‌گره اصلاح شده ۸۱
- شکل (۶-۸) امپدانس ورودی زوج دیسک وازگون با استفاده از روش‌گره اصلاح شده محاسبه شده ۸۲
- شکل (۶-۹) نمودار بود زوج دیسک وازگون ۸۳
- شکل (۶-۱۰) امپدانس ورودی زوج دیسک درهم به روش‌گره اصلاح شده ۸۴
- شکل (۶-۱۱) دیاگرام بود زوج دیسک درهم ۸۵
- شکل (۶-۱۲) امپدانس ورودی زوج دیسک درهم با احتساب تغییرات فرکانسی مقاومت و اندوکتانس خودی ۸۶
- شکل (۶-۱۳) امپدانس ورودی زوج دیسک وازگون با احتساب تغییرات فرکانسی مقاومت و اندوکتانس خودی ۸۷
- شکل (۶-۱۴) امپدانس زوج دیسک وازگون در خارج از سیم پیچ و داخل سیم پیچ ۸۹
- شکل (۶-۱۵) امپدانس ورودی زوج دیسک وازگون ممتد حالت سالم خط چین اتصالی میان حلقه‌های مختلف ۹۱
- شکل (۶-۱۶) امپدانس ورودی زوج دیسک وازگون در سیم پیچ منحنی ممتد حالت سالم و سایر منحنی‌های خط چین اتصالی ۹۲
- شکل (۶-۱۷) حداکثر دامنه امپدانس زوج دیسک وازگون بر حسب دسی‌بل به مقاومت اتصال حلقه ۹۳
- شکل (۶-۱۸) درصد پیش‌افتادگی اولین فرکانس تشدید در حالت اتصال حلقه به حالت سالم بر حسب مقاومت اتصالی ۹۴
- شکل (۶-۱۹) امپدانس زوج دیسک درهم خارج از سیم پیچ منحنی ممتد سالم منحنی‌های خط چین اتصال حلقه ۹۵
- شکل (۶-۲۰) امپدانس زوج دیسک درهم درون سیم پیچ منحنی ممتد سالم و منحنی‌های خط چین اتصال حلقه ۹۷

- شکل (۶-۲۱) حداکثر دامنه پیک اول امپدانس ورودی بر حسب دسی بل ۹۸
- شکل (۶-۲۲) منحنی درصد شیفیت اولین امپدانس تشدید زوج دیسک درهم بر حسب مقاومت اتصالی ۹۸
- شکل (۶-۲۳) امپدانس ورودی زوج دیسک وازگون منحنی ممتد سالم و خط چین اتصالی ۱۰۱
- شکل (۶-۲۴) منحنی اندازه تفاضل امپدانس زوج دیسک در حالت سالم و اتصال حلقه (۱ و ۲) ۱۰۲
- شکل (۶-۲۵) امپدانس ورودی سیم پیچ منحنی ممتد سالم و خط چین اتصال حلقه (۲-۱۴) و نقطه چین اتصال حلقه (۲۶-۲۷) ۱۰۴

- جدول (۱-۶) مقادیر محاسبه اندوکتانس خودی و متقابل زوج دیسک شکل (۲-۵) با استفاده از رابطه (۷-۵) و MATLAB ۵۲
- جدول (۲-۶) مقادیر مدل سازی شده اندوکتانس خودی و متقابل زوج دیسک شکل (۲-۵) در نرم افزار Maxwell SV ۵۳
- جدول (۳-۶) مقادیر اندوکتانس خودی و متقابل مدل سازی شده در نرم افزار Maxwell SV زوج دیسک شکل (۲-۵) که سطح مقطع هادی‌ها به $3mm \times 3mm$ کاهش یافته است ۵۳
- جدول (۴-۶) اندازه‌گیری خازن صفحه‌ای موازی با استفاده از نرم‌افزار و معادله تحلیلی (۵-۱۲) ۶۱
- جدول (۱-۶) ماتریس اندوکتانس یک زوج دیسک درهم ترانسفورماتور مدلسازی شده حاصل از مدلسازی با نرم‌افزار اجزاء محدود ۷۰
- جدول (۲-۶) ماتریس ظرفیت یک زوج دیسک درهم از ترانسفورماتور مذکور در بخش ۶-۱ ۷۳
- جدول (۳-۶) مقادیر مقاومت حلقه‌های زوج دیسک بخش ۶-۱ در فرکانس‌های مختلف ۶-۱ ۷۶
- جدول (۴-۶) مقادیر صفر و قطب زوج دیسک واژگون ۸۲
- جدول (۵-۶) مقادیر صفر و قطب زوج دیسک درهم ۸۴
- جدول (۶-۶) صفر و قطب‌های زوج دیسک واژگون در حالت اتصالی حلقه به حلقه ۹۰
- جدول (۷-۶) صفر و قطب‌های یک زوج دیسک درهم در حالت اتصالی حلقه به حلقه ۹۵

