دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی نوشیروانی بابل

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته برق-قدرت

موضوع:

بررسی تداخلهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتورهای فرکانس بالا در منابع تغذیه سوئیچینگ با استفاده از شبیه سازی المان محدود

استاد راهنما:
جناب آقای دکتر عبدالحسین طحانی

استاد مشاور:
جناب آقای دکتر فیروز زارع

نام دانشجو:
سینا عمرانی ساروی

شهریور ۱۳۸۷

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

آنان که توانشان رفت تا به توانایی برسم و مویشان سپید گشت تا رویم سپید بماند.
آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایه های جاودانی من است.

سپاسگزاری

بر خود می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و حمایت‌های همه جانبه استاد ارجمند جناب آقای دکتر طحانی و همچنین راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرامی جناب آقای دکتر زارع در راستای انجام این پایان‌نامه تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

هدف اصلی این پایان‌نامه افزایش سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) ترانسفورماتورهای فرکانس بالای مبدل‌های فلایبک، از طریق کاهش اندازه خازن‌های پراکنده موجود در آنها می‌باشد. برای نیل به این منظور از آنجا که اندازه خازن‌های پراکنده به ساختار و نحوه سیم‌پیچی بستگی دارد، انواع تکنیک‌های متداول سیم‌پیچی برای این ترانسفورماتورهای فرکانس بالا بکار گرفته شد و تاثیر هر یک از این تکنیک‌ها برروی خازن‌های پراکنده موجود در نقاط مختلف ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تغییراتی در این تکنیک‌های متداول سیم‌پیچی اعمال شد و اثرات حاصله در خازن‌های پراکنده این ترانسفورماتورها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پس از انجام مطالعات و شبیه‌سازی‌ها، تکنیک‌های بهینه پیشنهادی جهت کاهش تداخل‌های الکترومغناطیسی (EMI) در ترانسفورماتورهای فرکانس بالای مبدل فلایبک معرفی گردید. برای طراحی و محاسبه پارامترهای فیزیکی این ترانسفورماتورها (مانند نوع وسایز هسته، سطح مقطع هادی‌ها، تعداد دورهای اولیه و ثانویه و غیره) نرم‌افزار PI Expert بکار گرفته شد. همچنین برای تحلیل‌های الکتریکی و مغناطیسی و یافتن اندازه خازن‌های پراکنده در ترانسفورماتورهای مورد بحث از نرم‌افزار Maxwell استفاده گردید. مشخصه‌های تداخل‌های الکترومغناطیسی نیز از طریق شبیه‌سازی مبدل‌ها در نرم‌افزار Matlab بدست آمد.

واژه‌های کلیدی

تداخل‌های الکترومغناطیسی، خازن‌های پراکنده، ترانسفورماتور فرکانس بالا، مبدل فلایبک

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
فصل اول- ترانسفورماتورها	۳
۱ـ۱ـ پیدایش ترانسفورماتورهای قدرت	۴
۱ـ۲ـ پیدایش ترانسفورماتورهای قدرت فرکانس بالا	۶
۱ـ۳ـ تئوری پایه ترانسفورماتور	۸
۱ـ۴ـ ترانسفورماتورهای فرکانس بالا در منابع تغذیه سوئیچینگ	۱۲
۱ـ۴ـ۱ـ مبدل فلایبک	۱۲
۱ـ۴ـ۲ـ مبدل فوروارد	۱۵
۱ـ۴ـ۳ـ مبدل پوش ـ پول	۱۸
۱ـ۴ـ۴ـ مبدل نیم‌پل	۲۰
۱ـ۴ـ۵ـ مبدل پل	۲۱
فصل دوم- اصول سازگاری الکترومغناطیسی	۲۴
۲ـ۱ـ مقدمه	۲۵
۲ـ۲ـ میدان‌ها بعنوان منبع اصلی تداخل الکترومغناطیسی	۲۶
۲ـ۳ـ انواع کوپلینگ (تزویج) الکترومغناطیسی	۲۷
۲ـ۳ـ۱ـ مدل مقدماتی کوپلینگ تداخل الکترومغناطیسی	۲۷
۲ـ۳ـ۲ـ کوپلینگ امپدانسی	۲۹
۲ـ۳ـ۳ـ کوپلینگ القایی	۳۱
۲ـ۳ـ۳ـ۱ـ وابستگی هندسی کوپلینگ القایی	۳۲
۲ـ۳ـ۳ـ۲ـ وابستگی فرکانسی کوپلینگ القایی	۳۴

