



دانشگاه مازندران

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته برق-قدرت

موضوع:

تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی در
ترانسفورماتورهای قدرت به روش امپدانس لحظه‌ای معادل و
تبدیل موجک

استاد راهنما:

دکتر محمد میرزائی

استاد مشاور:

دکتر سید اصغر غلامیان

نام دانشجو:

مرتضی جمالی

بهمن ماه ۱۳۸۹

چکیده

جریان‌های هجومی که ممکن است در ترانسفورماتورها، در حالت انرژی‌دار شدن ایجاد گردند، در اکثر موارد دارای دامنه‌ای چندین برابر جریان نامی ترانسفورماتور می‌باشند. این جریان‌های بزرگ به دلیل آنکه قابل قیاس با جریان‌های خطا بوده، موجب عملکرد نادرست وسایل حفاظتی ترانسفورماتور و ایجاد خطای مکانیکی سیم‌پیچ‌ها و در پی آن تحمیل هزینه‌های سنگینی بر بهره‌برداران سیستم‌های قدرت می‌گردند. لذا بایستی توسط روش‌هایی این دو جریان از یکدیگر تمییز داده شوند. از آنجاییکه بررسی دقیق روش‌های مختلف نیازمند اطلاعات حاصله از شرایط جریان‌های هجومی و خطا در حالت کار نامی ترانسفورماتور می‌باشد، لذا لازم است توسط شبیه‌سازی‌های مناسب که تا حدود زیادی به شرایط عملی نزدیک باشند، اطلاعات مورد نظر حاصل گردد و سپس با استفاده از اطلاعات بدست آمده، روش‌های مناسب جهت تشخیص این جریان‌ها از یکدیگر مطالعه گردد.

در این پایان‌نامه جهت تحقق مطالب فوق‌الذکر، یک ترانسفورماتور سه‌فاز با استفاده از اطلاعات طراحی و به روش اجزاء محدود در نرم افزار Maxwell، شبیه‌سازی گردید و اتصالات مختلف این ترانسفورماتور نیز توسط نرم افزار Simplorer انجام شد تا بتوان شرایط مختلف کاری مورد نظر، اعم از شرایط جریان هجومی و خطا در ولتاژ نامی، بر روی آن اعمال گردد. سپس توسط دو روش تبدیل موجک و امیدانس لحظه‌ای معادل، تشخیص جریان هجومی از جریان‌های خطا صورت گرفته است. در روش تبدیل موجک، با استفاده از رفتارهای متفاوت جریان‌های هجومی و خطا در لحظات شروع و در گذر زمان و استفاده از تبدیل موجک، معیاری جهت تشخیص جریان‌های هجومی و خطا از یکدیگر بدست آمد. سپس جهت محاسبه مؤلفه‌های تبدیل موجک، برنامه‌ای در قسمت M-File نرم افزار MATLAB نوشته شد تا بتوان با محاسبه مؤلفه‌های تبدیل موجک، رفتار این مؤلفه‌ها را مورد بررسی قرار داد. در روش امیدانس لحظه‌ای معادل نیز با استفاده از مدار معادل ترانسفورماتور و رفتارهای متفاوت هسته ترانسفورماتور در طی زمان بروز جریان‌های هجومی و خطا و تغییرات اندوکتانس مغناطیس‌کننده و بطور کل امیدانس ورودی ترانسفورماتور، معیاری جهت تمییز جریان‌های هجومی و خطا از یکدیگر، حاصل گردید. در این حالت نیز جهت بررسی معیار بدست آمده، برنامه‌ای با توجه به روابط حاصله در نرم افزار MATLAB نوشته شد تا بتوان شرایط مختلف کاری را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

واژه‌های کلیدی:

ترانسفورماتور، جریان هجومی، جریان خطا، تبدیل موجک، امیدانس لحظه‌ای معادل

فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان

فصل اول

- ۱ بررسی اهمیت پروژه.....
- ۲ ۱-۱- مقدمه.....

فصل دوم

- ۴ مطالعه جریان هجومی و خطاهای داخلی در ترانسفورماتورها.....
- ۵ ۱-۲- مقدمه.....
- ۵ ۲-۲- پدیده جریان هجومی در ترانسفورماتورها.....
- ۸ ۳-۲- عوامل مؤثر بر دامنه جریانهای هجومی.....
- ۸ ۱-۳-۲- ابعاد و قدرت ترانسفورماتور.....
- ۸ ۲-۳-۲- امیدانس شبکه.....
- ۹ ۳-۳-۲- خاصیت مغناطیسی هسته ترانسفورماتور.....
- ۹ ۴-۳-۲- چگالی شار پسماند هسته.....
- ۹ ۵-۳-۲- زمان انرژی دار شدن ترانسفورماتور.....
- ۹ ۶-۳-۲- روش انرژی دار شدن ترانسفورماتور.....
- ۱۰ ۴-۲- بررسی مؤلفه‌های هارمونیک جریان هجومی.....
- ۱۲ ۵-۲- روشهای کاهش جریان هجومی.....
- ۱۳ ۱-۵-۲- تعیین زمان وصل ترانسفورماتور به شبکه.....
- ۱۳ ۲-۵-۲- انرژی دار کردن متوالی فازها.....
- ۱۳ ۳-۵-۲- جبران کننده سری.....
- ۱۳ ۶-۲- خطای داخلی ترانسفورماتورها.....
- ۱۴ ۱-۶-۲- خطای سیم پیچها.....
- ۱۴ ۱-۱-۶-۲- خطا در هادی سیم پیچها.....
- ۱۵ ۲-۱-۶-۲- خطا در عایق سیم پیچها.....
- ۱۵ ۳-۱-۶-۲- عوامل مؤثر بر وقوع اتصال کوتاهها.....
- ۱۷ ۲-۶-۲- خطا در هسته.....

