وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی و حفاظت ترانسفورمر جهت جداسازی عیوب داخلی و جریان هجومی آن

استاد راهنما:

آقای دکتر مشگین کلک

استاد مشاور:

آقای دکتر پیشوایی

دانشجو:

مرتضی معتضدیان

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی و حفاظت ترانسفورمر جهت جداسازی عیوب داخلی و جریان هجومی آن

استاد راهنمای اول:

آقای دکتر مشگین کلک

استاد راهنمای دوم:

آقای دکتر پیشوایی

دانشجو:

مرتضی معتضدیان

۱۳۹۰

تاریخ : ۱۳۹۰/۷/۳۰
شماره : ۵۵۲۹/۱۸۰۵۰۷
پیوست : .....

دانشگاه تفرش

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی : مرتضی معتضدیان شماره دانشجویی : ۸۷۲۱۲۱۰۱۰ دانشکده : مهندسی برق

رشته تحصیلی/گرایش : مهندسی برق/ قدرت

عنوان پروژه : مدلسازی و حفاظت ترانسفورمر سه فاز جهت جدا سازی عیوب داخلی و جریان هجـومی آن

تعداد واحد : ۶ تاریخ تصویب : ۸۸/۱۲/۱۰ تاریخ دفاع : ۹۰/۰۶/۳۱

نمره نهایی : به عدد : ۱۷ به حروف : هفده

هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	محل اشتغال	امضاء
استاد راهنمای اول	دکتر همایون مشگین کلک	استادیار	دانشگاه تفرش	
استاد راهنمای دوم	دکتر مجتبی پیشوایی	استادیار	دانشگاه تفرش	
داور خارجی	دکتر عارف درودی	استادیار	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	
داور داخلی	دکتر مهدی اره پناهی	استادیار	دانشگاه تفرش	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی اره پناهی	استادیار	دانشگاه تفرش	

دانشگاه تفرش دانشکده مهندسی برق

رئیس دانشکده : دکتر علی مددی

امضاء :

تاریخ :

مهـر :

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر حمید رضا دهقانپور

امضاء :

تاریخ :

مهـر :

دانشگاه تفرش اداره کل تحصیلات تکمیلی

تقدیم به

پدرم و مادر عزیزم که از لحظه ای که حیات دمیده شد، در مسیر پر پیچ و خم زندگی همواره در کنارم بودند و لحظه ای مرا تنها مگذاشتند.

و تقدیم به

همسرم که در تمامی مراحل تحقیق، همواره مشوقم بود.

تقدیر و تشکر

از استاد عزیزم، جناب آقای دکتر مشگین کلک به خاطر انتخاب مناسب موضوع و زحمات فراوان در مراحل مختلف انجام پایان نامه و جناب آقای دکتر پیشوایی به خاطر مشاوره های هوشمندانه، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

تعییین نوع جریان خطا در ترانسفورمر و تفکیک بین جریان هجومی و جریانهای خطا یکی از مهمترین مسائل در عملکرد رله های دیفرانسیل ترانسفورمر می باشد. اهمیت این مسئله در شباهت جریان اتصال کوتاه و جریان هجومی است که سبب ایجاد اختلال در عملکرد صحیح ترانسفورمر می گردد.در این پژوهش ابتدا" یک ترانسفورمر جهت اعمال انواع خطاها طراحی شد. ترانسفورمر سه فاز ۱۲۵MVA و با نسبت تبدیل ۱۳۲/۶۳ KV طراحی شد.

سپس از نرم افزار Ansoft Maxwell به منظور شبیه سازی ها استفاده گردید و یک مدل مناسب در این نرم افزار پیاده سازی شد. این مدل طوری پیاده سازی گردید تا قابلیت ایجاد خطاهایی از ۱۰ تا ۹۰ درصد با پله ۱۰ درصد را داشته باشد. در این مدل خطاهای اتصال کوتاه داخلی سیم پیچ در طرف اولیه و ثانویه، خطاهای اتصال کوتاه سیم پیچ به بدنه در طرف اولیه و ثانویه و همچنین جریان هجومی در زوایای ولتاژ مختلف شبیه سازی گردید.

به منظور جداسازی جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه، از تکنیک فوریه سریع کوتاه شده استفاده گردید و مولفه هارمونیکی دوم مورد تحلیل قرار گرفت. با توجه به اینکه جداسازی جریان هجومی از اتصال کوتاه در زوایای ۳۰ تا ۵۰ کمی سخت بوده و الگوی دو جریان شباهت زیادی به یکدیگر داشتند نیاز به بررسی شیب آنها بوده است. با بررسی شیب دوم، دو جریان، تمایز آنها مشخص گردید و قابل تفکیک شدند.