۲ـ۳ـ۴ـ کوپلینگ خازنی ۳۸
۲ـ۳ـ۵ـ کوپلینگ تشعشعی ۴۰
۲ـ۴ـ اندازه‌گیری تداخل الکترومغناطیسی ۴۲
فصل سوم- طراحی ترانسفورماتورهای فرکانس بالا برای منابع تغذیه فلایبک ۴۷
۳ـ۱ـ مقدمه ۴۸
۳ـ۲ـ عملکرد منبع تغذیه فلایبک ۴۸
۳ـ۳ـ طراحی ترانسفورماتورهای مبدل فلایبک ۵۲
فصل چهارم- مدارات معادل ترانسفورماتورهای فرکانس بالا ۶۳
۴ـ۱ـ مقدمه ۶۴
۴ـ۲ـ انواع مدارات معادل ترانسفورماتورهای فرکانس بالا ۶۴
۴ـ۳ـ مدار معادل پیشنهادی برای ترانسفورماتورهای فرکانس بالای مبدل فلایبک ۷۵
فصل پنجم- افزایش سازگاری الکترومغناطیسی ترانسفورماتورهای فرکانس بالا از طریق کاهش خازن‌های پراکنده ۸۰
۵ـ۱ـ مقدمه ۸۱
۵ـ۲ـ طراحی ترانسفورماتورهای فرکانس بالای مبدل فلایبک و انواع تکنیک‌های سیم‌پیچی برای آنها ۸۲
۵ـ۳ـ بررسی تاثیر تکنیک‌های مختلف سیم‌پیچی بر روی مقدار هر یک از خازن‌های پراکنده ۸۹
۵ـ۴ـ بررسی تداخل‌های الکترومغناطیسی ترانسفورماتورهای فرکانس بالای مبدل فلایبک ۹۸
فصل ششم- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۱۰۱
۶ـ۱ـ نتیجه‌گیری ۱۰۲
۶ـ۲ـ پیشنهادات ۱۰۳
پیوست ۱۰۴
منابع و مراجع ۱۱۰

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۲ـ۱ـ مشخصات اصلی انواع کوپلینگ تداخل الکترومغناطیسی	۲۸
جدول ۲ـ۲ـ برخی از مقادیر فرکانس‌ها و طول موج‌های متناظر آنها	۴۱
جدول ۵ـ۱ـ پارامترهای طراحی شده توسط نرم‌افزار PI Expert برای یک نمونه ترانسفورماتور فرکانس بالا	۸۳
جدول ۵ـ۲ـ کلیه خازن‌های پراکنده موجود در ترانسفورماتورهای فرکانس بالای مبدل فلایبک	۸۹
جدول ۵ـ۳ـ مقادیر خازن‌های پراکنده مربوط به ترانسفورماتور T_1 با سطح توانی ۲۷/۵ W و ولتاژ خروجی ۵ V	۹۰
جدول ۵ـ۴ـ مقادیر خازن‌های پراکنده مربوط به ترانسفورماتور T_2 با سطح توانی ۵۵ W و ولتاژ خروجی ۵ V	۹۱
جدول ۵ـ۵ـ مقادیر خازن‌های پراکنده مربوط به ترانسفورماتور T_3 با سطح توانی ۶۴ W و ولتاژ خروجی ۱۵ V	۹۱
جدول پ ـ۱ـ پارامترهای طراحی شده توسط نرم‌افزار PI Expert برای ترانسفورماتور فرکانس بالای T_2	۱۰۵
جدول پ ـ۲ـ پارامترهای طراحی شده توسط نرم‌افزار PI Expert برای ترانسفورماتور فرکانس بالای T_3	۱۰۶

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱ـ۱ـ دیاگرام اجمالی یک ترانسفورماتور	۹
شکل ۱ـ۲ـ مدل ترانسفورماتورهای ایده‌آل	۱۰
شکل ۱ـ۳ـ مدل ترانسفورماتورهای واقعی	۱۱
شکل ۱ـ۴ـ مدار معادل یک ترانسفورماتور با باند وسیع	۱۱
شکل ۱ـ۵ـ مبدل فلایبک و مدل ترانسفورماتور آن	۱۲
شکل ۱ـ۶ـ الف) مبدل فلایبک در حالت ذخیره انرژی، ب) مبدل فلایبک در حال انتقال انرژی	۱۳
شکل ۱ـ۷ـ شکل موج‌های ولتاژ اولیه ترانسفورماتور (v_L)، جریان خازن خروجی (i_C) و جریان منبع ورودی (i_g)	۱۴
شکل ۱ـ۸ـ مدار پایه مبدل فوروارد و مدل ترانسفورماتور آن	۱۵
شکل ۱ـ۹ـ عملکرد مبدل فوروارد در حالت وصل سوئیچ Q_1	۱۶
شکل ۱ـ۱۰ـ عملکرد مبدل فوروارد در حالت قطع سوئیچ Q_1	۱۶
شکل ۱ـ۱۱ـ شکل موج‌های ولتاژ اولیه ترانسفورماتور (v_1)، جریان مغناطیس‌کنندگی (i_M) و ولتاژ دیود هرزگرد (v_{D3}) در مبدل فوروارد.	۱۷
شکل ۱ـ۱۲ـ مدار پایه مبدل پوش ـ پول	۱۸
شکل ۱ـ۱۳ـ شکل موج های پارامترهای مختلف مدار مبدل پوش ـ پول	۱۹
شکل ۱ـ۱۴ـ مدار پایه مبدل نیم‌پل	۲۰
شکل ۱ـ۱۵ـ مدار پایه مبدل پل و مدل ترانسفورماتور آن	۲۱
شکل ۱ـ۱۶ـ شکل موج‌های پارامترهای مختلف مدار مبدل پل	۲۲
شکل ۲ـ۱ـ مدل مقدماتی کوپلینگ تداخل الکترومغناطیسی	۲۸
شکل ۲ـ۲ـ کوپلینگ امپدانسی	۲۹
شکل ۲ـ۳ـ کوپلینگ امپدانسی، مدل ساده	۳۰

