دانشگاه صنعتي
نوشيرواني بابل

موضوع :

تعیین تلفات ترانسفورماتور تحت جریان بار و ولتاژهای هارمونیکی به روش اجزاء محدود

جهت اخذ درجه کارشناسي ارشد
در رشته مهندسی برق گرایش قدرت

استاد راهنما:

دکتر محمد میرزایی

استاد مشاور:

دکتر امیر عباس شایگانی اکمل

نگارش:

محمد یزدانی اسرمی

شهریور ماه ۱۳۹۰

تشکر و قدردانی:

رسول خدا (ص) فرمودند: کسی که سپاسگزار زحمات بندگان خدا نباشد، از نعمات خداوند متعال نیز سپاسگزار نخواهد بود.

لذا ضمن شکرگذاری برای تمامی الطاف، نعمات و همراهی‌های پروردگار متعال، وظیفه خود می‌دانم در ابتدا سپاسگزار خانواده عزیزم باشم که همانند تمام روزهای زندگی با صبر و حوصله در کنارم بودند و بخش عمده‌ای از موفقیت‌هایم مرهون همراهی و تحمل آنهاست و نیز اساتید گرانقدر گروه قدرت دانشکدهٔ مهندسی برق، بخصوص جناب آقای دکتر محمد میرزایی که به هنگام نیاز برای حل مشکلات اینجانب از هیچ کمکی دریغ نورزیدند. همچنین جناب آقای دکتر امیر عباس شایگانی‌اکمل که با راهنمایی‌های ارزنده خود، اینجانب را در جهت تکمیل این پایان‌نامه، به جد یاری نمودند، برای این‌دو استاد عزیز آرزوی سلامتی، موفقیت و سربلندی دارم.

از آقایان مهندسین سید محمدباقر ساداتی و محمد رضانژاد به‌سبب همراهی‌شان در مراحل تست آزمایشگاهی پروژه بسیار سپاسگزارم. همچنین، از دوستان مهربانم امیر، مهران، آرمین، مرتضی، هانی، ابوالفضل، ارژنگ، محمدباقر و ابراهیم و آقای مهندس سید برزگر به سبب دلگرمی که به آنها داشتم، متشکرم. بعلاوه، از آقای مهندس رضا احمدی، برای نظرات مفیدشان به‌جهت پر بارتر شدن پایان‌نامه سپاسگزارم.

تقدیم به

شهدای گمنام مدفون در دانشگاه

و

همچنین

تقدیم به

دست‌های زحمتکش پدرم

و

محبت‌های بی‌دریغ مادرم

چکیده

یکی از تجهیزات بسیار مهم و کلیدی شبکه‌های الکتریکی، ترانسفورماتور می‌باشد بطوریکه مراقبت پیشگیرانه و بهره‌برداری مناسب از آن می‌تواند نقش اساسی را در انتقال انرژی الکتریکی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه ایفاء نماید. همچنین در سالیان اخیر با توجه به هزینه‌های بالای تولید انرژی در جهان، صرفه جویی و نیز کاهش تلفات تجهیزات بمنظور افزایش بازده، بسیار مورد توجه می‌باشد. لذا، توجهات به سمت خرید ترانسفورماتورهایی با اتلاف کمتر جلب شده است.

ترانسفورماتورها معمولا برای کار در ولتاژ و فرکانس نامی و نیز جریان بار سینوسی کامل طراحی و ساخته می‌شوند. اما در دهۀ اخیر، با کاربرد روزافزون بارهای الکترونیک قدرت، به تدریج جریان بار ترانسفورماتورها از حالت سینوسی خارج و بارشان از بار خطی به غیرخطی تغییر یافته است که بدین‌ترتیب ولتاژ تغذیه نیز می‌تواند به هارمونیک آلوده گردد. از جمله منابع تولید هارمونیک می‌توان به یکسوسازها، کوره‌های قوس الکتریکی، کامپیوترها، لامپ‌های کم‌مصرف اشاره نمود.

در این پایان‌نامه، حسب پیچیدگی و هزینه‌های قابل‌ملاحظۀ روش‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی ترانسفورماتور تحت جریان و ولتاز غیرسینوسی به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL، انجام شده است. امروزه، این روش بطور گسترده‌ای در رشته‌های مختلف مهندسی بکار رفته و در آن مسئله، منطبق بر شرایط واقعی و با دقت بالایی لحاظ می‌گردد. بدین‌ترتیب با در نظر گرفتن شرایط مرزی اجزای مختلف ترانسفورماتور، با خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی واقعی و تقسیم هر یک از اجزاء آن (هسته، سیم‌پیچ، عایق‌ها و غیره) به اجزاء بسیار کوچکتری به نام المان یا مش، تغییرات پارامترهای مختلف نظیر شار، چگالی شار، نیروها، تلفات و غیره ناشی از تحریک‌های مختلف ترانسفورماتور، با دقت بالایی قابل شبیه‌سازی و محاسبه خواهد بود. برای اعتبارسنجی نتایج، پاسخ‌های روش اجزاء محدود با نتایج حاصل از روش‌های منتشر شده مقایسه شده است.

همچنین، از یک ترانسفورماتور نمونۀ آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر ولتاژهای غیرسینوسی بر تلفات بی‌باری آن استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی:

ترانسفورماتور، تلفات بارداری، تلفات بی‌باری، روش اجزاء محدود، هارمونیک جریان، هارمونیک ولتاژ.