در تعیین نوع خطا از تکنیک تبدیل موجک استفاده شده است . در تبدیل موجک نیز تابع پایه Db4 استفاده گردید. با توجه به تفکیک دو نوع خطا (داخلی سیم پیچ و سیم پیچ به بدنه) در دو سمت اولیه و ثانویه بایستی ۴ فاکتور مختلف در نظر گرفته می شد. لذا ابتدا محل خطا (اولیه یا ثانویه) بررسی گردید و سپس نوع خطا تعیین گردید. در تعیین خطای بدنه، مولفه صفر بررسی شد.

کلمات کلیدی : ترانسفورمر قدرت، Ansoft Maxwell، جریان خطا، جریان هجومی، رله دیفرانسیل، هارمونیک دوم، تبدیل موجک، تبدیل فوریه سریع کوتاه شده ، شبکه عصبی،

فهرست مطالب

عنوان

فصل اول : پیشگفتار

مقدمه ۳

مروری بر کارهای گذشته ۲

هدف ۳

فصل بندی پروژه ۳

فصل دوم : اصول طراحی ترانسفورمر

مقدمه ۴

۲-۱ بدست آوردن سطح مقطع ستون هسته ۴

۲-۱-۱ انتخاب چگالی جریان در هادی‌ها ۶

۲-۲ بدست آوردن ابعاد پنجره هسته ۱۰

۲-۳ محاسبه ابعاد پله‌های سطح مقطع هسته ترانسفورماتور ۱۲

۲-۴ محاسبه اندوکتانس پراکندگی ترانسفورماتور ۱۴

۲-۵ بررسی تاثیر عوامل مختلف بر ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور ۱۸

۲-۵-۱ تاثیر حجم و ابعاد سیم‌پیچ‌ها و کانال بین آن‌ها ۱۹

۲-۵-۲ تاثیر نوع سیم‌پیچی بر ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور ۲۰

۲-۵-۴ تاثیر فواصل هوایی موجود در هسته و نحوه برش و چیدن قطعات آن بر روی ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور ۲۱

۲-۵-۵ تاثیر مسیر بسته شدن خطوط فوران پراکندگی ۲۱

۲-۵-۶ تاثیر جنس آهن مورد استفاده در هسته ۲۲

فصل سوم : معرفی نرم افزار شبیه سازی و مدلسازی ترانسفورمر

مقدمه ۲۷

۳-۱ معرفی نرم‌افزار ۲۷
۳-۲ آنالیز مگنواستاتیک ۲۹
۳-۲-۱ تبیین مدل ۲۹
۳-۲-۲ انتخاب نوع آنالیز ۲۹
۳-۲-۳ تبیین پارامترهای مدل ۳۰
۳-۲-۴ نتایج ۳۰
۳-۳ حالت گذرا ۳۲
۳-۳-۱ تبیین مدل ۳۲
۳-۳-۲ تبیین پارامترهای مدل ۳۲
۳-۳-۳ نتایج ۳۳

فصل چهارم : معرفی تبدیل موجک

مقدمه ۳۷
۴-۱ آنالیز چندرزولوشنه ۳۸
۴-۲ تبدیل ویولت یک بعدی ۳۸
۴-۲-۱ تبدیل ویولت پیوسته ۳۸
۴-۲-۲ رزولوشن در صفحه زمان فرکانس ۴۰
۴-۲-۳ روابط ریاضی تبدیل ویولت ۴۲
۴-۳ گسسته‌سازی تبدیل ویولت پیوسته ۴۳
۴-۴ تبدیل ویولت گسسته ۴۵
۴-۵ توابع پایه موجک ۴۷
۴-۵-۱ تابع پایه Daubechies ۴۷
۴-۵-۲ تابع پایه Coiflet ۴۹