فصل سوم

- ۱۸ روشهای مختلف در تعیین دامنه جریان هجومی و تشخیص آن از جریانهای خطا.....
- ۱۹ ۱-۳- مقدمه.....
- ۱۹ ۲-۳- تعیین دامنه جریانهای هجومی در ترانسفورماتورهای تکفاز.....
- ۱۹ ۱-۲-۳- روش نیمه تحلیلی.....
- ۲۱ ۲-۲-۳- روشی با استفاده از تئوری Jiles-Atherton.....

فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
۲۲	۱-۲-۲-۳- مفاهیم پایه‌ای مدل بکار رفته.....
۲۳	۲-۲-۲-۳- مراحل اعمال روش توصیف شده.....
۲۴	۳-۲-۳- روش عددی.....
۲۵	۳-۳- تعیین دامنه جریان‌های هجومی در ترانسفورماتورهای سه‌فاز.....
۲۸	۴-۳- روش‌های مختلف تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور.....
۲۸	۱-۴-۳- معیار مؤلفه هارمونیک دوم.....
۲۹	۲-۴-۳- تخمین خطا.....
۳۱	۳-۴-۳- توان مصرفی میانگین.....
۳۲	۴-۴-۳- ضرائب متقارن طولی سیگنال.....
۳۵	۵-۴-۳- ضرائب همبستگی.....
فصل چهارم	
۳۷	تشخیص جریان هجومی از جریان خطا با استفاده از تبدیل موجک.....
۳۸	۱-۴- مقدمه.....
۳۸	۲-۴- مبانی روش تبدیل موجک.....
۴۱	۳-۴- روش اجزاء محدود.....
۴۲	۱-۳-۴- مراحل کلی روش اجزاء محدود.....
۴۲	۲-۳-۴- مدل‌سازی ترانسفورماتور به روش اجزاء محدود.....
۴۳	۴-۴- شبیه‌سازی ترانسفورماتور سه‌فاز در نرم افزار Maxwell.....
۴۵	۵-۴- اعمال روش تبدیل موجک بر روی نتایج شبیه‌سازی ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
۴۶	۱-۵-۴- جریان هجومی.....
۴۹	۲-۵-۴- اتصال کوتاه داخلی.....
۴۹	۱-۲-۵-۴- اتصال کوتاه حلقه به حلقه.....
۵۱	۲-۲-۵-۴- اتصال کوتاه حلقه به زمین.....
۵۳	۳-۵-۴- اتصال کوتاه خارجی.....
فصل پنجم	
۵۶	تشخیص جریان هجومی از جریان خطا با استفاده از امپدانس لحظه‌ای معادل.....
۵۷	۱-۵- مقدمه.....
۵۷	۲-۵- مبانی روش امپدانس لحظه‌ای معادل.....
۶۰	۳-۵- اعمال روش امپدانس لحظه‌ای معادل بر روی نتایج شبیه‌سازی ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
۶۱	۱-۳-۵- جریان هجومی.....
۶۲	۲-۳-۵- اتصال کوتاه داخلی.....

فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
۶۳۵-۳-۱- اتصال کوتاه حلقه به حلقه
۶۳۵-۳-۲- اتصال کوتاه حلقه به زمین
۶۵۵-۳-۳- اتصال کوتاه خارجی
	فصل ششم
۶۷نتیجه گیری
۶۸۶-۱- نتیجه گیری
۶۸۶-۲- پیشنهادات
۶۹پیوست ها
۷۱منابع و مأخذ

فهرست شکل‌ها

شماره صفحه

عنوان

فصل اول

فصل دوم

- شکل (۱-۲): ولتاژ، شار هسته و جریان سیم‌پیچی یک ترانسفورماتور در حالت ماندگار..... ۵
- شکل (۲-۲): شار هسته و جریان سیم‌پیچی، در حالت اعمال ولتاژ ورودی در لحظه پیک مثبت..... ۶
- شکل (۳-۲): شار هسته و جریان سیم‌پیچی، در حالت اعمال ولتاژ ورودی در لحظه گذر از صفر..... ۷
- شکل (۴-۲): جریان هجومی یک ترانسفورماتور نمونه..... ۷
- شکل (۵-۲): چگونگی ایجاد جریان هجومی به صورت نموداری..... ۱۰
- شکل (۶-۲): نمایش جریان هجومی نمونه به منظور بررسی مؤلفه هارمونیک آن..... ۱۱
- شکل (۷-۲): طیف فرکانسی سیگنال نشان داده شده در شکل (۶-۲) به ازای مقادیر α برابر ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه..... ۱۲