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحات**

فصل اول

هارمونیک و منابع تولید آن در شبکه‌های الکتریکی ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تعریف هارمونیک ۳

۱-۳- تاریخچه بررسی هارمونیک ۳

۱-۴- مروری بر روابط و معادلات مربوط به اعوجاج هارمونیک، توان و ضریب قدرت ۴

۱-۵- محدودیت‌های مرتبط با وجود هارمونیک‌ها در شبکه‌های الکتریکی ۶

۱-۵-۱- محدودیت‌های اغتشاشات هارمونیک جریان ۶

۱-۵-۲- محدودیت‌های اغتشاشات هارمونیک ولتاژ ۶

۱-۶- منابع تولید هارمونیک در شبکه‌های الکتریکی ۶

۱-۶-۱- کوره‌های قوس الکتریکی ۹

۱-۶-۲- راکتور کنترل شده با تریستور ۱۲

۱-۶-۳- مشخصه غیرخطی ترانسفورماتور ۱۳

۱-۶-۴- جریان هجومی ترانسفورماتور ۱۶

۱-۶-۵- لامپ‌های تخلیه‌ای ۱۷

۱-۶-۶- اینورتر سه‌فاز ۱۸

۱-۶-۷- برخورد صاعقه به خط ۱۸

۱-۷- آثار سوء وجود هارمونیک در شبکه‌های الکتریکی ۱۹

فصل دوم

بررسی و مطالعه انواع تلفات در ترانسفورماتورها ۲۱

۲-۱- مقدمه ۲۲

۲-۲- مولفه‌های تلفات ترانسفورماتورها ۲۲

۲-۲-۱- تلفات بارداری ۲۳

۲-۲-۱-۱- تلفات اهمی ۲۴

۲-۲-۱-۲- تلفات جریان گردابی سیم پیچ‌ها ۲۵

۲-۲-۱-۳- سایر تلفات پراکندگی ۲۶

۲-۲-۲- تلفات بی باری ۲۶

۲-۲-۲-۱- تلفات هیسترزیس ۲۷

۲-۲-۲-۲- تلفات جریان گردابی هسته (فوکو) ۲۸

۲-۳- ساختار هسته و فرآیند چینش آن در ترانسفورماتورها ۲۹

۲-۳-۱- انواع مواد مورد استفاده در ساخت هسته ترانسفورماتورها ۲۹

۲-۳-۱-۱- فولاد سیلسیم‌دار ۲۹

۲-۳-۱-۲- ورقه‌های لیزری ۳۱

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحات**

۲-۳-۱-۳- هسته‌های آمورف ۳۲
۲-۳-۲- برش و پاکت‌بندی ورق‌های هسته ۳۳
۲-۳-۳- چینش هسته ۳۳

فصل سوم

مروری بر اثرات هارمونیک بر تلفات ترانسفورماتور ۳۵

۳-۱- مقدمه ۳۶
۳-۲- مهمترین روش‌های تعیین تلفات بارداری ترانسفورماتورها تحت بار غیرسینوسی ۳۶
۳-۲-۱- روش‌های مبتنی بر روابط تحلیلی ۳۷
۳-۲-۱-۱- روش بر پایه کاربرد استاندارد IEEE C 57.110 ..... ۳۷
۳-۲-۱-۲- روش ضریب تلفات هارمونیکی اصلاح شده ۴۱
۳-۲-۲- روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی‌های کامپیوتری ۴۳
۳-۲-۲-۱- روش‌های مبتنی بر مدلسازی مداری ۴۳
۳-۲-۲-۲- روش اجزاء محدود ۴۵
۳-۲-۳- روش‌های مبتنی بر تست آزمایشگاهی ۴۵
۳-۳- مهمترین روش‌های تعیین تلفات بی‌باری ترانسفورماتورها تحت ولتاژ غیرسینوسی ۴۸
۳-۳-۱- روش تحلیلی ۴۹
۳-۳-۱-۱- تاثیر ولتاژ غیرسینوسی بر تلفات هیسترزیس هسته ۴۹
۳-۳-۱-۲- تاثیر ولتاژ غیرسینوسی بر تلفات جریان گردابی (فوکو) هسته ۵۰
۳-۳-۱-۳- کل تلفات هسته ۵۱
۳-۳-۲- روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی کامپیوتری ۵۲
۳-۳-۳- روش آزمایشگاهی ۵۲

فصل چهارم

تشریح مراحل و نتایج شبیه‌سازی ۵۴

۴-۱- مقدمه ۵۵
۴-۲- تشریح روش تحلیل اجزاء محدود ۵۵
۴-۲-۱- مراحل تحلیل روش اجزاء محدود ۵۶
۴-۲-۲- روش‌های تحلیل و فرمولسازی ریاضی آن‌ها در روش اجزاء محدود ۵۷
۴-۲-۱-۱- روش تحلیل میدان مغناطیسی استاتیک ۵۷
۴-۲-۱-۲- روش تحلیل میدان الکتریکی استاتیک ۵۸
۴-۲-۱-۳- روش تحلیل الکترومغناطیسی شبه استاتیک ۵۸
۴-۲-۳- اعمال مدار خارجی به ترانسفورماتور در تحلیل به روش اجزاء محدود ۶۲