فصل پنجم : بررسی نتایج شبیه سازی

مقدمه ۵۰

۵-۱ جداسازی جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه ۵۰

۵-۱-۱ روشهای مورد بررسی ۵۱

۵-۱-۱-۱ بررسی دامنه مولفه های هارمونیکی ۵۲

۵-۱-۱-۲ بررسی دامنه شیب مولفه های هارمونیکی ۵۵

۵-۱-۱-۳ بررسی دامنه شیب متوسط دوم مولفه های هارمونیکی ۵۶

۵-۲ جداسازی نوع خطاهای داخلی ترانسفورمر ۵۹

۵-۲-۱ الگوریتم تصمیم‌گیری شبکه عصبی ۶۴

۶-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی ۶۷

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات

نتیجه گیری ۷۳

پیشنهادات ۷۳

فهرست اشکال

عنوان

شکل ۲-۱: سطح مقطع هسته ترانسفورماتور ۱۳
شکل ۲-۲ برش مقطعی شماتیک قسمت فعال یک ترانسفورماتور معمولی با هسته زرهی[..... ۱۴
شکل ۲-۳: تغییرات آمپر دور ایجاد کننده فوران پراکندگی در امتداد شعاع سیم‌پیچ ۱۵
شکل ۳-۱ : نمایی از نرم افزار MAXWELL ۲۸
شکل ۳-۲ : مش بندی حاصل از شبیه سازی مگنواستاتیک ۳۱
شکل ۳-۳ : نحوه دسته بندی کویل ها و سیم پیچ ها ۳۲
شکل ۳-۴ : نمایی از مدار خارجی ۳۳
شکل ۳-۵ : خطاهای پیش آمده در اتصال کوتاه فاز اولیه به بدنه ۳۵
شکل ۳-۶ : خطاهای پیش آمده در اتصال کوتاه داخلی یک فاز اولیه ۳۵
شکل ۳-۷ : خطاهای پیش آمده در اتصال کوتاه فاز ثانویه به بدنه ۳۵
شکل ۳-۸ : خطاهای پیش آمده در اتصال کوتاه داخلی یک فاز ثانویه ۳۶
شکل ۴-۱ الف) تابع اصلی مورد استفاده جهت تبدیل موجک ب) تابع مورلت استفاده شده در تبدیل موجک شکل... ۳۷
شکل ۴-۲ نمایش ۳ بعدی تبدیل ویولت پیوسته سیگنال‌ها با استفاده از ویولت مادر DB۸. (الف) سیگنال اصلی (ب) تبدیل ویولت سیگنال ایستا، (ج) تبدیل ویولت سیگنال ناایستا. ۴۰
شکل ۴-۳ نمایش رزولوشن در صفحات مختلف. (الف) صفحه زمان، (ب) صفحه فرکانس، (ج) صفحه زمان-فرکانس در تبدیل فوریه زمان-کوتاه، (د) صفحه زمان-فرکانس در تبدیل ویولت. ۴۱
شکل ۴-۴ محل ویولت‌ها به هنگام گسسته کردن بر روی درجه بندی دودویی. ۴۴
شکل ۴-۵ نمایش نحوه محاسبه تبدیل ویولت گسسته ۳ مرحله‌ای با استفاده از ایده بانک فیلتر برای یک سیگنال دلخواه. ۴۶
شکل ۵-۷ : شکل موج شیب اول مولفه فرکانسی فرکانسی دوم نرمالیزه جریان اتصال کوتاه و جریان هجومی در زاویه صفر و زمان صفر ثانیه ۵۶
شکل ۵-۸ : شکل موج شیب دوم مولفه فرکانسی فرکانسی دوم نرمالیزه جریان اتصال کوتاه و جریان هجومی در زاویه صفر و زمان صفر ثانیه ۵۷
شکل ۵-۹ : فلوچارت مربوط به الگوریتم پیشنهادی تشخیص ۵۹
شکل ۵-۱۰ نحوه رخداد خطای داخلی در ترانسفورماتور(سمت راست خطای سیم‌پیچی، سمت چپ خطای داخلی سیم‌پیچی) ۶۰
شکل ۵-۱۱ تبدیل موجک جریان دیفرانسیلی در فاز A با خطا داخلی سیم پیچ ثانویه ۶۱
شکل ۵-۱۲ تبدیل موجک جریان دیفرانسیلی در فاز A با خطا داخلی سیم پیچ به بدنه ثانویه ۶۲
شکل ۵-۱۳ شبکه عصبی پس‌انتشار خطا با لایه مخفی ۶۵

فهرست جداول

عنوان

جدول ۲-۱: ضریب فضای مس در پنجره هسته ترانسفورماتور ۱۲
جدول ۲-۲: ضریب فضای هسته و پهنای پله‌ها بر حسب قطر دایره محیطی هسته برای تعداد پله‌های مختلف ۱۴
جدول ۵-۱ : مشخصات مربوط به سطوح فرکانسی تبدیل موجک گسسته ۵۸
جدول ۵-۲ ضرایب حاصل از تبدیل موجک / ورودی شبکه عصبی ۶۴
جدول ۵-۳ الگوی خروجی شبکه عصبی برای انواع مختلف خطاهای داخل ۶۸