شکل ۲ـ۴ـ کوپلینگ القایی الف) مدل میدان، ب) مدار معادل ۳۲

شکل ۲ـ۵ـ الف) یک خط تنها و یک خط رفت و برگشت بعنوان منبع میدان مغناطیسی ب) یک مدار الکتریکی بعنوان قربانی ۳۳

شکل ۲ـ۶ـ الف) میدان مغناطیسی یک خط تنها و یک خط رفت و برگشت ب) اندوکتانس کوپلینگ در واحد طول یک حلقه با یک خط تنها و یک خط رفت و برگشت ۳۳

شکل ۲ـ۷ـ مدار معادل برای کوپلینگ القایی ۳۵

شکل ۲ـ۸ـ بررسی موردی تابع تبدیل جریان ۳۵

شکل ۲ـ۹ـ کوپلینگ القایی جریان‌های ذوزنقه‌ای آرام و سریع ۳۶

شکل ۲ـ۱۰ـ کارایی حفاظت‌کنندگی حلقه بسته برای مقادیر مختلف مقاومت آن (R2) ۳۷

شکل ۲ـ۱۱ـ کوپلینگ خازنی الف) مدل میدان، ب) مدار معادل ۳۸

شکل ۲ـ۱۲ـ مدل سه خطی برای کوپلینگ خازنی ۳۹

شکل ۲ـ۱۳ـ رفتار فرکانسی کوپلینگ خازنی ۳۹

شکل ۲ـ۱۴ـ کارایی حفاظت‌کنندگی یک شیار با طول‌های متفاوت بعنوان تابعی از فرکانس ۴۲

شکل ۲ـ۱۵ـ محدوده‌های نویز هدایتی (بخش ۱۵ در FCC و ۲۲ در CISPR) ۴۴

شکل ۲ـ۱۶ـ محدوده‌های نویز تشعشعی (بخش ۱۵ در FCC و ۲۲ در CISPR) ۴۴

شکل ۲ـ۱۷ـ مدار شبکه پایدارساز امپدانس خط ۴۵

شکل ۲ـ۱۸ـ جریان‌های حالت مشترک و حالت تفاضلی در ورودی منبع تغذیه ۴۶

شکل ۳ـ۱ـ مدار مبدل فلایبک ۴۸

شکل ۳ـ۲ـ شکل موج‌های جریان و ولتاژ برای سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در حالت ناپیوسته ۴۹

شکل ۳ـ۳ـ شکل موج‌های جریان و ولتاژ برای سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در حالت پیوسته ۴۹