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحات**

۴-۳- روش‌های مدلسازی ترانسفورماتور در تحلیل اجزاء محدود ۶۳
۴-۳-۱- روش مدلسازی دوبعدی ۶۴
۴-۳-۲- روش مدلسازی سه‌بعدی ۶۴
۴-۳-۳- روش مدلسازی دوبعدی مضاعف ۶۵
۴-۴- شبیه‌سازی تعیین تلفات بارداری ترانسفورماتور تحت تغذیهٔ سینوسی و بار غیرخطی ۶۶
۴-۴-۱- شبیه‌سازی دوبعدی ۶۶
۴-۴-۱-۱- مدلسازی دوبعدی ترانسفورماتور شبیه‌سازی شده ۶۶
۴-۴-۱-۲- مدلسازی بار غیرخطی، تحریک و تعیین شرایط مرزی ۶۹
۴-۴-۱-۳- تعیین پارامترهای تحلیل مسئله و بررسی نتایج شبیه‌سازی دوبعدی ۷۲
۴-۴-۲- شبیه‌سازی سه‌بعدی ۷۷
۴-۵- شبیه‌سازی تعیین تلفات بی‌باری ترانسفورماتور تحت تغذیهٔ غیرسینوسی ۸۱
۴-۵-۱- مدلسازی سه‌بعدی ترانسفورماتور شبیه‌سازی شده ۸۱
۴-۵-۲- مدلسازی تغذیهٔ غیرسینوسی، تحریک و تعیین شرایط مرزی ۸۷
۴-۵-۳- تعیین پارامترهای تحلیل مسئله و بررسی نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی ۸۸
۴-۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود با استاندارد و روش‌های منتشر شده ۱۰۵
۴-۶-۱- مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تعیین تلفات بارداری ترانسفورماتور
تحت تغذیهٔ سینوسی و بار غیرخطی با روش‌های منتشر شده ۱۰۵
۴-۶-۱-۱- مقایسه با روش استاندارد IEEE C 57.110 ۱۰۵
۴-۶-۱-۲- مقایسه با روش ضریب تلفات هارمونیکی اصلاح شده ۱۰۷
۴-۶-۱-۳- مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مداری ۱۰۸
۴-۶-۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تعیین تلفات بی‌باری ترانسفورماتور
تحت ولتاژ تغذیهٔ غیرسینوسی با روش تحلیلی منتشر شده ۱۱۰

فصل پنجم

نتایج تست آزمایشگاهی ۱۱۲
۵-۱- مقدمه ۱۱۳
۵-۲- چیدمان مورد نیاز برای تست آزمایشگاهی ۱۱۳
۵-۲-۱- ترانسفورماتور نمونه مورد آزمایش ۱۱۳
۵-۲-۲- تجهیزات تولید کنندهٔ تغذیهٔ غیرسینوسی ۱۱۶
۵-۲-۳- تجهیزات بکار رفته در تست و اندازه‌گیری ۱۱۸
۵-۳- مراحل انجام و نتایج آزمایش ۱۱۹
۵-۳-۱- تلفات بی‌باری تحت تغذیهٔ سینوسی ۱۱۹
۵-۳-۲- تلفات بی‌باری تحت تغذیهٔ غیرسینوسی ۱۲۰
۵-۳-۲-۱- تحت زاویه آتش ثابت ۱۲۱
۵-۳-۲-۲- تحت ولتاژ ورودی ثابت ۱۲۲

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحات**

۵-۳-۳- مقایسهٔ تلفات بی‌باری تحت تغذیهٔ سینوسی و غیرسینوسی ۱۲۳

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۵

۶-۱- مقدمه ۱۲۶

۶-۲- نتیجه‌گیری ۱۲۷

۶-۳- پیشنهادات ۱۲۸

منابع و مراجع ۱۳۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **شماره صفحات**

فصل اول

شکل (۱-۱) : چگونگی تولید هارمونیک‌های جریان و ولتاژ ناشی از وجود بارهای غیرخطی ۸
شکل (۱-۲): شکل موج نمونهٔ ولتاژ در کورهٔ قوس الکتریکی ۱۰
شکل (۱-۳): شکل موج نمونهٔ جریان در کورهٔ قوس الکتریکی ۱۱
شکل (۱-۴): نمونهٔ طیف هارمونیکی جریان در یک کورهٔ قوس الکتریکی ۱۱
شکل (۱-۵): مدار یک راکتور کنترل شده با تریستور ۱۲
شکل (۱-۶): شکل موج‌های جریان بار برای سه زاویهٔ آتش ۹۰، ۱۲۰ و ۱۳۵ درجه ۱۳
شکل (۱-۷): منحنی مغناطیسی هستهٔ ترانسفورماتورها ۱۴
شکل (۱-۸): شمای یک ترانسفورماتور تکفاز دو سیم‌پیچه ۱۵
شکل (۱-۹): شکل موج شار، منحنی مغناطیسی و جریان تحریک بدون در نظر گرفتن پدیدهٔ هیسترزیس ۱۵
شکل (۱-۱۰): شکل موج شار، منحنی مغناطیسی و جریان تحریک با در نظر گرفتن پدیدهٔ هیسترزیس ۱۶
شکل (۱-۱۱): جریان هجومی یک ترانسفورماتور نمونه ۱۷
شکل (۱-۱۲): طیف فرکانسی جریان هجومی برای سه زاویهٔ کلیدزنی مختلف ولتاژ اعمالی ۱۷
شکل (۱-۱۳): شکل موج‌های نمونهٔ یک لامپ فلورسنت: الف) شکل موج ولتاژ، ب) شکل موج جریان ۱۸
شکل (۱-۱۴): اینورتر سه‌فاز: الف) اینورتر سه‌فاز متصل به یک بار سه‌فاز ، ب) شکل موج‌های خروجی، ولتاژ V_{An} و جریان i_A ۱۹

فصل دوم

شکل (۲-۱): مولفه‌های تلفات ترانسفورماتور ۲۳
شکل (۲-۲): میدان الکترومغناطیسی تولید شده در ترانسفورماتور ۲۵
شکل (۲-۳): مقایسهٔ ورق هستهٔ M5 و Hi-B از لحاظ منحنی مغناطیس‌شوندگی ۳۱
شکل (۲-۴): بهبود کیفیت ورق هسته‌های سرد نورد شدهٔ ترانسفورماتور در طول زمان ۳۲
شکل (۲-۵): سطح مقطع پاکت‌بندی شدهٔ هسته ۳۴