فصل اول :

پیشگفتار

مقدمه

ترانسفورماتورها از مهم‌ترین و ارزشمندترین ادوات موجود در سیستم‌های قدرت الکتریکی بوده و نقش تعیین کننده‌ای در عملکرد آن‌ها دارند. عملکرد صحیح و مداوم آن‌ها اثر غیرقابل انکاری بر عملکرد صحیح مجموعه خواهد داشت. در این راستا و بسته به اهمیت موضوع از ترانسفورماتورهای پشتیبان، جهت افزایش قابلیت اطمینان در عملکرد سیستم قدرت استفاده می‌شود. در مواردی که ترانسفورماتورهای قدرت به‌صورت یک‌پارچه بوده و فاقد ساختار بانکی هستند ایجاد چنین واحدهای پشتیبانی مقرون به صرفه نیست. در این شرایط چاره‌ای جز افزایش دقت در بهره‌برداری و هم‌چنین اعمال سرویس‌های دوره‌ای باقی نمی‌ماند که البته موارد گفته شده تضمینی برای جلوگیری از بروز مشکل نخواهد بود.

در صورتی‌که به هر دلیلی ترانسفورماتور از مدار خارج شود، جهت تغذیه بارهایی که توسط این ترانسفورماتور تامین می‌شدند باید از مسیرهای جایگزین استفاده کرد، در غیر این‌صورت بارهای مذکور بی‌برق خواهند ماند. مسیرهای جایگزین تنها راه‌حلی کوتاه مدت بوده و منجر به کاهش قابلیت اطمینان در کارایی سیستم قدرت خواهد بود. بنابراین مهم‌ترین مسئله‌ای که عملا در شرایط یادشده مدنظر قرار می‌گیرد سعی و اهتمام در تعمیر سریع و البته صحیح ترانسفورماتور و بازگرداندن آن به مجموعه است. این امر مستلزم آن است که به سرعت عیب‌یابی صورت پذیرد. لذا بایستی بتوان سریعا محل بروزخطا را در داخل ترانسفورمر تشخیص داد.

در این پروژه سعی شده است که تفکیک خطا اتصال کوتاه از جریان هجومی به منظور جلوگیری از خارج شدن نابجا ترانسفورماتور از مدار به‌طور کامل انجام شود. این امر نیازمند ایجاد الگوریتمی به منظور تشخیص خطای اتصال کوتاه داخلی ترانسفورمر و تفکیک آن از جریان هجومی در رله دیفرانسیل می‌باشد.

جریان هجومی در ترانسفورماتورها در اصل از اشباع بیش از حد هسته آهنی در زمان سوئیچینگ ترانسفورماتور ناشی می‌شود. دامنه این جریان‌ها زیاد بوده و دارای مولفه DC قابل توجه هستند. زمانی‌که هسته به اشباع می‌رسد، این جریان‌ها دارای هارمونیک‌های زیاد می‌باشد. جریان مذکور در مدت زمان برق‌دار شدن ترانسفورماتور ایجاد شده و اثرات نامطلوبی بر روی آن دارد[۱]. عامل ایجاد جریان هجومی ولتاژی که به اولیه اعمال می‌شود، معرفی شده است. این ولتاژ در بدترین وضعیت، شار را ملزم می‌کند تا به ماکزیمم مقدار تئوری خود، یعنی دو برابر شار حالت دائمی به علاوه شار پسماند، افزایش یابد. لذا ترانسفورماتور به شدت اشباع شده و حجم زیادی از جریان را ایجاد می‌کند[۲]. از آن‌جا که جریان در یک مدت کوتاه ایجاد می‌شود تاثیرهای مخربی بر روی ترانسفورماتور ندارد با این وجود ممکن است وسایلی که از ترانسفورماتور در مقابل اضافه بار محافظت می‌کنند عمل ناصحیحی داشته و به علت تشابه جریان هجومی به جریان اتصال کوتاه، ترانسفورماتور را از مدار خارج کنند.

مروری بر کارهای گذشته

حفاظت از ترانسفورماتور یکی از مسائل چالش برانگیز در رله‌های حفاظتی است. حفاظت ترانسفورمرها باید سریع و دقیق باشد برای این منظور از رله‌های دیفرانسیلی استفاده می‌شود. رله دیفرانسیل با مقایسه جریان اولیه و ثانویه قادر به تشخیص خطاهای داخلی می‌باشد. این تشخیص فقط در حد اعلام خطا بوده و توانایی تشخیص نوع خطا داخلی را ندارد. عواملی هم‌چون جریان مغناطیسی، اضافه تحریک، عدم تطابق و اشباع جریان‌های ترانسفورماتور عملکرد رله‌ها را دچار اغتشاش می‌کند[۳].