شکل ۳ـ۴ـ الف) سیم‌پیچی نوع Z ب) سیم‌پیچی نوع C ۵۳

شکل ۴ـ۱ـ یک ترانسفورماتور دو سیم‌پیچی شامل تأثیر خازن‌های پراکنده در آن ۶۵

شکل ۴ـ۲ـ مدار معادل ترانسفورماتور فرکانس بالای نشان داده شده در شکل ۴ـ۱ ۶۵

شکل ۴ـ۳ـ مدار معادل یک ترانسفورماتور شامل اثر خازن پراکنده متمرکز شده در سمت اولیه آن ۶۶
شکل ۴ـ۴ـ فلوچارت رویه بدست آوردن مدار معادل ترانسفورماتور فرکانس بالا ۶۷
شکل ۴ـ۵ـ مدار معادل ترانسفورماتور فرکانس بالا ۶۸
شکل ۴ـ۶ـ مدار معادل ساده شده ترانسفورماتور فرکانس بالای شکل ۴ـ۵ ۶۸
شکل ۴ـ۷ـ مدار معادل جامع ترانسفورماتور ۶۹
شکل ۴ـ۸ـ مدار معادل فرکانس پایین ترانسفورماتور ۷۰
شکل ۴ـ۹ـ مدار معادل فرکانس متوسط ترانسفورماتور ۷۱
شکل ۴ـ۱۰ـ مدار معادل فرکانس بالای ترانسفورماتور ۷۱
شکل ۴ـ۱۱ـ مدار معادل دینامیکی ترانسفورماتور فرکانس بالا با حضور خازن‌های پراکنده ۷۲
شکل ۴ـ۱۲ـ مدار معادل دینامیکی تقریبی ترانسفورماتور فرکانس بالا با حضور خازن پراکنده متمرکز شده در اولیه ۷۲
شکل ۴ـ۱۳ـ مدار معادل ترانسفورماتور فرکانس بالا بدون حضور هسته ۷۳
شکل ۴ـ۱۴ـ مدل معادل برای اندازه‌گیری خازن پراکنده C_{pso} ۷۳
شکل ۴ـ۱۵ـ مدار معادل برای اندازه‌گیری خازن پراکنده C_p ۷۴
شکل ۴ـ۱۶ـ مدار معادل برای اندازه‌گیری خازن پراکنده C_s ۷۴
شکل ۴ـ۱۷ـ مدار معادل ترانسفورماتور فرکانس بالا ۷۵
شکل ۴ـ۱۸ـ مدار معادل ترانسفورماتور فرکانس بالای مبدل فلایبک شامل اثر کلیه خازن‌های پراکنده در آن ۷۷
شکل ۴ـ۱۹ـ مدار معادل ساده شده ترانسفورماتور فرکانس بالای شکل ۴ـ۱۸ ۷۹
شکل ۵ـ۱ـ انواع تکنیک‌های متداول سیم‌پیچی در ترانسفورماتورهای فرکانس بالا
الف) معمولی ب) ساندویچی پ) یک درمیان ۸۴
شکل ۵ـ۲ـ نحوه سیم‌پیچی یک ترانسفورماتور در حالتی که تعداد لایه‌های سیم‌پیچ اولیه عددی اعشاری است و لایه اول آن بصورت کامل پیچیده می‌شود. ۸۵
شکل ۵ـ۳ـ شدت میدان‌های الکتریکی بین هادی‌های لایه اول سیم‌پیچ اولیه و هسته ترانسفورماتور در حالتی که لایه اول سیم‌پیچ اولیه بصورت کامل پیچیده شده است. ۸۵

شکل ۵ـ۴ـ نحوه سیم‌پیچی یک ترانسفورماتور در حالتی که تعداد لایه‌های سیم‌پیچ اولیه عددی اعشاری است و تعداد هادی‌های لایه اول و دوم آن با هم برابرند. ۸۶

شکل ۵ـ۵ـ شدت میدان‌های الکتریکی بین هادی‌های لایه‌های سیم‌پیچ اولیه و هسته ترانسفورماتور در حالتی که لایه‌های اول و دوم سیم‌پیچ اولیه تعداد هادی‌های برابری دارند. ۸۶

شکل ۵ـ۶ـ نحوه قرارگیری سیم‌پیچ ثانویه بصورت متمرکز در گوشه‌ای از هسته ترانسفورماتور ۸۷

شکل ۵ـ۷ـ نحوه قرارگیری سیم‌پیچ ثانویه بصورت متمرکز در وسط ساق هسته ترانسفورماتور ۸۷

شکل ۵ـ۸ـ نحوه قرارگیری هادی‌های سیم‌پیچ ثانویه در طول ساق هسته که بصورت یکنواخت پراکنده شده‌اند. ۸۸

شکل ۵ـ۹ـ انواع تکنیک‌های سیم‌پیچی ارائه شده برای ترانسفورماتورهای فرکانس بالای مبدل فلایبک ۸۸

شکل ۵ـ۱۰ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_{p1e} ۹۲

شکل ۵ـ۱۱ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_{p2e} ۹۲

شکل ۵ـ۱۲ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_{se} ۹۳

شکل ۵ـ۱۳ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_{p12} ۹۳

شکل ۵ـ۱۴ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_{p1s} ۹۴

شکل ۵ـ۱۵ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_{p2s} ۹۴

شکل ۵ـ۱۶ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_{p1} ۹۵

شکل ۵ـ۱۷ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_{p2} ۹۵

شکل ۵ـ۱۸ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر خازن پراکنده C_s ۹۶

شکل ۵ـ۱۹ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر کلیه خازن‌های پراکنده موجود در ترانسفورماتور T_1 ۹۶

شکل ۵ـ۲۰ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر کلیه خازن‌های پراکنده موجود در ترانسفورماتور T_2 ۹۷

شکل ۵ـ۲۱ـ نمودار میله‌ای مربوط به مقادیر کلیه خازن‌های پراکنده موجود در ترانسفورماتور T_3 ۹۷

شکل ۵ـ۲۲ـ شبیه‌سازی مبدل فلایبک در نرم‌افزار Matlab و اعمال دو شبکه پایدارساز امپدانس خط در ورودی آن جهت اندازه‌گیری تداخل‌های الکترومغناطیسی ۹۹

شکل ۵ـ۲۳ـ الف) بهترین مشخصه تداخل‌های الکترومغناطیسی ترانسفورماتور T_1 که با استفاده از تکنیک سیم‌پیچی ۹ بدست آمده است. ب) بدترین مشخصه تداخل‌های الکترومغناطیسی ترانسفورماتور T_1 که با استفاده از تکنیک سیم‌پیچی ۵ بدست آمده است. ۹۹