فصل سوم

شکل (۳-۱): تغییرات سایر تلفات پراکندگی نسبت به فرکانس مطابق روابط (۳-۱۰) و (۳-۱۱) ۴۰
شکل (۳-۲): تغییرات سایر تلفات پراکندگی نسبت به فرکانس مطابق روابط (۳-۱۰) و (۳-۱۲) ۴۰
شکل (۳-۳): یک رشته هادی واقع در یک میدان مغناطیسی عمود بر عرض آن ۴۲
شکل (۳-۴): مدار معادل واقعی ترانسفورماتورها ۴۴
شکل (۳-۵): مدار معادل ترانسفورماتور تحت بار غیرسینوسی (طرح اولیه) ۴۴
شکل (۳-۶): مدار معادل اصلاح شدهٔ ترانسفورماتور تحت بار غیرسینوسی ارجاع شده به سمت اولیه ۴۴
شکل (۳-۷): شکل موج ولتاژ و جریان هارمونیکی در حالت ۳ در [۴۴] ۴۷
شکل (۳-۸): تنظیمات تست آزمایشگاهی با منبع تغذیهٔ غیرسینوسی و بار غیرخطی در [۵۱-۵۰] ۵۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **شماره صفحات**

فصل چهارم

شکل (۴-۱): نمایش مش‌بندی یک شئ مورد بررسی به روش اجزاء محدود ۵۷
شکل (۴-۲): مدار معادل یک حلقه از سیم‌پیچ با توجه به معادله (۴-۳۵) ۶۳
شکل (۴-۳): برش عرضی ترانسفورماتور مورد مطالعه ۶۸
شکل (۴-۴): مدل دوبعدی ترانسفورماتور مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.10 ..... ۶۹
شکل (۴-۵): منحنی B-H هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه ۶۹
شکل (۴-۶): شکل موج جریان بار غیرسینوسی مربوط به بار غیرخطی نوع اول ۷۱
شکل (۴-۷): شکل موج جریان بار غیرسینوسی مربوط به بار غیرخطی نوع دوم ۷۱
شکل (۴-۸): نمایی از مدل مش‌زده شدهٔ دوبعدی ترانسفورماتور مورد مطالعه ۷۳
شکل (۴-۹): جریان بارغیرسینوسی برای بار غیرخطی نوع اول در نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.10 ..... ۷۴
شکل (۴-۱۰): جریان بارغیرسینوسی برای بار غیرخطی نوع دوم در نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.10 ..... ۷۴
شکل (۴-۱۱): چگالی شار در هسته ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از تحریک سیم‌پیچ‌ها با
جریان بارغیرسینوسی اول در محیط نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.10 ..... ۷۵
شکل (۴-۱۲): چگالی شار در هسته ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از تحریک سیم‌پیچ‌ها با
جریان بارغیرسینوسی دوم در محیط نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.10 ..... ۷۵
شکل (۴-۱۳): توزیع خطوط شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از
تحریک سیم‌پیچ‌ها با جریان بارغیرسینوسی اول در محیط نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.10 ..... ۷۶
شکل (۴-۱۴): توزیع خطوط شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور مورد مطالعه ناشی از
تحریک سیم‌پیچ‌ها با جریان بارغیرسینوسی دوم در محیط نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.10 ..... ۷۶
شکل (۴-۱۵): مدل سه‌بعدی ترانسفورماتور مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.12 ..... ۷۸
شکل (۴-۱۶): شکل موج جریان بار غیرسینوسی مربوط به بار غیرخطی مندرج در جدول (۴-۸) ۱۰۹
شکل (۴-۱۷): چگالی شار در هسته ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت جریان بارغیرسینوسی در محیط
نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.12 ..... ۸۰
شکل (۴-۱۸): توزیع خطوط شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت جریان بارغیرسینوسی در محیط
نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.12 ..... ۸۰
شکل (۴-۱۹): نمایی دوبعدی از برش عرضی ساختمان ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۲
شکل (۴-۲۰): نمایی سه‌بعدی از سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۳
شکل (۴-۲۱): نمایی دوبعدی از برش عرضی سیم‌پیچی فشار ضعیف ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۳
شکل (۴-۲۲): نمایی دوبعدی از برش عرضی سیم‌پیچی فشار قوی ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۳
شکل (۴-۲۳): نمونه‌ای از تخصیص جنس و خواص فیزیکی به مواد در محیط
نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.13 ..... ۸۵
شکل (۴-۲۴): منحنی چگالی شار برحسب تلفات (B-P) برگرفته از اطلاعات کارخانه سازنده ۸۵
شکل (۴-۲۵): مدل سه‌بعدی ترانسفورماتور مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.13 ..... ۸۶
شکل (۴-۲۶): مدل دوبعدی ترانسفورماتور مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار Ansoft-MAXWELL v.13 ..... ۸۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **شماره صفحات**