فصل سوم

- شکل (۱-۳): مدار معادل یک ترانسفورماتور تک فاز در حالت بی‌باری..... ۱۹
- شکل (۲-۳): نمایش یک ترانسفورماتور سه فاز سه ستونه..... ۲۵
- شکل (۳-۳): مدار معادل مغناطیسی یک ترانسفورماتور سه فاز سه ستونه..... ۲۶
- شکل (۴-۳): نمایش گرافی ترانسفورماتور شکل (۳-۳)..... ۲۶
- شکل (۵-۳): نمایش جریان هجومی (الف) حالت اصلی (ب) حالت تفاضلی (ج) حالت تفاضلی با حذف زمان مرده..... ۳۰
- شکل (۶-۳): نمایش یک شکل موج سینوسی جهت بررسی ضرائب متقارن طولی..... ۳۳
- شکل (۷-۳): نمایش یک سیکل جریان هجومی نمونه..... ۳۵
- شکل (۸-۳): نمایش جریان خطای داخلی نمونه جهت محاسبه ضرائب همبستگی..... ۳۶
- شکل (۹-۳): نمایش جریان هجومی نمونه جهت محاسبه ضرائب همبستگی..... ۳۶

فصل چهارم

- شکل (۱-۴): چگونگی اعمال تبدیل موجک گسسته بر روی سیگنال اصلی k ۳۸
- شکل (۲-۴): شکل موج‌های نمونه‌ای الف) جریان هجومی ب) جریان خطا..... ۴۰
- شکل (۳-۴): رفتار یکی از مؤلفه‌های تبدیل موجک الف) جریان خطا، ب) جریان هجومی..... ۴۱
- شکل (۴-۴): یک شیء مورد بررسی به روش اجزاء محدود..... ۴۲
- شکل (۵-۴): ترانسفورماتور مورد مطالعه، شبیه‌سازی شده در محیط نرم افزار Maxwell..... ۴۴
- شکل (۶-۴): نمای دو بعدی ترانسفورماتور سه‌فاز شبیه‌سازی شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشد)..... ۴۵
- شکل (۷-۴): جریان فازهای مختلف ترانسفورماتور ناشی از انرژی‌دار شدن..... ۴۶
- شکل (۸-۴): مؤلفه‌های تبدیل موجک جریان هجومی مربوط به فاز A ترانسفورماتور مورد مطالعه..... ۴۷
- شکل (۹-۴): الف) مؤلفه D3 جریان هجومی فاز A ترانسفورماتور مورد مطالعه ب) اندازه مؤلفه D3 جریان هجومی فاز A ترانسفورماتور مورد مطالعه..... ۴۸

فهرست شکل‌ها

شماره صفحه

عنوان

۴۸	شکل (۴-۱۰): الف) مؤلفه D3 جریان هجومی فاز B ترانسفورماتور مورد مطالعه ب) اندازه مؤلفه D3 جریان هجومی فاز B ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
۴۸	شکل (۴-۱۱): الف) مؤلفه D3 جریان هجومی فاز C ترانسفورماتور مورد مطالعه ب) اندازه مؤلفه D3 جریان هجومی فاز C ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
۴۹	شکل (۴-۱۲): جریان تفاضلی فازهای مختلف ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از اتصال کوتاه ۳۰ دور در فاز A.....
۵۰	شکل (۴-۱۳): مؤلفه‌های تبدیل موجک فاز A ناشی از اتصال کوتاه ۳۰ دور در این فاز در ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
۵۱	شکل (۴-۱۴): الف) مؤلفه D3 فاز A، در حالت اتصال کوتاه ۳۰ دور در این فاز در ترانسفورماتور مورد مطالعه ب) اندازه مؤلفه D3 فاز A، در حالت اتصال کوتاه ۳۰ دور در این فاز در ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
۵۱	شکل (۴-۱۵): جریان تفاضلی فازهای مختلف ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از اتصال کوتاه حلقه به زمین در فاز B.....
۵۲	شکل (۴-۱۶): مؤلفه‌های تبدیل موجک فاز B ناشی از اتصال کوتاه حلقه به زمین در این فاز در ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
۵۳	شکل (۴-۱۷): الف) مؤلفه D3 فاز B، در حالت اتصال کوتاه حلقه به زمین در این فاز در ترانسفورماتور مورد مطالعه ب) اندازه مؤلفه D3 فاز B، در حالت اتصال کوتاه حلقه به زمین در این فاز در ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
۵۳	شکل (۴-۱۸): جریان تفاضلی فازهای مختلف ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از اتصال کوتاه تکفاز به زمین در فاز C.....
۵۴	شکل (۴-۱۹): مؤلفه‌های تبدیل موجک جریان فاز C ترانسفورماتور مورد مطالعه، ناشی از اتصال کوتاه خارجی تکفاز به زمین.....
۵۵	شکل (۴-۲۰): الف) مؤلفه D3 فاز C، در حالت اتصال کوتاه خارجی تکفاز به زمین در ترانسفورماتور مورد مطالعه ب) اندازه مؤلفه D3 فاز C، در حالت اتصال کوتاه خارجی تکفاز به زمین در ترانسفورماتور مورد مطالعه.....
فصل پنجم	
۵۸	شکل (۵-۱): شکل موج نمونه‌ای از تغییرات L_m ناشی از جریان هجومی.....
۵۹	شکل (۵-۲): مدار معادل یک ترانسفورماتور دو سیم‌پیچ در حالت کلی.....
۶۱	شکل (۵-۳): جریان هجومی فازهای مختلف ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از انرژی‌دار شدن.....
۶۲	شکل (۵-۴): تغییرات L_k در ترانسفورماتور مورد مطالعه در هنگام بروز جریان هجومی (الف) فاز A، (ب) فاز B و (ج) فاز C.....
۶۳	شکل (۵-۵): جریان تفاضلی فازهای مختلف ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از اتصال کوتاه ۳۰ دور در فاز A.....
۶۴	شکل (۵-۶): تغییرات L_k در فاز A ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از خطای اتصال کوتاه ۳۰ دور در این فاز.....