شرایط غیرخطی توسط مجموعه محتویات هارمونیکی که در سیگنال‌های جریان می‌تواند برای جلوگیری از عملکرد نامطلوب رله به‌کار رود، مشخص می‌شود[۴][۵][۶][۷]. هم‌چنین می‌توان برای افزایش قابلیت اطمینان حفاظت دیفرانسیل از روش‌هایی که در آن‌ها علاوه بر سیگنال جریان، سیگنال ولتاژ نیز به‌کار گرفته می‌شود، استفاده کرد[۸]. در [۹] از روش توان تفاضلی برای تشخیص خطا از جریان هجومی استفاده شده است. در [۱۰] روشی برای تشخیص جریان خطا از جریان هجومی بر اساس تبدیل مودال شکل موج‌های ولتاژ و جریان پیشنهاد شده است.

هزینه افزایش قابلیت اطمینان حفاظت دیفرانسیل توسط این روش‌ها، لزوم به‌کارگیری ترانسفورماتورهای ولتاژ را علاوه بر ترانسفورماتورهای جریان را مشخص می‌کند. دسته‌ای دیگر از روش‌ها، خطا را بر اساس اعوجاج شکل موج‌های جریان تفاضلی تشخیص می‌دهند. با توجه به این‌که فاصله بین پیک‌های متوالی در حالت جریان هجومی کمتر از جریان خطاست، یکی از روش‌ها بر اساس اندازه‌گیری مدت زمان بین پیک‌های متوالی جریان عمل می‌کند[۱۱]. روش‌های دیگری نیز برای دسته‌بندی در حفاظت ترانسفورماتور پیشنهاد و توسعه داده شده‌اند. شناسایی با استفاده از شبکه‌های عصبی[۱]، منطق فازی[۲]، شبکه‌های عصبی- فازی[۳] و اندوکتانس ترانسفورماتور در طول اشباع هسته از این قبیل روش‌ها هستند[۱۲] [۱۳][۱۴][۱۵] [۱۶][۱۷].

در سال‌های گذشته تحقیقات وسیعی بر روی تبدیل موجک صورت گرفته است. مزایای استفاده از این تبدیل باعث افزایش چشمگیر کاربرد این تبدیل شده است. آنالیز تبدیل موجک علاوه بر ویژگی‌های فرکانسی (همانند آنالیز تبدیل فوریه)، ویژگی‌های زمانی سیگنال را نیز نشان می‌دهد و این یکی از اصلی‌ترین دلایل ترجیح تبدیل موجک به آنالیز فوریه برای مطالعه سیگنال‌های گذرا ایده‌آل است. با توجه به اهمیت این خصوصیت در آنالیز سیگنال‌ها از این روش در جداسازی خطاهای داخلی ترانسفورماتور از جریان هجومی استفاده گسترده‌ای شده است[۱۸][۱۹][۲۰][۲۱][۲۲][۲۳]. با این وجود کمتر مقاله‌ای به جداسازی خطاهای داخلی ترانسفورماتور نیز پرداخته است.

[1] Neural Network
[2] Fuzzy Logic
[3] ANFIS

هدف

در این پروژه هدف جداسازی جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی ترانسفورمر و سپس تفکیک نوع خطای اتصال کوتاه داخلی ترانسفورمر است.

البته بیش‌تر بر روی جداسازی خطاهای داخلی ترانسفورماتور تاکید گردیده است. در این صورت می‌توان به هنگام بروز خطا در ترانسفورماتور محل بروز خطا را به صورت تعیین و درصدد رفع آن برآمد. در تمامی مقالاتی که تا کنون به آن‌ها اشاره شده، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار EMTP صورت پذیرفته است که در این پروژه از نرم‌افزار Ansoft Maxwell که نرم‌افزار محاسبات اجزا محدود است، استفاده شده است. به منظور جداسازی جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور تبدیل فوریه کوتاه شده به منظور شناسایی الگو استفاده گردیده است. در ادامه به منظور جداسازی جریان‌های خطای داخلی پس از تفکیک به کمک تبدیل موجک از یک شبکه عصبی استفاده گردیده است.