شکل (۴-۲۷): کوپلینگ مدل مغناطیسی ترانسفورماتور مورد مطالعه با مدار خارجی تحریک در محیط نرم‌افزار Ansoft-SIMPLORER v.8 ..... ۸۷
شکل (۴-۲۸): نمایی از مدل سه‌بعدی مش‌زده شدهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۹
شکل (۴-۲۹): تغییرات تعداد مش‌ها (چهاروجهی‌ها) در طی هر مرحله از فرآیند مش‌زدن اجزاء ترانسفورماتور مورد مطالعه ۹۰
شکل (۴-۳۰): تغییرات خطای انرژی در طی هر مرحله از فرآیند مش‌زدن اجزاء ترانسفورماتور مورد مطالعه ۹۰
شکل (۴-۳۱): ولتاژ سینوسی اعمال شده به سیم‌پیچ ترانسفورماتور مورد مطالعه ۹۱
شکل (۴-۳۲): جریان هجومی کشیده شده توسط ترانسفورماتور مورد مطالعه به هنگام اعمال تحریک سینوسی به سیم‌پیچ فشار ضعیف ۹۲
شکل (۴-۳۳): جریان تحریک ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک سینوسی ۹۲
شکل (۴-۳۴): نمودار تغییرات تلفات هسته بر حسب زمان برای ترانسفورماتور مورد مطالعه و تحت تحریک سینوسی ۹۳
شکل (۴-۳۵): چگالی شار هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک سینوسی ۹۳
شکل (۴-۳۶): توزیع خطوط شار مغناطیسی هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک سینوسی ۹۴
شکل (۴-۳۷): توزیع شدت میدان مغناطیسی در سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک سینوسی ۹۴
شکل (۴-۳۸): تحریک سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مورد مطالعه با تغذیهٔ (ولتاژ) غیرسینوسی اول ۹۵
شکل (۴-۳۹): نمودار تغییرات تلفات هسته بر حسب زمان برای ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی اول ۹۶
شکل (۴-۴۰): چگالی شار هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی اول ۹۶
شکل (۴-۴۱): توزیع خطوط شار مغناطیسی درون هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی اول ۹۷
شکل (۴-۴۲): جریان تحریک ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی اول ۹۷
شکل (۴-۴۳): تحریک سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مورد مطالعه با تغذیهٔ غیرسینوسی دوم ۹۸
شکل (۴-۴۴): نمودار تغییرات تلفات هسته بر حسب زمان برای ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی دوم ۹۸
شکل (۴-۴۵): چگالی شار هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی دوم ۹۹
شکل (۴-۴۶): توزیع خطوط شار مغناطیسی درون هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی دوم ۹۹
شکل (۴-۴۷): تحریک سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مورد مطالعه با تغذیهٔ غیرسینوسی سوم ۱۰۰
شکل (۴-۴۸): نمودار تغییرات تلفات هسته بر حسب زمان برای ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی سوم ۱۰۰
شکل (۴-۴۹): چگالی شار هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی سوم ۱۰۱
شکل (۴-۵۰): تحریک سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مورد مطالعه با تغذیهٔ غیرسینوسی چهارم ۱۰۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **شماره صفحات**

شکل (۴-۵۱): نمودار تغییرات تلفات هسته بر حسب زمان برای ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی چهارم ۱۰۲
شکل (۴-۵۲): چگالی شار هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی چهارم ۱۰۲
شکل (۴-۵۳): توزیع خطوط شار مغناطیسی درون هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی چهارم ۱۰۳
شکل (۴-۵۴): تحریک سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مورد مطالعه با تغذیهٔ غیرسینوسی پنجم ۱۰۳
شکل (۴-۵۵): نمودار تغییرات تلفات هسته بر حسب زمان برای ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی پنجم ۱۰۴
شکل (۴-۵۶): چگالی شار هستهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت تحریک غیرسینوسی پنجم ۱۰۴
شکل (۴-۵۷): مدلسازی تلفات بارداری ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت جریان بار غیرسینوسی در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK ۱۱۰

فصل پنجم

شکل (۵-۱): نمایی از سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی ۱۱۴
شکل (۵-۲): نمایی از ورقه‌های E و I هستهٔ ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی ۱۱۵
شکل (۵-۳): نمایی از هسته و سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی بعد از مونتاژ ۱۱۶
شکل (۵-۴): نمایی از دو تریستور موازی-معکوس بکار رفته برای تغذیهٔ غیرسینوسی ترانسفورماتور آزمایشگاهی ۱۱۷
شکل (۵-۵): نمایی از تجهیزات کنترلی مورد استفاده جهت کنترل زاویهٔ آتش دو تریستور موازی-معکوس بکار رفته برای غیرسینوسی نمودن تغذیهٔ ترانسفورماتور نمونه آزمایشگاهی ۱۱۷
شکل (۵-۶): نمایی از تجهیز مورد استفاده در اندازه‌گیری‌ها (C.A 8310) ۱۱۸
شکل (۵-۷): نمایی از اتصالات و پورت C.A 8310 ..... ۱۱۹
شکل (۵-۸): جریان تحریک ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی تحت ولتاژ سینوسی نامی پایانه ۱۲۰
شکل (۵-۹): نمونه‌ای از شکل موج ولتاژ و جریان بی‌باری ترانسفورماتور در زاویهٔ آتش ۶۳ درجه و ولتاژ ورودی ۲۱۰ ولت و تحلیل هارمونیکی آن‌ها ۱۲۱
شکل (۵-۱۰): نمونه‌ای از شکل موج ولتاژ و جریان بی‌باری ترانسفورماتور در ولتاژ ورودی ۱۸۰ ولت و زاویهٔ آتش ۵۸ درجه به همراه تحلیل هارمونیکی آن‌ها ۱۲۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **شماره صفحات**