مقدمه

۱-۱ مقدمه

ترانسفورماتور یکی از مهمترین ادوات شبکه‌های انتقال و توزیع سیستم قدرت است که قابلیت اطمینان، کیفیت و هزینه انرژی تولیدی به سالم بودن آن بستگی دارد. به این دلیل پیشرفت روشهای تخمین عمر ترانسفورماتور در سالهای اخیر چشم‌گیر بوده است. هدف اصلی، این است که با کنترل عملکرد ترانسفورماتور، قبل از آن که دچار حادثه شود برای تعمیر یا جایگزینی آن برنامه‌ریزی شود تا قابلیت اطمینان سیستم افزایش یابد. معمولاً سیم‌پیچی ترانسفورماتور در اثر نیروهای ناشی از اتصال کوتاه‌های شدید یا در حمل آسیب می‌بیند. بعد از تغییر شکل سیم‌پیچ یا جابجایی هسته ترانسفورماتور، عایق سیم‌پیچ معیوب گردیده، به تبع تحمل عایق ترانسفورماتور در مقابل نیروهای اتصال کوتاه و اضافه ولتاژهای گذرا کم می‌شود. لذا احتمال رخ دادن اتصالی در آینده افزایش می‌یابد. اتصال حلقه در سیم‌پیچ به علت تماس دو حلقه در اثر نیروی جریانهای اتصال کوتاه، یا پوسیدگی عایق ناشی از اضافه بار و یا شکست عایق به دلیل اضافه ولتاژهای گذرا، اتفاق می‌افتد. اگر شدت اتصال حلقه زیاد باشد، خرابی سریع یا تدریجی سیم‌پیچ را در پی خواهد داشت. در شرایط خرابی سریع به دلیل عملکرد رله‌های حفاظتی ترانسفورماتور از مدار خارج می‌شود. جریان ناشی از اتصال حلقه به‌گونه‌ای است که در ناحیه عملکرد رله دیفرانسیل قرار نمی‌گیرد. خصوصاً اگر جریان ناشی از اتصالی کم باشد. تنها بعد از گسترش خطا که منجر به صدمه دیدن ترانسفورماتور می‌شود، اتصال حلقه توسط رله دیفرانسیل قابل تشخیص می‌باشد. پایین آوردن تنظیم رله نیز منجر به از دست دادن پایداری رله دیفرانسیل می‌گردد. یک روش مناسب جهت تست سالم بودن ترانسفورماتور، بررسی پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ می‌باشد. تشخیص تغییر شکل و اتصالی سیم‌پیچ و جابجایی سیم‌پیچ و هسته توسط این روش امکان‌پذیر است.

اساس این روش بدین صورت می‌باشد هرگونه تغییر در ساختار هندسی یا الکتریکی ترانسفورماتور، بر پاسخ فرکانسی آن اثر می‌گذارد و تفاوت آن با پاسخ فرکانسی ترانس سالم یا سیم‌پیچ فازهای دیگر یا اطلاعات کارخانه سازنده، نشان دهنده معیوب بودن سیم‌پیچ ترانسفورماتور است. این روش قبل از اتصالی حلقه، می‌تواند وقوع آن را پیش‌بینی کند [۱۷] و [۲۱].

۱-۲ تاریخچه پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ

در سال ۱۹۶۰، W. Lech & L. Tyminski نشان داد که با اعمال ولتاژ ضربه با دامنه کم به ورودی سیم‌پیچ و نمونه‌برداری از شکل موج ضربه در نقاط مختلف آن، تغییر شکل مکانیکی ایجاد شده در سیم‌پیچ را تشخیص دادند. در سال ۱۹۶۶، نتایج بررسیهای Lech و Tyminski در مورد تشخیص تغییر شکل سیم‌پیچ با روش اعمال ولتاژ ضربه فشار ضعیف، در کشور انگلستان به چاپ رسید. در سال ۱۹۷۶، روش مطالعه پاسخ ترانسفورماتور با اعمال ولتاژ ضربه فشار ضعیف در حوزه فرکانس توسط A.G. Richenbacher مطرح شد.