فهرست شکل‌ها

شماره صفحه

عنوان

۶۴	شکل (۷-۵): جریان تفاضلی فازهای مختلف ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از اتصال کوتاه حلقه به زمین در فاز B.....
۶۵	شکل (۸-۵): تغییرات L_k در فاز B ناشی از خطای اتصال کوتاه حلقه به زمین در این فاز.....
۶۵	شکل (۹-۵): جریان تفاضلی فازهای مختلف ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از اتصال کوتاه تکفاز به زمین در فاز C.....
۶۶	شکل (۱۰-۵): تغییرات L_k در فاز C ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از خطای اتصال کوتاه تکفاز به زمین در این فاز.....

فصل ششم

فهرست جدول‌ها

شماره صفحه

عنوان

فصل اول

فصل دوم

فصل سوم

جدول (۱-۳): مقدار ضریب متقارن طولی جریان خطا، به ازای زوایای فاز اولیه و ثابت زمانی‌های متفاوت.....

۳۴

فصل چهارم

جدول (۱-۴): سطح‌های فرکانسی مختلف، در خروجی فیلترها، در روش تبدیل موجک گسسته.....

۳۹

جدول (۲-۴): پارامترهای ترانسفورماتور شبیه‌سازی شده.....

۴۴

فصل پنجم

فصل ششم

فصل اول

بررسی اهمیت پروژه

۱-۱- مقدمه

امروزه با توجه به نیاز به انرژی الکتریکی در سطح گسترده، سیستم‌های قدرت بطور روزافزونی در حال گسترش و توسعه می‌باشند. در این میان ترانسفورماتورها به عنوان عناصر مهم و کلیدی، نقش مهم و حیاتی را در عملکرد یک سیستم قدرت برعهده دارند. اگر در یک سیستم قدرت، ترانسفورماتوری دچار نقص و خطا گردد، لازم است ترانسفورماتور مورد نظر در حداقل زمان ممکن از سیستم قدرت خارج گشته تا بدین ترتیب آسیب‌های وارده به سیستم، به حداقل برسد. از طرفی نیز باید توجه داشت که قطعی‌های ناخواسته در یک ترانسفورماتور قدرت نیز هزینه‌های سنگینی را بر بهره‌برداران سیستم قدرت تحمیل می‌کند. لذا مطلوب آن است که سیستم حفاظتی ترانسفورماتور، دارای کمترین زمان عملکرد و عدم بروز خطا در تشخیص حالت‌های مختلف سیستم قدرت باشد. از طرفی نیز باید در نظر داشت که شرایط مختلف کاری ترانسفورماتور موجب شده که مسئله حفاظتی آن به عنوان یک امر پیچیده و دشوار همیشه مورد بحث بهره‌برداران سیستم قدرت باشد.

یکی از عواملی که موجب بروز خطا در سیستم حفاظتی ترانسفورماتور می‌گردد، جریان‌های هجومی می‌باشند. این جریان‌ها در بعضی از موارد دارای دامنه‌هایی چندین برابر جریان نامی ترانسفورماتور بوده که قابل قیاس با جریان‌های خطا می‌باشند. اگرچه دامنه این جریان‌ها در برخی موارد قابل قیاس با جریان‌های خطا می‌باشد، اما دارای ماهیتی متفاوت با این جریان‌ها بوده و ناشی از هر تغییر ناگهانی در ولتاژ مغناطیس کننده ترانسفورماتور می‌باشند. مهمترین عامل بروز اینگونه جریان‌ها، انرژی‌دار شدن ترانسفورماتور و اتصال آن به سیستم قدرت می‌باشد. همچنین عوامل دیگری نظیر بازیابی ولتاژ پس از حذف خطا و تغییر نوع خطا (به عنوان مثال تبدیل خطای تک فاز به زمین به خطای فاز به فاز) نیز موجب بروز جریان‌های هجومی در یک سیستم قدرت می‌گردد [۱-۲]. صرفنظر از عوامل ایجاد جریان‌های هجومی، این جریان‌ها، همانطور که ذکر گردید، متمایز از جریان‌های خطا بوده و جزء حالات طبیعی یک سیستم قدرت محسوب می‌شوند. بنابراین سیستم حفاظتی ترانسفورماتور نبایستی دستور قطع ترانسفورماتور از شبکه را صادر کند، چراکه قطع ترانسفورماتور از شبکه علاوه بر هزینه‌های ایجاد بر بهره‌برداران سیستم قدرت ناشی از قطع انرژی به