فصل اول

جدول (۱-۱): محدودیت‌های هارمونیک جریان بر اساس استاندارد IEEE 519 ..... ۷
جدول (۱-۲): محدودیت‌های هارمونیک ولتاژ بر اساس استاندارد IEEE 519 ..... ۷
جدول (۱-۳): نمایش محتوای هارمونیکی جریان یک کورهٔ قوس نمونه بر حسب درصد ۱۰

فصل دوم

-

فصل سوم

جدول (۳-۱): نتایج تست آزمایشگاهی تحت بار هارمونیکی در [۴۴] ۴۷

فصل چهارم

جدول (۴-۱): مشخصات الکتریکی ترانسفورماتور مورد مطالعه در شبیه‌سازی دوبعدی ۶۷
جدول (۴-۲): ابعاد هسته و سیم‌پیچ ترانسفورماتور مورد مطالعه در شکل (۴-۳) ۶۸
جدول (۴-۳): محتوای هارمونیکی جریان بار غیرخطی نوع اول ۷۰
جدول (۴-۴): محتوای هارمونیکی جریان بار غیرخطی نوع دوم ۷۰
جدول (۴-۵): شرایط مرزی سادهٔ مورد استفاده در روش اجزای محدود ۷۲
جدول (۴-۶): نتایج تعیین تلفات بارداری ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت جریان‌های بار سینوسی و غیرسینوسی به روش اجزای محدود ۷۳
جدول (۴-۷): مشخصات الکتریکی ترانسفورماتور مورد مطالعه در شبیه‌سازی سه‌بعدی ۷۸
جدول (۴-۸): محتوای هارمونیکی بار غیرخطی مورد مطالعه در شبیه‌سازی سه‌بعدی ۷۹
جدول (۴-۹): نتایج تعیین تلفات ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت جریان‌های بار سینوسی و غیرسینوسی به روش اجزای محدود ۷۹
جدول (۴-۱۰): مشخصات هندسی سیم‌پیچی فشار ضعیف ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۴
جدول (۴-۱۱): مشخصات هندسی سیم‌پیچی فشار قوی ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۴
جدول (۴-۱۲): انواع پروفیل‌های مختلف ولتاژ غیرسینوسی برای تغذیهٔ ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۷
جدول (۴-۱۳): مشخصات مش‌بندی اجزاء مختلف ترانسفورماتور مورد مطالعه ۸۹
جدول (۴-۱۴): تلفات بی‌باری ترانسفورماتور مورد مطالعه تحت انواع تحریک سینوسی و غیرسینوسی ۹۱
جدول (۴-۱۵): نحوهٔ محاسبه ضرایب تلفات هارمونیکی با استفاده از روش IEEE C 57.110 ..... ۱۰۶
جدول (۴-۱۶): محاسبه تلفات ترانسفورماتور تحت جریان بار غیرسینوسی اول با استفاده از روش استاندارد IEEE C 57.110 ..... ۱۰۶
جدول (۴-۱۷): مقایسهٔ نتایج تعیین تلفات بارداری تحت جریان بار غیرسینوسی ناشی از بار غیرخطی اول حاصل از روش اجزاء محدود و روش استاندارد IEEE C 57.110 ..... ۱۰۷
جدول (۴-۱۸): نحوهٔ محاسبه ضریب تلفات هارمونیکی اصلاح شده ۱۰۷

فهرست جدول‌ها

عنوان **شماره صفحات**

جدول (۴-۱۹): محاسبه تلفات ترانسفورماتور تحت جریان بار غیرسینوسی اول با استفاده از روش ضریب تلفات هارمونیکی اصلاح شده ۱۰۸
جدول (۴-۲۰): مقایسهٔ نتایج تعیین تلفات بارداری تحت جریان بار غیرسینوسی ناشی از بار غیرخطی اول حاصل از روش اجزاء محدود و روش ضریب تلفات هارمونیکی اصلاح شده ۱۰۸
جدول (۴-۲۱): اطلاعات تکمیلی مربوط به مشخصات الکتریکی-مداری ترانسفورماتور مورد مطالعه برای شبیه سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK ۱۰۹
جدول (۴-۲۲): مقایسهٔ نتایج تعیین تلفات بارداری تحت جریان بار غیرسینوسی ناشی از بار غیرخطی اول حاصل از روش اجزاء محدود و روش مدلسازی مداری ۱۰۹
جدول (۴-۲۳): مقایسهٔ نتایج تعیین تلفات بی‌باری تحت ولتاژ غیرسینوسی حاصل از روش اجزاء محدود و روش تحلیلی ۱۱۱

فصل پنجم

جدول (۵-۱): مشخصات الکتریکی ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی ۱۱۵
جدول (۵-۲): تلفات بی‌باری ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی تحت تغذیهٔ سینوسی ۱۲۰
جدول (۵-۳): تلفات بی‌باری ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی تحت تغذیهٔ غیرسینوسی با زاویهٔ آتش ثابت ۶۳ درجه ۱۲۱
جدول (۵-۴): تلفات بی‌باری ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی تحت تغذیهٔ غیرسینوسی با ولتاژ ثابت ۱۸۰ ولت ۱۲۲
جدول (۵-۵): مقایسهٔ تلفات بی‌باری ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی مورد مطالعه تحت ولتاژ تغذیهٔ سینوسی و غیرسینوسی ۱۲۳
جدول (۵-۶): درصد افزایش تلفات بی باری در حالت غیرسینوسی نسبت به حالت سینوسی ولتاژ تغذیه ترانسفورماتور نمونهٔ آزمایشگاهی ۱۲۴