در سال ۱۹۷۸، مقاله‌ای با عنوان "بررسی پاسخ فرکانسی به عنوان روشی برای تست و عیب‌یابی" توسط E.P. Dick و C.C. Erven منتشر گردید. در همان سال روش مذکور در شرکت Ontario Hydro به کار گرفته شد. تستهای انجام شده توسط شرکتهای اروپایی در سال ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۰ نشان از موفقیت‌آمیز بودن این روش بود. تاکنون مقالات زیادی در تأیید این روش و همچنین توسعه آن منتشر شده است [۱۵] و [۴۱] و [۴۶].

اخیراً سازندگان در مراحل کنترل و تست ترانسفورماتورهای قدرت، اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی را هم لحاظ کرده‌اند، که به عنوان اثر انگشت (fingerprint) ترانسفورماتور از آن یاد می‌شود. تا قبل و بعد از حمل ترانسفورماتور یا بعد از اتصالیهای شدید در شبکه، با اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی از سلامت آن

مطمئن شوند. ثابت شده است پاسخ فرکانسی ترانسفورماتورهایی که از نظر طراحی یکسان هستند (sister unit)، مشابه می‌باشد. مسئله لزوم مقایسه بین نتایج پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور موردنظر با یک مرجع مطمئن، همچنین لزوم مشابه بودن روشهای اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی با مرجع، می‌تواند به عنوان معایب این روش ذکر گردد. اشکال دیگر این روش ناتوانی در ارائه یک روش تحلیلی جهت تحلیل تفاوت بین پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده و مرجع در شرایط خطا و شبه‌خطا است.

هدف از انجام این پروژه، بررسی اثر اتصال کوتاه حلقه بر پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ ترانسفورماتور می‌باشد. بدین منظور با استفاده از مدل مشروح سیم‌پیچ، رفتار ترانسفورماتور را در حوزه فرکانسی (FRA) مدل‌سازی می‌کنیم. با توجه به اینکه اتصال حلقه در بین حلقه‌های یک دیسک محتمل است، برای یافتن الگوی تغییرات پاسخ فرکانسی، ابتدا زوج دیسکهای نوع درهم و واژگون را مدل‌سازی کرده و سپس با ایجاد اتصال حلقه در آن، تغییرات ایجاد شده در پاسخ فرکانسی را بررسی می‌کنیم. سپس با مدل‌سازی اتصال حلقه در سیم‌پیچ ترانسفورماتور، تغییرات پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ مورد مطالعه قرار گرفته است. در فصل دوم، توزیع ولتاژ روی سیم‌پیچ در هنگام برخورد یک موج به ورودی ترانسفورماتور با استفاده از تئوری امواج ساکن و سیار و حالت دائم سینوسی بررسی می‌شود. در پایان رفتار هسته در فرکانسهای مختلف بررسی می‌گردد. در فصل سوم، انواع سیم‌پیچهای مورد استفاده در ترانسفورماتورها بیان می‌گردد. در فصل چهارم، انواع روشهای مدل‌سازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور معرفی می‌گردد و مدل مشروح را جهت انجام مدل‌سازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور انتخاب می‌کنیم. در فصل پنجم، پارامترهای مداری سیم‌پیچ با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود محاسبه و جوابهای آن با روشهای تحلیلی معمول مقایسه می‌شود. در فصل ششم، زوج دیسکهای درهم و واژگون مدل‌سازی می‌شوند و تأثیر اتصال حلقه را بر پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ بررسی می‌کنیم. فصل پایانی به نتیجه‌گیری و پیشنهاد جهت تعریف پروژه‌های جدید اختصاص دارد.