فصل بندی پروژه

این پروژه در شش فصل تنظیم شده است. در فصل دوم، روش طراحی ترانسفورماتور مورد استفاده در این پروژه ارائه گردیده است. در فصل سوم به معرفی نرم‌افزار مورد استفاده در این پروژه در روش مدل کردن و لحاظ پارامترهای ترانسفورماتور پرداخته شده است. هم‌چنین شبیه‌سازی خطاها بر روی ترانسفورماتور نیز در این فصل ارائه گردیده است. در فصل چهارم به بررسی تبدیل موجک و انواع توابع آن پرداخته شده است و بیشتر به توابع پایه مورد استفاده در این پروژه توجه گردیده است. در فصل پنجم به بررسی شبیه‌سازی‌ها و معرفی الگوریتم‌های جداسازی خطاهای داخلی و جریان‌های هجومی ترانسفورماتور پرداخته شده است. در فصل آخر نیز به نتیجه گیری و ارائه پیشنهاداتی در ادامه این پروژه پرداخته خواهد شد.

فصل دوم :

اصول طراحی ترانسفورماتور

مقدمه

داده‌های طراحی معمولا عبارت از : قدرت ظاهری نامی، ولتاژهای نامی اولیه و ثانویه، ضریب قدرت نامی بار، درصد ولتاژ اتصال کوتاه، بازده فرکانس و حداکثر قیمت تمام شده است. با توجه به این داده‌ها و فرض کردن یا به‌دست آوردن پارامترهای طراحی از قبیل ولت بر دور، چگالی فوران بیشینه در هسته، ضریب فضای مقطع هسته، ضریب فضای مس در پنجره هسته، چگالی جریان در سیم‌پیچها، نسبت بین ارتفاع و عرض پنجره‌های هسته، نوع خنک‌کنندگی مورد نظر برای ترانسفورماتور، نوع هسته و نوع سیم‌پیچ و انجام محاسبات ضروری، ابعاد و مشخصات قسمت‌های مختلف هسته، سیم‌پیچ‌ها، سیستم خنک‌کننده، تانک، بوشینگ و ملحقات ترانسفورماتور به‌دست آورده می‌شوند.

طراحی معمولا از تعیین سطح مقطع هسته آغاز گردیده و با تعیین ابعاد پنجره، به تعیین سطح مقطع و تعداد دور هادی‌های سیم‌پیچ و تعیین سایر مشخصات ترانسفورماتور می‌انجامد.

۲-۱ بدست آوردن سطح مقطع ستون هسته

بحث طراحی هسته از رابطه بین ولتاژ و اندوکسیون آغاز می‌شود:

$$V_1 = 4.44\, N_1 A_{fe} f B_{max} \quad (۱-۲)$$

اگر طراحی یک ترانسفورماتور تک‌فاز مد نظر باشد، I_1 جریان نامی سیم‌پیچ اولیه و V_1 ولتاژ نامی مورد نظر برای آن می‌باشد. در این‌صورت S یا همان قدرت نامی ترانسفورماتور از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$S = I_1V_1 = 4.44\, N_1I_1A_{fe}fB_{max} \quad (۲-۲)$$

در این رابطه A_{fe} سطح مقطع آهن هسته است:

$$\Rightarrow A_{fe} = \frac{S}{4.44\, N_1I_1fB_{max}} \quad (۳-۲)$$

در این رابطه مقادیر فرکانس f و جریان I_1 جز داده‌های مساله به‌شمار آمده و معلوم می‌باشند. B_{max} نیز با توجه به نوع آهنی که برای ساختن هسته مورد استفاده قرار می‌گیرد و هم‌چنین نوع ترانسفورماتور در دست طراحی، تعیین می‌شود. برای مثال، برای آهن‌های گرم نورد شده، که امروزه در ساختن ترانسفورماتورهای کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرند، B_{max} بین ۱/۲ تا ۱/۴ تسلا در نظر گرفته می‌شود. اگر B_{max} بالاتر از این مقدار در نظر گرفته شود، ترانسفورماتور گرم شده ومنجر به خرابی آن در مدتی کوتاه و نیز تولید هارمونیک و اعوجاج زیاد شده و باعث ایجاد سروصدا در ترانسفورماتور می‌گردد.