فصل پنجم

–

فصل اول
هارمونیک و منابع تولید آن در شبکه‌های الکتریکی

۱-۱ مقدمه

ترانسفورماتورها برای کار در ولتاژ و فرکانس نامی و نیز جریان بار سینوسی کامل ساخته می‌شوند در دهه‌های اخیر، جهت بهبود راندمان و نیز کنترل مناسب تجهیزات الکتریکی از ادوات الکترونیک قدرت مختلف استفاده شده است. در این میان، بارهای غیرخطی نظیر یکسوکننده‌ها، اینورترها، کوره‌های قوس الکتریکی و راکتورهای کنترل شده با تریستور، به عنوان عوامل مؤثر در ایجاد اعوجاج شکل موج ولتاژ و جریان محسوب می‌شوند. همچنین، کاربرد گستردهٔ بارهای غیرخطی که مشخصه هارمونیکی[۱] دارند نگرانی‌هایی را در همهٔ سطوح تولید، انتقال و توزیع، به سبب تاثیرشان بر ترانسفورماتورها، ایجاد نموده است. افزایش در میزان محتوای هارمونیکی ولتاژ تغذیه و جریان بار، موجب ایجاد تلفات اضافی در سیم‌پیچ‌ها و هسته و همچنین افزایش دمای نقطهٔ داغ[۲] ترانسفورماتور، افزایش تنش روی عایق‌ها و کاهش عمر مفید آن‌ها و در نهایت کاهش طول عمر ترانسفورماتور می‌گردد. لذا برای جلوگیری از بروز این مشکلات باید میزان این هارمونیک‌ها را کاهش داد. لازم به ذکر است که هارمونیک‌ها یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین حوادث[۳] کیفیت توان[۴] تلقی شده و لذا بطور مستقیم بر نحوه عملکرد و میزان قابلیت اطمینان شبکه‌های الکتریکی مؤثر می‌باشند [۴-۱].

در این فصل، ابتدا تعریف و سپس مختصر تاریخچه‌ای در خصوص هارمونیک‌ها ارائه می‌گردد. همچنین، روابط و معادلات مربوط به محاسبه اعوجاجات هارمونیکی و محدودیت‌های مرتبط با آن‌ها در شبکه‌های الکتریکی از دیدگاه استانداردها تشریح شده است. سپس مهمترین منابع و عوامل ایجاد و تولید هارمونیک در شبکه‌های الکتریکی معرفی می‌گردند.

---

[۱] *Harmonic*
[۲] *Hot Spot Temperature*
[۳] *Events*
[۴] *Power Quality*

۱-۲ تعریف هارمونیک

هر شکل موج غیرسینوسی را می‌توان با استفاده از بسط سری فوریه، بصورت مجموع جملات سینوسی و کسینوسی به اضافه یک مؤلفه DC بیان نمود که هر یک از جملات سینوسی یا کسینوسی دارای فرکانسی از مضارب صحیح فرکانس اصلی (فرکانس شبکه) می‌باشند. به هر یک از این فرکانس‌ها، " هارمونیک " اطلاق می‌شود [۵-۳].

$$v(t) = V_{DC} + \sum_{h=1}^{\infty} V^{(h)} \cos(h\omega_0 t + \theta_h) = V_{DC} + v^{(1)}(t) + v^{(2)}(t) + v^{(3)}(t) + v^{(4)}(t) + \dots \qquad (۱-۱)$$

که در رابطهٔ فوق، ω_0 فرکانس زاویه‌ای اصلی، $V^{(h)}$ هارمونیک hام ولتاژ غیرسینوسی و θ_h زاویه فاز هر یک از مؤلفه‌های هارمونیک است. شکل‌موج‌های غیرسینوسی می‌توانند دارای هارمونیک‌های زوج[۵]، فرد[۶]، زیرهارمونیک و یا میان‌هارمونیک[۷] باشند.

۱-۳ تاریخچه بررسی هارمونیک

برای نخستین بار در سال ۱۹۸۵ کتاب " هارمونیک‌های سیستم قدرت " توسط آریلاگا و همکاران او منتشر شد [۷-۶]. این کتاب ضمن جمع‌بندی تجربیات دهه‌های قبل، به توصیف دلایل وجود ولتاژها و جریان‌های هارمونیکی و همچنین شیوه‌های اندازه‌گیری آن‌ها پرداخته بود.

ادوارد اوئن در سال ۱۹۹۸ میلادی، تاریخچه‌ای را در مورد هارمونیک‌ها در شبکهٔ قدرت منتشر نمود. او از تجربه شهر هارتفورد آمریکا در سال ۱۸۹۳ میلادی به عنوان اولین مشکل ناشی از هارمونیک‌ها یاد می‌کند و اینکه مهندسین برق با مشکل گرم شدن بیش از حد یک موتور الکتریکی و خرابی عایق‌بندی آن مواجه شده بودند. تنها علت ممکن برای این مشکل، یک خط انتقال یک مایلی در هارتفورد تشخیص داده شد. به منظور پیدا کردن دلیل این مشکل، تحلیل هارمونیکی بر روی شکل موج‌های جریان و ولتاژ خط انتقال انجام گرفت. نتایج بدست آمده عامل گرم شدن موتور را تشدید ایجاد شده در خط انتقال ناشی از وجود هارمونیک‌ها تشخیص داد. همچنین، اختلالات تلفنی ایجاد شده در یک کارخانهٔ تخلیص مس در سالت‌لیک‌سیتی[۸] و نیز معادن شرق کانادا از جمله اولین موارد می‌باشند [۹-۶].