مصرف کننده، موجب آسیب به ترانسفورماتور و کاهش عمر آن می‌گردد و همچنین قطع جریان ناگهانی یک سلف موجب ایجاد اضافه ولتاژهای بزرگ و آسیب رسیدن به سیستم عایقی و در نهایت بطور غیر مستقیم موجب خطای داخلی در ترانسفورماتور می‌گردد. ضمناً تعدد قطع و سپس وصل ترانسفورماتورها، نیروهای مکانیکی شدیدی را در جهات محوری و شعاعی بر ترانسفورماتور اعمال می‌نماید.

بنابراین بایستی جهت تشخیص جریان‌های هجومی از جریان‌های خطا، روش‌هایی پیشنهاد گردد تا ضمن تشخیص صحیح این جریان‌ها از یکدیگر، از سرعت کافی نیز برخوردار باشد. از آنجاییکه بررسی روش‌های مختلف نیازمند اطلاعات حاصله از شرایط جریان‌های هجومی و خطا با اعمال ولتاژ نامی بوده که این امر نیز به نوبه خود باعث آسیب رسیدن به ترانسفورماتور می‌گردد، لذا در تحقیقات پیشین انجام گرفته بطور عملی، اعمال ولتاژ در درصدی از شرایط نامی صورت گرفته است. بنابراین در ابتدا لازم است که توسط شبیه‌سازیهای مناسب که تا حدود زیادی به شرایط واقعی نزدیک باشد، این امر تحقق یافته (اعمال ولتاژ نامی) و سپس با استفاده از اطلاعات بدست آمده، روشهای مناسب جهت تشخیص این جریان‌ها از یکدیگر مطالعه گردد.

در این پروژه جهت حصول این امر تلاش‌های مورد نظر جهت ایجاد شرایط واقعی با استفاده از اطلاعات طراحی یک ترانسفورماتور قدرت انجام گردید. در این راستا با استفاده از روش اجزاء محدود و با بکارگیری نرم افزارهای مناسب، اطلاعات مورد نیاز از ترانسفورماتور مورد نظر حاصل شد و سپس دو روش کارآمد در زمینه تشخیص و تمییز جریان‌های هجومی مورد بررسی قرار گرفت.

فصل دوم

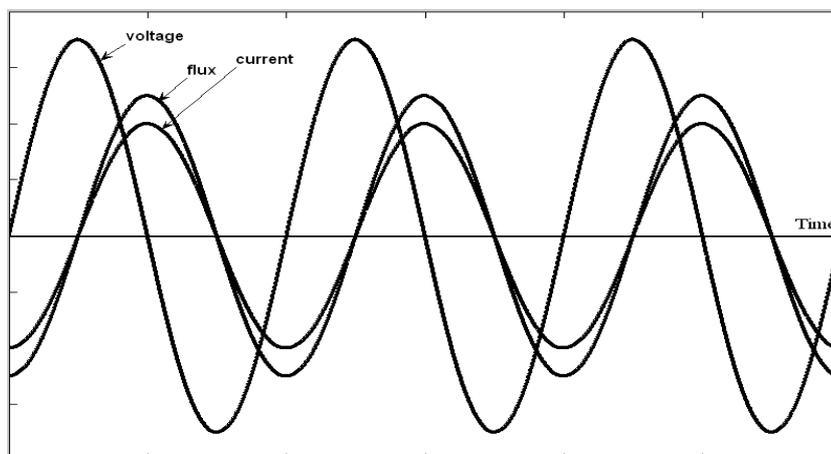
مطالعه جریان هجومی و خطاهای داخلی در ترانسفورماتورها

۲-۱- مقدمه

بمنظور تشخیص جریان‌های هجومی از جریان‌های خطا در یک ترانسفورماتور، ابتدا بایستی چگونگی بروز این جریان‌ها و عوامل مؤثر بر وقوع آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در این فصل پدیده وقوع جریان‌های هجومی در ترانسفورماتورها مورد بررسی قرار گرفته و سپس عوامل مؤثر بر میزان دامنه این جریان‌ها و همچنین محتوی هارمونیک و شکل آنها مورد تجزیه قرار خواهند گرفت. همچنین بمنظور آشنایی با خطاهای داخلی ترانسفورماتورها و ماهیت این جریان‌ها، مطالعات لازم انجام گرفته است.