شکل ۵ـ۲۴ـ الف) بهترین مشخصه تداخل‌های الکترومغناطیسی ترانسفورماتور T_2 که با استفاده از تکنیک سیم‌پیچی ۹ بدست آمده است. ب) بدترین مشخصه تداخل‌های الکترومغناطیسی ترانسفورماتور T_2 که با استفاده از تکنیک سیم‌پیچی ۵ بدست آمده است. ۱۰۰

شکل ۵ـ۲۵ـ الف) بهترین مشخصه تداخل‌های الکترومغناطیسی ترانسفورماتور T_3 که با استفاده از تکنیک سیم‌پیچی ۷ بدست آمده است. ب) بدترین مشخصه تداخل‌های الکترومغناطیسی ترانسفورماتور T_3 که با استفاده از تکنیک سیم‌پیچی ۵ بدست آمده است. ۱۰۰

شکل پ ـ۱ـ مشخصه‌های تداخل‌های الکترومغناطیسی حاصله از مبدل فلایبک استفاده کننده از ترانسفورماتور T_1 با تکنیک‌های مختلف سیم‌پیچی ۱۰۷

شکل پ ـ۲ـ مشخصه‌های تداخل‌های الکترومغناطیسی حاصله از مبدل فلایبک استفاده کننده از ترانسفورماتور T_2 با تکنیک‌های مختلف سیم‌پیچی ۱۰۸

شکل پ ـ۳ـ مشخصه‌های تداخل‌های الکترومغناطیسی حاصله از مبدل فلایبک استفاده کننده از ترانسفورماتور T_3 با تکنیک‌های مختلف سیم‌پیچی ۱۰۹

مقدمه

منابع تغذیه سوئچینگ (مانند مبدل‌های فلایبک، فوروارد و ...) امروزه کاربردهای بسیاری پیدا کرده‌اند. اما بدلیل فرکانس کاری بالای این مبدل‌ها، پدیده تداخل‌های الکترومغناطیسی (که باعث عملکرد نامطلوب سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی می‌گردد) نیز بصورت فزاینده‌ای گسترش یافته است بطوریکه یکی از دغدغه‌های مهم متخصصین و محققین کاهش این پدیده مضر می‌باشد.

منابع تغذیه سوئیچینگ معمولا از ترانسفورماتورهای فرکانس بالا جهت کاهش یا افزایش ولتاژ ورودی استفاده می‌کنند. ضمنا استفاده از این عناصر باعث ایزولاسیون بین ورودی و خروجی می‌شود. اغلب جهت کاهش حجم این ترانسفورماتورها و کاهش هزینه ساخت این منابع تغذیه، تلاش می‌گردد سرعت سوئیچ‌های قدرت افزایش یابد. اما افزایش سرعت سوئیچ‌های قدرت باعث تشدید استرس‌های ولتاژ و جریان ($\frac{dv}{dt}$ و $\frac{di}{dt}$) نیز می‌گردد و با اعمال این استرس‌ها به سلف‌های نشتی و خازن‌های پراکنده موجود در ترانسفورماتورهای فرکانس بالا، تداخل‌های الکترومغناطیسی هدایتی بوجود می‌آید.

در اکثر مقالاتی که تاکنون انتشار یافته‌اند تلاش‌های زیادی برای کاهش اندوکتانس‌های نشتی (به منظور کاهش EMI) صورت گرفته است و کمتر خازن‌های پراکنده مورد توجه بوده‌اند، در حالیکه خازن‌های پراکنده موجود در نقاط مختلف سیم‌پیچی ترانسفورماتور نیز بسیار مهم هستند و در صورتیکه استرس ولتاژ زیادی (ناشی از کلیدزنی) به آنها اعمال شود جریان نشتی زیادی از آنها عبور خواهد کرد که این جریان‌ها عامل اصلی ایجاد تداخل‌های الکترومغناطیسی هدایتی هستند. برای کاهش این نوع تداخل‌های الکترومغناطیسی می‌توان از فیلترهای پسیو استفاده کرد، اما قیمت آنها گران است. بنابراین روش اقتصادی، کاهش اندازه خازن‌های پراکنده می‌باشد. اندازه خازن‌های پراکنده به ساختار و نحوه سیم‌پیچی ترانسفورماتورهای فرکانس بالا بستگی دارد. در ترانسفورماتورهای فرکانس بالا تکنیک‌های سیم‌پیچی زیادی وجود دارد که با توجه به محدودیت‌هایی که طراحی ترانسفورماتور برای ما بوجود می‌آورد (مانند قطر

سیم‌ها، سایز و نوع هسته، تعداد لایه‌های سیم‌پیچی اولیه و ثانویه و ...) تنها می‌توان از برخی آنها استفاده نمود.