بررسی رفتار سیم‌پیچ همگن

۱-۲ مقدمه

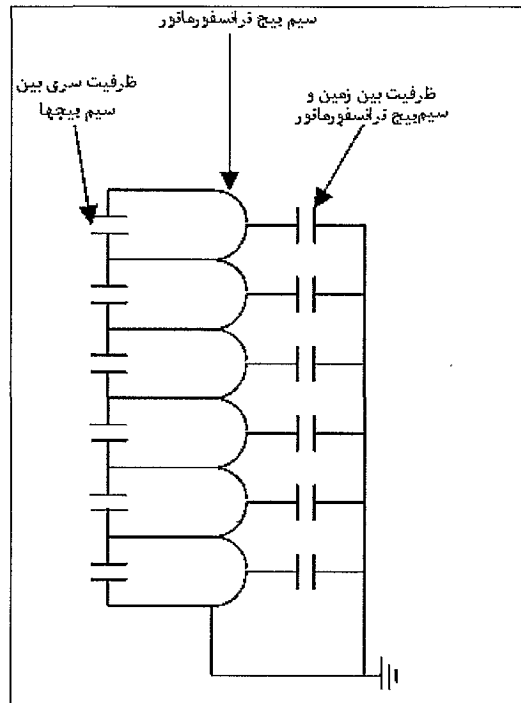
تقریباً در ابتدای قرن بیستم مشخص شد رفتار سیم‌پیچ ترانسفورماتورها و ماشین‌های گردان در مقابل امواج ضربه و کلیدزنی با عکس‌العمل سیم‌پیچ در فرکانس قدرت متفاوت می‌باشد. ترانسفورماتورها، راکتورها و ماشین‌های الکتریکی رفتار پیچیده‌ای در مقابل ولتاژهای گذرا با بالاروندگی سریع^۱ از خود نشان داده و گاهی اوقات در برابر اضافه ولتاژهای کمتر از مقدار BIL منظور شده در طراحی تجهیزات، نمی‌توانند مقاومت کنند. بنابراین فهم رفتار آنها در حالت گذرا به منظور بررسی توزیع ولتاژ سودمند خواهد بود. سیم‌پیچ فشارقوی ترانسفورماتورهای قدرت معمولاً ناهمگن بوده، چرا که سازندگان با ایجاد ناهمگنی عمدی، سعی دارند توزیع ولتاژ بر روی سیم‌پیچ را در لحظه ورود یک موج ضربه به داخل ترانسفورماتور، بهبود بخشند. در این فصل فرض بر همگن بودن سیم‌پیچ می‌باشد. زیرا تحلیل روابط به دست آمده را ساده‌تر کرده و دیدگاه مناسبی جهت بررسی حالات گذرا در سیم‌پیچ ارائه می‌دهد.

۲-۲ رفتار ترانسفورماتور در حالت گذرا

در حالت گذرا ظرفیتهای موجود بین سیم‌پیچهای ترانسفورماتور و قسمتهای زمین شده (هسته و تانک و غیره)، داخل هر سیم‌پیچی یعنی بین دیسکها، دورها، لایه‌ها و بین تک‌تک سیم‌پیچها مهم می‌باشد. به علت وجود این ظرفیتهای توزیع اضافه ولتاژها در لحظه برخورد موج به سیم‌پیچ در طول سیم‌پیچ ترانسفورماتور یکنواخت نخواهد شد. مدل ریاضی ساده شده سیم‌پیچ ترانسفورماتور متشکل از خازن و اندوکتانس در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. در فرکانس قدرت ولتاژ اعمالی به دو سر سیم‌پیچ بین

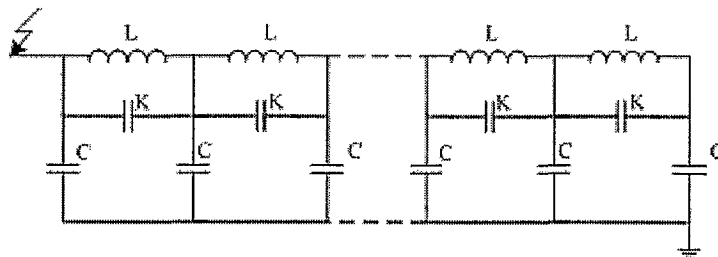
^۱Fast Rising Transient

حلقه‌های آن به طور خطی تقسیم می‌شود و تمام حلقه‌ها به یک نسبت تحت تنش قرار می‌گیرند؛ در حالی که در هنگام برخورد امواج ضربه به علت وجود ظرفیتهای طولی و عرضی سیم‌پیچ، سیستم رفتار نوسانی از خود نشان داده و گرادیان ولتاژ روی حلقه‌ها ثابت نخواهد بود.