برای آهن‌های سرد نورد شده، معمولا B_{max} بین ۱/۵ تا ۱/۷ تسلا در نظر گرفته می‌شود. البته در این مورد بین ترانسفورماتور توزیع[۴] و ترانسفورماتورهای قدرت تفاوت قائل می‌شوند. [۲۹]

ترانسفورماتورهای توزیع، قدرت الکتریکی را از شبکه فشار متوسط (۱۱ کیلوولت، ۲۰ کیلو ولت یا ۳۳ کیلو ولت) به ولتاژ مصرف فشارضعیف (۴۰۰ ولت سه فاز یا ۲۲۰ ولت تک‌فاز) تبدیل می‌کنند. این ترانسفورماتورها از قدرت نامی ۱۵ تا ۲۵ کیلوولت آمپر آغاز شده و تا حدود ۲ مگاولت آمپر سه فاز ساخته می‌شوند. برای ترانسفورماتورهای توزیع معمولا سعی می‌شود که B_{max} تا حد امکان کوچک‌تر انتخاب شود، زیرا تعداد این ترانسفورماتور در شبکه زیاد است و همیشه برق‌دار هستند. لذا انرژی تلف شده هسته‌شان زیاد است. بنابراین حتی‌الامکان باید B_{max} هسته در طراحی کم انتخاب شود تا بازده آن‌ها در شبانه‌روز افزایش یابد. امروزه در ترانسفورماتورهای توزیع بیشتر از فولادهای سیلیسیوم‌دار سرد نورد شده استفاده می‌گردد و B_{max} آن‌ها معمولا در حدود ۱/۶ تسلا در نظر گرفته می‌شود.

ترانسفورماتورهای قدرت معمولا ترانسفورماتورهایی هستند که قدرت الکتریکی را در ولتاژهای بالاتر، یعنی ۶۳ هزارولت، ۱۳۲ هزارولت، ۴۰۰ هزارولت و بالاتر تبدیل می‌نمایند. قیمت این ترانسفورماتورها گران است. لذا در طراحی معمولا B_{max} هسته آن‌ها را در حدود ۱/۷ یا گاه ۱/۸ (اقتصادی‌تر) در نظر می‌گیرند تا مقدار آهن، مس و عایق مصرفی کاهش یابد. اما بنا به سفارش و گاه برای کم کردن صدای ترانسفورماتور ممکن است در ترانسفورماتورهای قدرت چگالی فوران بیشینه ۱/۶۵ تا ۱/۶۸ تسلا نیز در نظر گرفته شود. میزان B_{max} بستگی تام به نوع آهن مورد استفاده در ساخت هسته (نورد سرد شده سیلسیم‌دار معمولی یا Hi-B یا آمورف یا ...) دارد.

حال با انتخاب B_{max} ، برای محاسبه سطح مقطع هسته توسط رابطه (۲-۳) تنها نیاز به تعداد دور N_1 داریم. برای به‌دست آوردن مقدار مناسب برای N_1 ابتدا به بحث در مورد چگالی جریان در هادی سیم‌پیچ و سپس به ابعاد پنجره هسته می‌پردازیم.

[4] - Distribution Transformers

۲-۱-۱ انتخاب چگالی جریان در هادی‌ها

روابط چگالی جریان در سیم‌پیچ‌ها عبارت است از :

$$J_1 = \frac{I_1}{s_1}$$

$$J_2 = \frac{I_2}{s_2} \quad (۴-۲)$$

که در آن J_1 و J_2 با توجه به وضعیت خنک‌کنندگی اولیه و ثانویه تعیین می‌شوند. مقدار عددی این پارامترها گاها متفاوت است زیرا شرایط ساختمانی و هندسی و خنک‌شوندگی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه متفاوت است. اما می‌توان ثابت کرد که اگر تنها تفاوت‌های ژولی در نظر گرفته شوند، برای یک حجم مس مصرفی معین، تلفات مسی وقتی حداقل خواهد بود که J_1 و J_2 برابر فرض شوند.

برای اثبات آن، ابتدا به محاسبه تلفات ژولی می‌پردازیم:

$$p_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = \rho \frac{L_1}{s_1} I_1^2 + \rho \frac{L_2}{s_2} I_2^2 \quad (۵-۲)$$

که L_1 و L_2 طول هادی‌های اولیه و ثانویه و s_1 و s_2 سطح مقطع هادی‌هاست.