---

[۵] *Even Harmonics*
[۶] *Odd Harmonics*
[۷] *Inter Harmonics*
[۸] *Salt Lake City*

در سال ۱۸۹۵، شرکت‌های وستینگهاوس و جنرال‌الکتریک، طرح‌های جدیدی را برای ساخت ژنراتور معرفی نمودند که در طرح‌های جدید از سیم‌پیچ‌های توزیع شده در آرمیچر استفاده کرده و به تبع آن شکل موج ایجاد شده توسط ژنراتور را بهبود بخشیده و به اصطلاح سینوسی‌تر نمودند [۶].

همچنین، تاثیر جریان‌های بار غیرسینوسی (هارمونیکی) بر تلفات و افزایش دمای ترانسفورماتورها، اولین بار در مارس ۱۹۸۰ و در کمیتهٔ ترانسفورماتور انجمن بین‌المللی برق و الکترونیک[۹] مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در آن جلسه پیشنهاد شد که روشی برای تخمین تلفات و ظرفیت بارگیری ترانسفورماتور بر اساس میزان اعوجاج جریان بار تدوین گردد. در ماه مه همان سال، یک کارگروه مطالعاتی تشکیل شد که ۲۲ نماینده از کارخانجات سازنده و همچنین مصرف‌کنندگان، اعضای آن را تشکیل می‌دادند. در نشست سالیانهٔ ۱۹۸۱، مقاله‌ای توسط A. D. Kline از شرکت ترانسفورماتور Southern ارائه شد. بر اساس پیشنهادات موجود در آن مقاله و پس از چندین پیش‌نویس، استاندارد IEEE C 57.110 در سال ۱۹۸۶ با عنوان " اقدامات پیشنهادی برای تعیین ظرفیت ترانسفورماتور تحت جریان بار غیرسینوسی " منتشر شد [۱۱-۱۰].

۱-۴ مروری بر روابط و معادلات مربوط به اعوجاج هارمونیک، توان و ضریب قدرت

به دلیل وجود منابع هارمونیکی در شبکه‌های الکتریکی، پارامترهای شبکه، اغلب آلوده به هارمونیک می‌باشند. لذا پارامترهایی نظیر اعوجاج هارمونیکی کل[۱۰]، توان ظاهری، توان اکتیو، توان راکتیو و ضریب قدرت در حضور هارمونیک‌ها توصیف شده است.

برای شکل‌موج‌های جریان و ولتاژ منبع (V_s و I_s) که از حالت سینوسی خارج شده و بصورت غیرسینوسی باشند مقادیر مؤثر با روابط زیر تعریف می‌شوند [۶ و ۱۰]:

$$I_s = \sqrt{I_{so}^2 + \sum_{h=1} I_{sh}^2} \qquad (۲-۱)$$

$$V_s = \sqrt{V_{so}^2 + \sum_{h=1} V_{sh}^2} \qquad (۳-۱)$$

در روابط فوق، I_{so} مؤلفه DC جریان، V_{so} مؤلفه DC ولتاژ، V_{sh} مقدار مؤثر ولتاژ هارمونیک hام و I_{sh} مقدار مؤثر جریان هارمونیک hام می‌باشد. این روابط، برای محاسبه اعوجاج هارمونیکی کل مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی در اغلب شکل موج‌های جریان یا ولتاژ متناوب، مقدار متوسط یا مقدار DC برابر با صفر می‌باشد.

---

[۹] *IEEE*

[۱۰] *Total Harmonic Distortion*

روابط اعوجاج هارمونیکی کل جریان و ولتاژ بصورت زیر توصیف می‌شوند [۶ و ۱۰]:

$$\%THD_i = 100 \times \sqrt{\sum_{h=2} (\frac{I_{sh}}{I_{s1}})^2} \quad (۴-۱)$$

$$\%THD_v = 100 \times \sqrt{\sum_{h=2} (\frac{V_{sh}}{V_{s1}})^2} \quad (۵-۱)$$

متوسط توان تحویلی به بار با منبع ولتاژ سینوسی و جریان غیرسینوسی برابر است با [۶ و ۱۰]:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T v_s i_{s1} dt = V_{s1} I_{s1} \cos\phi_1 \quad (۶-۱)$$

در رابطه فوق، V_{s1} مقدار مؤثر ولتاژ منبع سینوسی، I_{s1} مقدار مؤثر مؤلفه اصلی جریان غیرسینوسی و ϕ_1 زاویه فاز بین ولتاژ V_{s1} و مؤلفه اصلی جریان I_{s1} می‌باشد. در واقع مؤلفه‌های هارمونیکی جریان در متوسط توان اکتیو کشیده شده از منبع تاثیری ندارند و تنها مؤلفه اول در این توان تاثیرگذار می‌باشد.

توان ظاهری تولید شده توسط ولتاژ و جریان مؤثر برابر است با:

$$S = V_s I_s \quad (۷-۱)$$

بنابراین ضریب قدرت[۱۱] شبکه نیز به صورت زیر توصیف می‌شود [۶ و ۱۰]:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (۸-۱)$$

$$PF = \frac{V_S I_{S1} \cos\phi_1}{V_S I_S} = \frac{I_{S1}}{I_S} \cos\phi_1 \quad (۹-۱)$$

شکل موج غیرسینوسی جریان سبب می‌شود که مقدار $\frac{I_{s1}}{I_s}$ کمتر شده و در نتیجه ضریب قدرت نیز کاهش یابد. در مدارهای خطی با جریان و ولتاژ سینوسی، ضریب قدرت همان $\cos\varphi$ می‌باشد اما در مدارهای غیرخطی با جریان‌های هارمونیکی ضریب قدرت برابر با رابطهٔ (۱-۹) است. در این مدارها، $\cos\varphi_1$ ضریب جابجایی[۱۲] نامیده می‌شود [۶ و ۱۰].

[۱۱] *Power Factor*
[۱۲] *Displacement Factor*