هدف این پایان‌نامه یافتن تکنیک سیم‌پیچی است که بتواند اندازه خازن‌های پراکنده موجود در نقاط مختلف ترانسفورماتورهای فرکانس بالا را حداقل سازد و در نتیجه تداخل‌های الکترومغناطیسی نیز کاهش یابد. بدین جهت انواع تکنیک‌های سیم‌پیچی ممکن برای این نوع ترانسفورماتورها بکار گرفته شد و تاثیر هر یک از آنها برروی اندازه خازن‌های پراکنده موجود در نقاط مختلف ترانسفورماتورهای فرکانس بالا مورد بررسی قرار گرفت.

فصل اول

ترانسفورماتورها

۱ـ۱ـ پیدایش ترانسفورماتورهای قدرت

ترانسفورماتورها از اجزای شاخص مدارات الکتریکی می‌باشند. اولین ترانسفورماتور در ۲۹ آگوست ۱۸۳۱ ساخته شد. در این تاریخ Michael Faraday آزمایشات معروف خود را روی ترانسفورماتور حلقوی انجام داد. این تست شامل یک حلقه آهنی و دو کلاف A و B بود. کلاف A از سه تکه تشکیل شده بود که در سمت چپ حلقه آهنی پیچیده شده بود. کلاف B نیز دو تکه‌ای بود و در سمت راست حلقه آهنی پیچیده شده بود. ترمینال‌های کلاف B به یک سیم بلند اتصال داشتند که این سیم از روی یک میله مغناطیسی عبور می‌کرد. یک بخش از کلاف A به یک باتری اتصال می‌یافت. به هنگام اتصال به باتری، Faraday مشاهده نمود که میله ذکر شده شروع به حرکت و نوسان نموده و سپس به جای اولیه خود بازگردید. وقتی Faraday کلاف A را از باتری جدا نمود، میله مجدداً شروع به حرکت و نوسان نمود. Faraday بار دیگر آزمایش را در شرایطی انجام داد که هر سه تکه کلاف A به باتری اتصال داشتند، و مشاهده نمود که نیروی وارده بر میخ بسیار قوی‌تر گردید.

این آزمایشات در سال ۱۸۳۲ توسط Joseph Henry ادامه یافت. آزمایش مشابهی نیز توسط C.G.Page در سال ۱۸۳۶ تحت عنوان «افزایش دهنده دینامیکی»[۱] انجام شد. Page اعتقاد داشت که پدیده خود القایی و پدیده القای بین دو هادی جدا از هم با یکدیگر ارتباط دارند. باتوجه به نمونه اولیه ترانسفورماتور، وی طرحی ارائه نمود که در آن سیم‌پیچ اولیه و ثانویه از هم جدا بودند [۱].

در سال ۱۸۵۶، C. F. Varley طرحی پیشنهاد نمود که در آن به منظور حداقل کردن تلفات فوکو، از یک هسته آهنی چند تکه‌ای[۲] استفاده شده بود. هسته پیشنهادی مجموعه‌ای از سیم‌های[۳] فولادی بود و سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه در یک سوم میانی ساق هسته سوار شده بودند. انتهای سیم‌های هسته نیز بر روی سیم‌پیچ‌ها برگشته بود تا مدار مغناطیسی کامل گردد.

---

۱ dynamic multiplier

۲ Subdivided

۳ wires

حـــدود ۳۰ ســـال بعـــد، سیـــستم توزیـــع ۲۰۰۰ ولـــت تکفـــاز توســـط Lucien Gaulard و John D. Gibbs ابداع گردید. عنصر اصلی سیستم ترانسفورماتوری بودکه هسته آن از آهـن نـرم تـشکیل شده بود و سیم‌پیچ اولیه از نوع کلاف عایق‌دار بود که توسط ۶ کلاف مشابه (بعنوان سیم‌پیچ ثانویـه) احاطـه می‌شد. سرهای سیم‌پیچ ثانویه بطور جداگانه از یک سمت بیرون آورده شده بودند، بطوریکه در صـورت لـزوم هر شش قسمت قابل استفاده بود. این ترانسفورماتور اولین ترانسفورماتور با خروجی چندگانه بود.

در ســال ۱۸۸۵، نتـایج کـار L. Gaulard و J. D. Gibbs مـورد توجـه آقـای George Westinghouse قرار گرفت. تراسـنفورماتوری کـه توسـط Gaulard و Gibbs بـه ثبـت رسـیده بـود از چندین ترانسفورماتور با نسبت تبدیل یک تشکیل شده بود که در آن سیم‌پیچ های اولیـه سـری شـده و بـه منبع با ولتاژ بالا اتصال می‌یافت. ثانویه نیز دارای یـک ولتـاژ خروجـی پـائین بـود. آقـای Westinghouse امتیاز طرح را از Gaulard-Gibbs خریداری نمود تا آنرا تبدیل به یک طرح صنعتی برای نیروگاه Great Barrington در ماساچوسـت نمایـد. بـا راهنمـایی‌هـای William Stanley، ترانـسفورماتورهـای Westinghouse در سال ۱۸۸۶ با سیم‌پیچ‌های اولیه‌ای که بصورت موازی وصل شده و به منبع تغذیـه بـا ولتاژ بالا متصل می‌شدند، طراحی گردیدند. پس از اینکه این ترانسفورماتورها تست‌های خـود را بـا موفقیـت پشت سر گذاشتند، Westinghouse اولین سیستم برق متنـاوب تجـاری جهـان را در پایـان سـال ۱۸۸۶ پایه‌ریزی نمود.