اگر طول متوسط هر حلقه هادی را به‌ترتیب l_1 و l_2 و تعداد دور آن‌ها را N_1 و N_2 بنامیم، خواهیم داشت:

$$p_{cu} = \rho \frac{N_1 l_1}{s_1} I_1^2 + \rho \frac{N_2 l_2}{s_2} I_2^2 \quad (۶-۲)$$

با صرفه‌نظر کردن از جریان کوچک بی‌باری داریم:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (۷-۲)$$

$$\Rightarrow \quad N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad \Rightarrow \quad (N_1 I_1)^2 = (N_2 I_2)^2 \quad (۸-۲)$$

از ضرب و تقسیم رابطه (۲-۶) بر N_1 و N_2 داریم:

$$p_{cu} = \rho \left[\frac{l_1}{N_1 s_1} (N_1 I_1)^2 + \frac{l_2}{N_2 s_2} (N_2 I_2)^2 \right] \quad (۹-۲)$$

با استفاده از روابط (۲-۸) و (۲-۹):

$$p_{cu} = \rho (N_1 I_1)^2 \left[\frac{l_1}{N_1 s_1} + \frac{l_2}{N_2 s_2} \right] \quad (۱۰-۲)$$

$$\Rightarrow \quad dp_{cu} = \rho(N_1 I_1)^2 \left[\frac{l_1}{N_1} . \frac{-ds_1}{s_1^2} + \frac{l_2}{N_2 s_2} . \frac{-ds_2}{s_2^2} \right] \quad (۱۱-۲)$$

اگر بخواهیم حجم معینی از مس را مصرف کنیم:

$$Vol_{cu} = N_1 I_1 s_1 = N_2 I_2 \, s_2 = cte \quad (۱۲-۲)$$

$$\Rightarrow Vol_{cu} = 0 \Rightarrow \quad N_1 I_1 ds_1 = N_2 I_2 \, ds_2 = 0 \quad (۱۳-۲)$$

$$\Rightarrow ds_2 = \frac{N_1 I_1}{N_2 I_2} \, ds_1 \quad (۱۴-۲)$$

از روابط (۲-۱۱) و (۲-۱۴):

$$\Rightarrow \quad dp_{cu} = \rho(N_1 I_1)^2 \left[\frac{l_1}{N_1} . \frac{-ds_1}{s_1^2} + \frac{l_2}{N_2 s_2^2} . \frac{N_1 I_1}{N_2 I_2} \, ds_1 \right] \quad (۱۵-۲)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{dp_{cu}}{ds_1} = \rho(N_1 I_1)^2 \left[\frac{-l_1}{s_1^2 N_1} + \frac{N_1 I_1}{{N_2}^2 s_2^2} \right] \quad (۱۶-۲)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{dp_{cu}}{ds_1} = \rho N_1 I_1 (N_1 I_1)^2 \left[\frac{-l_1}{(s_1 N_1)^2} + \frac{1}{(s_2 N_2)^2} \right] \quad (۱۷-۲)$$

برای حداقل شدن تلفات مسی:

$$\Rightarrow \quad \frac{dp_{cu}}{ds_1} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{(s_1 N_1)^2} = \frac{1}{(s_2 N_2)^2} \quad \Rightarrow \quad s_1 N_1 = \; s_2 N_2 \quad \Rightarrow \quad s_1 = \; s_2 (۱۸-۲)$$

یعنی باید سطح مقطع کل مس در اولیه و ثانویه برابر باشد.

از طرفی با توجه به کوچک بودن جریان بی‌باری در مقابل جریان بار:

$$\begin{cases} N_1 I_1 = N_2 I_2 \\ s_1 N_1 = \; s_2 N_2 \end{cases} \quad (۱۹-۲)$$

از تقسیم دو رابطه اخیر بر یکدیگر داریم:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad \Rightarrow \quad J_2 = J_2 \quad (۲۰-۲)$$

البته باید توجه داشت که در عمل یکی از سیم‌پیچ‌ها سریع‌تر از دیگری خنک می‌شود. به‌عنوان مثال سیم‌پیچ فشار ضعیف در ترانسفورماتورهای توزیع، به لحاظ وجود روغن در اطراف یک یا چند لایه فشار ضعیف، خیلی بهتر از سیم‌پیچ فشار قوی که به‌صورت چند لایه با سیم گرد بدون کانال روغن پیچده شده، خنک می‌گردد.

علاوه بر تمام این‌ها، تلفات ناشی از جریان مذکور در مقطع هادی‌های اولیه به دلیل متفاوت بودن هادی استفاده شده، متفاوت است. از سوی دیگر در محاسبات انجام شده تنها تلفات ژولی RI^2 در نظر گرفته شده و تلفات مربوط به فوران پراکندگی در هادی‌های مسی منظور نشده است. هم‌چنین ممکن است سطح مقطع برای هادی برای یکسان در نظر گرفتن J_1 و J_2 به‌طور دقیق در جدول هادی‌ها موجود نباشد لذا انتخاب سطح مقطع بالاتر موجب ایجاد تفاوت بین J_1 و J_2 شود. در عمل به دلایلی از این