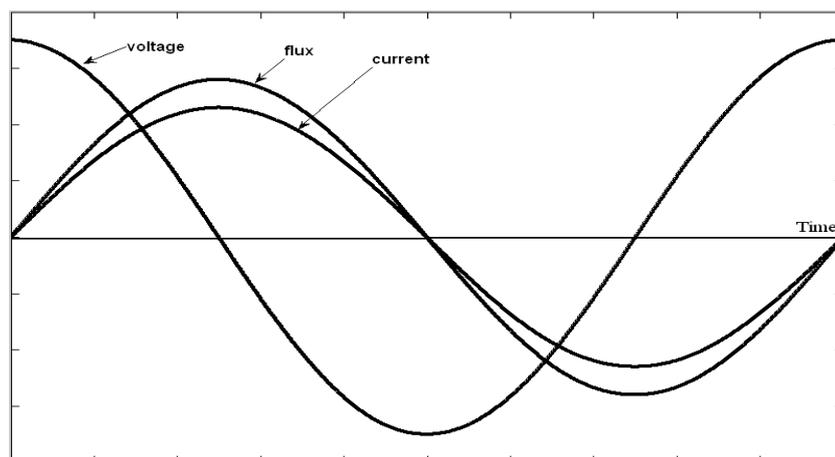
۲-۲- پدیده جریان هجومی در ترانسفورماتورها

در هسته یک ترانسفورماتور، نرخ تغییرات شار لحظه‌ای متناسب با افت ولتاژ لحظه‌ای سیم‌پیچ اولیه می‌باشد، یعنی شکل موج ولتاژ، مشتق شکل موج شار است. به عبارتی دیگر، شار هسته یک ترانسفورماتور، از انتگرال‌گیری ولتاژ آن بدست می‌آید. بنابراین در حالت ماندگار، شار هسته به اندازه ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ اعمالی تأخیر فاز دارد. از آنجایی که شار هسته متناسب با نیروی محرکه مغناطیسی و در نتیجه جریان سیم‌پیچی است، بنابراین شار هسته و جریان سیم‌پیچی با یکدیگر هم‌فاز بوده و نسبت به ولتاژ اعمالی به اندازه ۹۰ درجه تأخیر فاز دارند. این حالت در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱): ولتاژ، شار هسته و جریان سیم‌پیچی یک ترانسفورماتور در حالت ماندگار

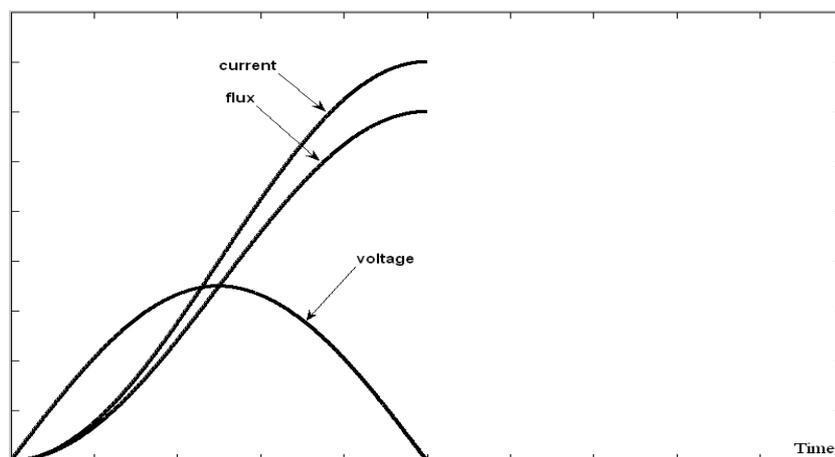
به منظور بررسی رفتار ترانسفورماتور در لحظه اعمال ولتاژ ورودی، فرض می‌شود که منبع ولتاژ ورودی در لحظه پیک مثبت، به ترمینال‌های ترانسفورماتور اعمال شده است. بنابراین از آنجایی که شار هسته به اندازه ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ اعمالی تأخیر فاز دارد و از طرفی نیز انتگرال ولتاژ اعمالی می‌باشد، در نتیجه برای شار هسته و جریان سیم‌پیچی می‌توان نموداری همانند شکل (۲-۲) را در نظر گرفت.



شکل (۲-۲): شار هسته و جریان سیم‌پیچی، در حالت اعمال ولتاژ ورودی در لحظه پیک مثبت

همانطور که از شکل (۲-۲) ملاحظه می‌شود، در این حالت شار و جریان هسته هر دو از مقدار صفر شروع به افزایش کرده و به مقدار ماکزیممی مشابه حالت ماندگار می‌رسند. بنابراین در این حالت، هیچ جهش ناگهانی در جریان هسته ملاحظه نمی‌شود. اما در حالت دیگر فرض می‌شود که ولتاژ ورودی در نقطه گذر از صفر یعنی هنگامی که دامنه آن برابر صفر است به ترمینال‌های ترانسفورماتور اعمال می‌گردد. همانطور که در شکل (۱-۲) ملاحظه گردید، در حالت کار دائم ترانسفورماتور، این نقطه متناظر با پیک منفی شار و جریان هسته می‌باشد. اما باید توجه داشت که یک اختلاف اساسی بین حالت کار دائم و حالت انرژی-دار شدن ناگهانی وجود دارد. در یک ترانسفورماتور در حالت اتصال به منبع ولتاژ، شار و جریان هسته بایستی از مقدار صفر شروع به افزایش (و یا کاهش) کنند، بنابراین در این حالت با توجه به اعمال ولتاژ مثبت ورودی که از مقدار صفر آغاز می‌گردد، شار هسته نیز به جای شروع از پیک منفی از مقدار صفر شروع به افزایش کرده و به مقداری تقریباً دو برابر مقدار نامی خود می‌رسد. در ترانسفورماتورهای ایده‌آل، شاری به اندازه دو