در دهه‌های ۱۹۱۰ و ۱۹۲۰ تکنولوژی ترانسفورماتور پیشرفت های شایان توجهی نمود. دانش مربـوط به ویژگی‌های کلاف، متالورژی، مواد عایق و غیره تا حد زیادی تکامل یافت. هر چند کیفیت مواد به کیفیـت مواد امروزی نمی‌رسید، لاکن تمامی مبانی علمی شناخته شده بودند و عملکرد مواد نیز عالی بود.

Nikola Tesla نقش به سزایی در استاندارد کردن فرکانس ۶۰ هرتز در سیستم‌هـای توزیـع قـدرت آمریکا داشت. در دهه ۱۹۲۰ تا اوایل دهه ۱۹۳۰، در برخی نقاط آمریکا و کانادا فرکانس ۲۵ هرتز رایـج بـود. علت آن نیز این بود که تجهیزات توان مانند مبدل‌های سنکرون و موتـورهـای کموتـاتوردار جریـان متنـاوب دارای عملکرد مطلوبی در این فرکانس بودند.

با این حال در فرکانس ۲۵ هرتز فلیکر لامپ‌ها قابل رویت است. مزیت بالا بودن فرکانس آن است که مقدار آهن و مس مورد نیاز برای ترانسفورماتور کمتر گردیده و در نتیجه قیمت و وزن ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. این اولین تجربه‌ای بود که ارتباط بین ابعاد ترانسفورماتور و فرکانس بهره برداری آنرا مشخص می‌نمود.

برخی از ترانسفورماتورهای قدیمی برای استفاده در برق ۲۵/۴۰ هرتز طراحی شده بودند. بقیه ترانسفورماتورها نیز دارای فرکانس نامی ۵۰/۱۳۳ هرتز بودند. خوشبختانه از ترانسفورماتورهای ۲۵/۴۰ هرتز می‌توان به راحتی در سیستم‌های برق ۶۰ هرتز امروزی استفاده نمود. در حدود سال ۱۹۶۵ فرکانس خط در تمام دنیا در ۵۰ و ۶۰ هرتز استاندارد گردید.

۱ـ۲ـ پیدایش ترانسفورماتورهای قدرت فرکانس بالا

ابداع مدارات مجتمع نیمه هادی اگرچه باعث ایجاد تحولات سریعی در ابعاد، قیمت و عملکرد تجهیزات الکترونیکی، بویژه کامپیوترها و تجهیزات ارتباطی، گردید اما در عین حال نیازمندی‌های جدیدی را نیز در زمینه منابع تغذیه ایجاد نمود. منابع تغذیه اولیه شامل یک ترانسفورماتور قدرت ۵۰/۶۰ Hz، برای تبدیل ولتاژ زیاد به کم، به همراه یک یکسوساز و رگولاتورهای خطی توام با تلفات[۱] بود. اما این نوع ترانسفورماتورهایی که با فرکانس خط کار می‌کنند حجیم و سنگین می‌باشند. بعلاوه، راندمان پائین رگولاتورهای خطی، استفاده از سیستم‌های خنک‌کنندگی بزرگ را برای منابع ضروری می‌ساخت که این امر موجب افزایش قیمت و ابعاد منابع تغذیه می‌گردید. تا زمانیکه تجهیزات الکترونیکی ابعاد بزرگی داشتند، ابعاد بزرگ منابع تغذیه مشکل مهمی به نظر نمی‌رسید. اما با پیشرفت در فرآیند ساخت نیمه هادی‌ها، اندازه تجهیزات الکترونیکی کوچکتر شد و در نتیجه منابع تغذیه حجیم و با راندمان کم غیرقابل‌قبول گردیدند.

در دهه ۱۹۶۰، نیروی دریایی آمریکا و برخی سازمان‌های فضایی به توسعه تکنولوژی منابع تغذیه سوئیچینگ پرداختند که موجب کاهش ابعاد و وزن منابع تغذیه گردید. اگرچه تئوری منابع تغذیه

---

۱ dissipative

سوئیچینگ طی سال‌های زیادی گسترش یافته بود ولی عملی کردن این تکنیک‌ها چندان سریع اتفاق نیفتاد. این امر عمدتاً به خاطر کمبود تجهیزات کلیدزنی فرکانس بالا و مواد مغناطیسی بود. با ابداع ترانزیستورهای قدرت و یکسوکننده‌های کنترل‌شده سیلیکونی[1] در دهه ۱۹۵۰، رویای منابع تغذیه سوئیچینگ فرکانس بالا تحقق یافت [۲]. ابداع این ادوات امکان تولید منابع تغذیه با فرکانس کلیدزنی چند کیلو هرتز را که از ترانسفورماتورها و عناصر فیلتری کوچکتر استفاده می‌کردند، فراهم نمود. همزمان با این تحولات تکنیک‌های مدولاسیون پهنای پالس برای کنترل مبدل‌های قدرت سوئیچینگ و تنظیم خروجی آنها ابداع گردید.