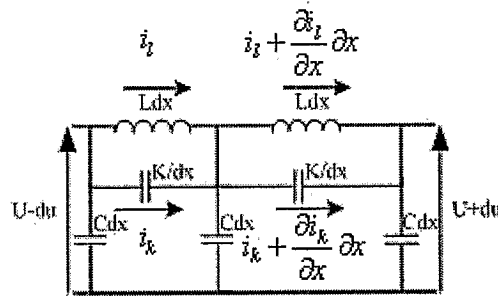
شکل (۱-۲) سیم‌پیچ تک لایه ترانسفورماتور و ظرفیتهای سری و موازی

در شکل (۱-۲) از اندوکتانسهای متقابل ما بین حلقه‌ها و اثرات میرایی مقاومتها صرفه‌نظر شده است و تمامی اندوکتانسها و ظرفیتهای یکسان در نظر گرفته شده است. در شکل (۲-۲) مدل ساده‌تر شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲) مدل ریاضی ساده شده یک لایه از سیم‌پیچی ترانسفورماتور

در شکل (۳-۲) یک جزء دیفرانسیلی از سیم‌پیچ ترانسفورماتور نشان داده شده است. اندوکتانس واحد طول با L (هانری بر متر)، ظرفیت موازی با C (فاراد بر متر) و ظرفیت سری با K (فاراد متر) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲) مدار معادل ریاضی یک جزء دیفرانسیلی

معادلات دیفرانسیل توصیف کننده حالت گذرا در هنگام برخورد موج به سیم‌پیچ در زیر بیان شده‌اند.

$$\frac{\partial i_l}{\partial x} + \frac{\partial i_k}{\partial x} = -C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (۱-۲)$$

$$i_k = -K \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (۲-۲)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i_l}{\partial t}$$

ولتاژها و جریانهای ظاهر شده در روابط فوق توابعی از زمان و مکان هستند. با حذف کردن جریانه‌ها، می‌توان معادلات فوق را به یک معادله مرتبه چهارم برحسب متغیر ولتاژ تبدیل نمود.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (۳-۲)$$

با استفاده از معادله دیفرانسیل فوق، می‌توان فرآیند گذرا را به وسیله هر دو تئوری موج ساکن و موج سیار توصیف نمود. مطابق با تئوری موج ساکن، امواج ساکن داری فرکانس زمانی $\omega/2\pi$ و فرکانس مکانی $\gamma/2\pi$ می‌باشند.

بین فرکانسهای زاویه‌ای زمانی ω و مکانی γ روابط زیر حاکم هستند.

$$\omega = \gamma / \sqrt{LC(1 + K\gamma^2 / C)} \quad (۴-۲)$$

$$\gamma = \sqrt{LC\omega^2 / (1 - \omega^2 LK)} \quad (5-2)$$

بنابراین برای هر فرکانس مکانی γ یک فرکانس زمانی ω وجود دارد و با افزایش γ مقدار ω نیز افزایش می‌یابد. وقتی که γ به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، فرکانس زمانی بحرانی سیم‌پیچی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\omega_{cr} = 1/\sqrt{LK} \quad (6-2)$$

ω_{cr} بیشترین فرکانس زاویه‌ای زمانی، است که سیم‌پیچی می‌تواند با آن نوسان نماید. مطابق با تئوری امواج سیار، سرعت انتشار این موج برابر است با:

$$V = \frac{\omega}{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{K}{C}\omega^2} \quad (7-2)$$

طبق رابطه (۷-۲) امواج با فرکانس بالا از سرعت انتشار پایین‌تری برخوردار می‌باشند. امواج با فرکانس زاویه‌ای $\omega \geq \omega_{cr}$ در سیم‌پیچ منتشر نمی‌شوند، چنین امواجی قادر به نفوذ در درون سیم‌پیچ نیستند. بنابراین سیم‌پیچ شبیه به یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌نماید که فقط به فرکانس‌های $\omega \leq \omega_{cr}$ اجازه عبور می‌دهد [۱].

۱-۲-۲ تعیین توزیع ولتاژ در طول سیم‌پیچ در حالت اولیه و نهایی

برای بررسی نحوه توزیع ولتاژ در طول سیم‌پیچ به یک سر سیم‌پیچ ولتاژ پله‌ای u اعمال می‌شود و انتهای دیگر سیم‌پیچ زمین می‌گردد. با اعمال ولتاژ، توزیع اولیه در طول سیم‌پیچ بلافاصله ایجاد خواهد شد. از طرفی توزیع نهایی ولتاژ، توسط اندوکتانس سیم‌پیچ مشخص می‌شود. از آنجائی که سیستم شامل خازن و اندوکتانس می‌باشد، توزیع اولیه و نهایی ولتاژ در طول سیم‌پیچ با هم یکسان نیست، لذا گذر از حالت اولیه به حالت نهایی یک فرآیند نوسانی می‌باشد. این نوسانات ولتاژ به وسیله مقاومت سیم‌پیچ میرا می‌گردد. از این اثر در محاسبات زیر چشم پوشی شده است.