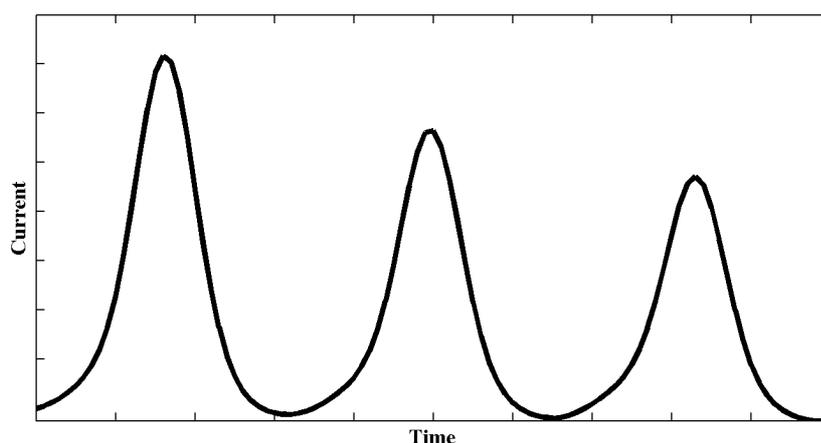
برابر مقدار نامی، موجب ایجاد جریانی به اندازه دو برابر مقدار نامی می‌گردد، اما از آنجایی که در اکثر ترانسفورماتورها بین شار نامی و شار اشباع، فاصله زیادی وجود ندارد، بنابراین این مقدار از شار موجب خواهد شد که ترانسفورماتور وارد ناحیه اشباع گردد و این بدان معناست که به منظور ایجاد چنین شاری، بایستی جریان بزرگی ایجاد گردد. این پدیده در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲): شار هسته و جریان سیم‌پیچی، در حالت اعمال ولتاژ ورودی در لحظه گذر از صفر

لذا در این حالت با توجه به لحظه وصل منبع ولتاژ، مقادیر متفاوتی از جریان‌های هجومی دیده می-

شود. شکل (۴-۲) جریان هجومی را برای یک ترانسفورماتور نمونه نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲): جریان هجومی یک ترانسفورماتور نمونه

همانطور که از این شکل ملاحظه می‌گردد، جریان هجومی در ابتدا، دارای دامنه بزرگی بوده که رفته رفته از مقدار آن کاسته شده تا اینکه ترانسفورماتور به شرایط کار عادی برسد.

۲-۳- عوامل مؤثر بر دامنه جریان‌های هجومی

شکل موج، دامنه و تداوم زمانی جریان هجومی، به عوامل مختلفی بستگی دارد [۳] که در ذیل به آنها اشاره شده است:

۲-۳-۱- ابعاد و قدرت ترانسفورماتور

از آنجایی که در ترانسفورماتورهای کوچک، مقادیر اندوکتانس سیم‌پیچی کمتر از ترانسفورماتورهای بزرگ می‌باشد، در نتیجه نسبت مقدار پیک جریان هجومی به جریان نامی برای ترانسفورماتورهای کوچک، بیشتر از ترانسفورماتورهای بزرگ است. از طرفی نیز اندوکتانس سیم‌پیچی زیاد در ترانسفورماتورهای بزرگ، موجب افزایش ثابت زمانی جریان هجومی برای این نوع از ترانسفورماتورها شده که این امر به نوبه خود موجب می‌گردد که زمان لازم به منظور رسیدن به حالت عادی در این ترانسفورماتورها نسبت به ترانسفورماتورهای کوچک، بیشتر گردد.

۲-۳-۲- امپدانس شبکه

دامنه جریان هجومی برای ترانسفورماتورهایی که به یک شبکه با ولتاژ بالا متصل می‌باشند، بزرگ می‌باشد. علاوه بر آن باید در نظر داشت که مقدار مقاومت معادلی که از منبع ورودی نسبت به شاخه مغناطیس‌کننده دیده می‌شود، نقش مهمی در میرایی جریان هجومی دارد. بنابراین طول مدت زمان جریان هجومی برای ترانسفورماتورهای نزدیکتر به ژنراتورها (از نظر الکتریکی)، بیشتر از ترانسفورماتورهای منصوبه در فواصل دورتر می‌باشد.