در ابتدا مبدل‌های DC-DC ولتاژ پایین جایگزین رگولاتورهای خطی در سمت ثانویه ترانسفورماتورهای قدرت گردیدند. در رگولاتورها برای تنظیم ولتاژ از افت ولتاژ بر روی مقاومت متغیر ترانزیستور استفاده می‌شد، ولی مبدل‌های DC-DC از تنظیم سیکل کاری کلید قدرت برای تنظیم ولتاژ استفاده می‌نمودند. این روش موجب افزایش راندمان سیستم گردید، ولی مشکل حجم ترانسفورماتور همچنان وجود داشت. اندکی پس از آن ترانزیستورهای ولتاژ بالا (V_{ceo} ۱۰۰۰ـ۵۰۰) ابداع گردید و امکان توسعه منابع فرکانس بالا (۵۰ kHz ـ ۲۵) فراهم گردید [۳].

کلیدهای «off-line» مستقیماً و بدون استفاده از ترانسفورماتورهای کاهنده برق شبکه را یکسو می‌کنند و ورودی یکسو شده توسط خازن‌های الکترولیتی بزرگ فیلتر می‌گردد. این ولتاژ DC تنظیم نشده به یک موج مربعی فرکانس بالا برش داده می‌شود و در نتیجه یک ترانسفورماتور بسیار کوچکتر را می‌توان برای تغییر سطح ولتاژ بکار برد. تابع رگولاسیون را می‌توان با کنترل سیکل‌کاری کلیدها کنترل نمود. بدین ترتیب مشکل وجود ترانسفورماتورهای کاهنده حجیم و نیز مشکل رگولاتورهای راندمان پائین مرتفع گردید.

فرکانس کاری ترانسفورماتورهای سوئیچینگ در طی یک دهه از ۵۰/۶۰ Hz به چند ده کیلو هرتز افزایش یافت و اصطلاحا «ترانسفورماتورهای قدرت فرکانس بالا» نامیده شدند. آقای B. K. Bose (یک

---

۱ silicon controlled rectifier (SCR)

محقق معروف الکترونیک قدرت) دهه آخر قرن بیستم را «دهه الکترونیک قدرت» نامید زیرا در طی این دهه توسعه در مبدل‌ها، کنترل و سیستم ها بسیار وسیع بوده و فرکانس کاری به سمت مگا هرتز رفت[۴].

در عمل ترانسفورماتورهای بکار رفته در منابع تغذیه سوئیچینگ را باید جزء ادوات الکترومغناطیسی فرکانس پائین به حساب آورد. در کاربردهای عملی، حد بالا برای تحلیل فرکانس پائین عموماً حدود ۵۰ ـ ۱۰ MHz می‌باشد [۵]. ترانسفورماتورهای قدرت فرکانس بالایی که در این پایان نامه مورد بحث قرار می‌گیرند زیر این رنج فرکانسی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند.

اغلب گفته می‌شود ادوات الکترونیکی حالت جامد اولین انقلاب و ادوات الکترونیک قدرت حالت جامد دومین انقلاب را در الکترونیک ایجاد نمودند. می‌توان گفت الکترونیک قدرت آمیخته‌ای از تکنولوژی‌های بوجود آمده از عصر مکانیک، عصر برق و عصر الکترونیک می‌باشد. برمبنای پیش‌بینی B. K. Bose، الکترونیک قدرت یکی از دو زمینه اصلی در صنایع فوق اتوماسیون در قرن بیست‌ویکم می‌باشد. ترانسفورماتور فرکانس بالا در واقع تکیه‌گاه و ستون اصلی الکترونیک‌قدرت مدرن است. در قرن بیست‌ویکم پیشرفت ترانسفورماتورهای قدرت فرکانس بالا، برای منابع تغذیه سوئیچینگ بسیار چشمگیر و حائز اهمیت می‌باشد.

۱ـ۳ـ تئوری پایه ترانسفورماتور

تئوری ترانسفورماتورها مبتنی بر قانون Faraday می‌باشد. مقدار نیرو محرکه الکتریکی[۱] القایی برابر با منفی مشتق شاردور نسبت به زمان است. جریان ورودی به سیم‌پیچ اولیه یک شار متغیر با زمان تولید می‌نماید و این شار متغیر با زمان موجب القای ولتاژ در ثانویه می‌گردد. بنابراین سیم‌پیچ‌های تراسنفورماتورها سلف‌های تزویج شده توسط یک مدار مغناطیسی مشترک می‌باشند (شکل ۱ـ۱).

---

۱ emf