۲-۳-۳- خاصیت مغناطیسی هسته ترانسفورماتور

هنگامی که چگالی شار اشباع هسته، برای ترانسفورماتوری کوچک باشد، ترانسفورماتور مورد نظر حالت شدیدتری از جریان‌های هجومی را از خود نشان می‌دهد. بنابراین هرچه ناحیه کاری ترانسفورماتوری دورتر از مقدار شار اشباع هسته باشد، ترانسفورماتور مورد نظر مقادیر کمتری از جریان‌های هجومی را از خود نشان خواهد داد.

۲-۳-۴- چگالی شار پسماند هسته

وجود شار پسماند در هسته ترانسفورماتور موجب افزایش جریان‌های هجومی خواهد شد، چراکه این شار پسماند با افزوده شدن به شار ایجاد شده توسط ولتاژ ورودی، باعث افزایش شار هسته و به اشباع رفتن بیشتر هسته می‌گردد. البته نامطلوبترین حالت مربوط به موقعیتی می‌باشد که ولتاژ ورودی در لحظه اعمال به ترانسفورماتور، در جهتی باشد که موجب افزایش این شار پسماند گردد. در چنین مواقعی است که ترانسفورماتور مورد نظر مقادیر زیادی از جریان‌های هجومی را از خود نشان می‌دهد.

۲-۳-۵- زمان انرژی‌دار شدن ترانسفورماتور

بیشترین مقادیر جریان هجومی هنگامی اتفاق می‌افتد که ترانسفورماتور مورد نظر در لحظه گذر از صفر ولتاژ، به منبع ورودی متصل گردد. البته موقعیت بیان شده، هنگامی شدیدتر خواهد شد که شار ایجاد شده جدید توسط منبع ورودی، در جهت شار پسماند باشد.

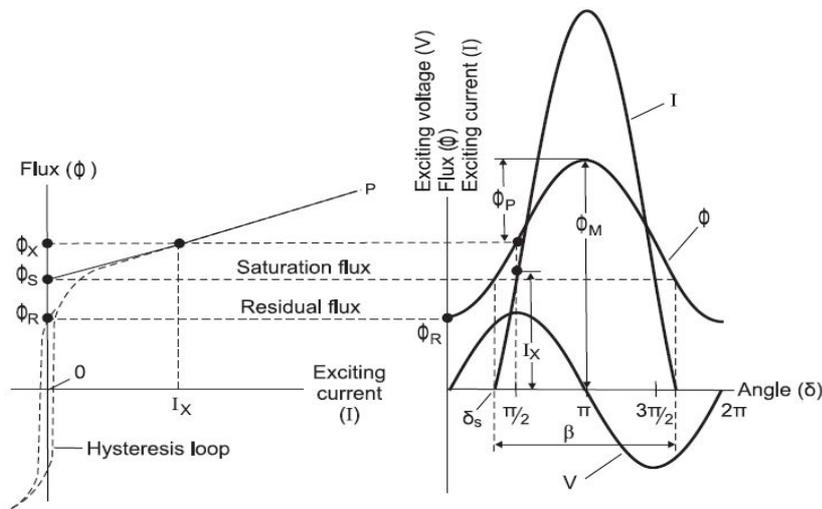
۲-۳-۶- روش انرژی‌دار شدن ترانسفورماتور

یکی از عواملی که در مقدار دامنه جریان‌های هجومی مؤثر می‌باشد، سطح مقطع مابین هسته و سیم-پیچ تحریک شونده است. هرچه مقدار سطح مقطع مورد نظر کمتر باشد، مقاومت مغناطیسی ایجاد شده بیشتر و اندوکتانس کمتر می‌گردد و لذا جریان‌های هجومی ناشی از تحریک این سیم‌پیچی بیشتر می‌گردد.

بنابراین هنگامی که سیم‌پیچی‌های داخلی یک ترانسفورماتور (با قطر کمتر) در ابتدا انرژی دار گردند، مقدار جریان هجومی بیشتر می‌باشد. از آنجاییکه در ترانسفورماتورها به علت مسائل عایقی، سیم‌پیچی‌های با ولتاژ پایین نزدیکتر به هسته قرار می‌گیرند، در نتیجه اگر در یک ترانسفورماتور سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف در ابتدا تحریک شوند، مقادیر بزرگتری از جریان‌های هجومی دیده خواهد شد.

۴-۲- بررسی مؤلفه‌های هارمونیکی جریان هجومی

به منظور بررسی محتوای هارمونیکی جریان هجومی، شکل (۵-۲) که نشان دهنده‌ی چگونگی ایجاد جریان هجومی است در نظر گرفته می‌شود [۴]. در این شکل φ_P و φ_S و φ_R به ترتیب نشان دهنده‌ی شار پسماند، شار اشباع و شار نامی می‌باشند. بر اساس این شکل مقدار شار در زاویه δ توسط رابطه (۱-۲) بدست می‌آید.



شکل (۵-۲): چگونگی ایجاد جریان هجومی به صورت نموداری

$$\varphi(\delta) = (\varphi_R + \varphi_P) - \varphi_P \cos \delta \quad (1-2)$$

همچنین مقدار زاویه β که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است، توسط رابطه (۲-۲) بدست می‌آید.