دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق، گرایش قدرت

بررسی حالت گذرای ترانسفورماتور و برخورد موج صاعقه با استفاده از مدل خط انتقال

استاد راهنما : دکتر مهرداد رستمی

نگارش : سمیه فرهادخانی

زمستان۸۹

تشکر و قدردانی:

با سپاس از زحمات بی‌دریغ استاد عزیزم، جناب آقای دکتر رستمی

که در به پایان رساندن این پایان نامه مرا یاری نمودند.

.

چکیده

ترانسفورماتورها یکی از ادوات بسیار مهم و گرانقیمت مورد استفاده در شبکه‌های برق می‌باشند که همواره در معرض اضافه‌ولتاژهای گذرا قرار دارند. این اضافه‌ولتاژها از برخورد صاعقه، عملیات کلیدزنی و یا اغتشاشات سیستم ناشی می‌شوند. یک ترانسفورماتور باید به‌گونه‌ای طراحی شود که در برابر این اضافه‌ولتاژها ایستادگی کند و به همین منظور پس از ساخت تحت تستهای مختلفی از جمله تست ضربه قرار می‌گیرد. ولتاژهایی که در داخل سیم‌پیچی در خلال تست ضربه ایجاد می‌شوند از نوع ولتاژهای گذرا بوده و محاسبه آن ساده نیست. اطلاع از نحوه توزیع این ولتاژها برای طراحی ساختار عایقی ترانسفورماتور امری ضروری است. در طول سالیان متمادی، مدلها و روشهای مدلسازی مختلفی برای بررسی حالت گذرای ترانسفورماتورها ارائه شده اند که عمدتا از فرمولها و روابط ریاضی پیچیده بهره برده و حل آنها نیازمند محاسبات قابل توجهی می باشد. یکی از این روشها، مدل خط انتقال چند فازه می باشد که در مقایسه با روشهای دیگر مدلسازی فرکانس بالا، از اعتبار فرکانسی بالایی برخوردار است. در سالهای اخیر با پیشرفت در ساخت کامپیوترهای با سرعت پردازش بالا، استفاده از مدل خط انتقال چند فازه برای بررسی حالت گذرای ترانسفورماتور مورد توجه قرار گرفته است. در این پروژه، ابتدا مدل خط انتقال چند فازه تشریح شده و نحوه محاسبه پارامترهای مدل بیان شده است. سپس بر اساس این مدل، سیم پیچ فشارقوی یک ترانسفورماتور ۶۳/۲۰ Kv, ۳۰MVA بر اساس اطلاعات موجود در برگه طراحی ترانسفورماتور مدلسازی شده است. سپس رفتار حالت گذرای آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در ادامه رفتار سیم پیچ ترانسفورماتور به ورودی ضربه صاعقه استاندارد مورد کنکاش قرار گرفته است. نوسانات و اضافه ولتاژها بررسی شده و ساختار عایقی سیم پیچ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور، حالت گذرا، صاعقه، مدل خط انتقال

فهرست مطالب:

فصل اول:مقدمه ۱

۱-۱- ضرورت بررسی حالتهای گذر ۲

۱-۲- روشهای مدلسازی و تحلیل حالتهای گذرا ۳

۱-۲-۱- روشهاي مدلسازي جعبه سياه ٤

۱-۲-۲- روشهاي مدلسازي فيزيكي ٥

۱-۲-۲-۱- مدل مشروح ٥

۱-۲-۲-۲- مدل خط انتقال چند فازه ٦

۱-۳- مروری بر کارهای گذشته ٦

۱-٤-طرحِ هدف و ساختار پایان نامه ۷

فصل دوم: اضافه ولتاژهای گذرا در ترانسفورماتور ۹

۲-۱-مقدمه ۱۰

۲-۲-انواع اضافه ولتاژ ۱۰

۲-۲-۱- تقسیم‌بندی اضافه ولتاژها بر اساس علت وقوع ۱۱

۲-۲-۲- تقسیم‌بندی اضافه ولتاژها بر اساس طبیعت الکترومغناطیس امواج ۱۱

۲-۳-امواج سیار ۱۲

۲-٤-تعیین توزیع ولتاژ در سیم پیچ ترانسفورماتور با استفاده از مدل واگنر ۱٤

۲-۴-۱-توزیع اولیه ولتاژ ۱۴

۲-۴-۲-توزیع نهایی ولتاژ ۱۵

۲-۴-۳-نوسانات ولتاژ ۱۶
۲-۵-اثر شکل موج بر توزیع ولتاژ ۱۸
۲-۵-۱- پیشانی موج ۱۸
۲-۵-۲- شکل موج بریده ۱۹
۲-۶-تست ضربه صاعقه در ترانسفورماتور ۲۱
۲-۶-۱-تولید ولتاژ ضربه ۲۱
۲-۷-۲- اندازه‌گیری والتاژ ضربه ۲۴
۲-۷-۳-موج ضربه به فرم ریاضی ۲۵
فصل سوم:مدل خطوط انتقال چند سیمه ۲۶
۳-۱- مقدمه ۲۷
۳-۲- ساختار مدل خط انتقال چند فازه ۲۷
۳-۳-محاسبه پارامترهای مدل ۳۱
۳-۳-۱- ماتریس ظرفیت ۳۲
۳-۳-۲-ماتریس اندوکتانس ۳۵
۳-۳-۳-مقاومت سری ۳۷
۳-۳-۴-هدایت موازی ۳۷
۳-۴-چالشهای محاسباتی مدل MTL ۳۸
فصل چهارم: مدلسازی و شبیه سازیهای ترانسفورماتور نمونه ٤١

۴-۱- مقدمه ۴۲
۴-۲- مشخصات ترانسفورماتور نمونه ۴۲
۴-۳-الگوریتم حل مدل ۴۳
۴-۴- نتایج شبیه سازی مدل ۴۶
۴-۴-۱- شبیه سازی حالت گذرای ضربه سیم پیچ ۴۶
۴-۴-۲-توزیع ولتاژ اولیه و نهایی در سیم پیچ: ۵۵
۴-۴-۳- شبیه سازی حالت گذرای ضربه صاعقه در سیم پیچ ۶۱
۴-۴-۳-۱-نتایج شبیه سازی ضربه صاعقه بر روی ترانسفوماتور نمونه ٦٣
۴-۴-۳-۲-بررسی گذرای ضربه در یک ترانسفورماتور توزیع ۷۸
فصل پنجم: شبیه سازی‌های مدل ساده شده خط انتقال در ترانسفورماتور ۸۲
۵-۱- مقدمه ۸۳
۵-۲- حل معادلات مدل ۸۳
۵-۳- نتایج شبیه سازی مدل ۸۵
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹٤
نتیجه‌گیری ۹۵
پیشنهادات ۹۷
مراجع ۹۸

فهرست اشکال:

شکل(۲-۱): اضافه ولتاژ ساده صاعقه ۱۱

شکل(۲-۲): امواج اضافه ولتاژ پریودیک ۱۲

شکل(۲-۳):شبکه خازنی حاکم بر ساختار یک ترانسفورماتور ۱۳

شکل(۲-۴): شبکهٔ نردبانی یک سیم پیچ لایه ای ۱۳

شکل(۲-۵): مدل قسمتی از سیم‌پیچ ۱۳

شکل(۲-۶): اثر پارامتر α بر توزیع ولتاژ ضربه (انتهای سیم‌پیچ زمین شده است ۱۶

شکل(۲-۷): حداکثر ولتاژ نقاط مختلف حین نوسانات گذرا به ازای مقادیر مختلف ۱۷

شکل(۲-۸): شکل موج ساده شدهٔ ضربه با پیشانی موج غیر صفر و پشت موج بینهایت ۱۸

شکل(۲-۹): اثر پیشانی موج ضربه بر نوسانات سیم‌پیچ ۱۹

شکل(۲-۱۰): نوسانات ولتاژ سیم‌پیچ بر اثر اعمال ولتاژ ۲۰

شکل(۲-۱۱): مدار معدل ژنراتور ضربه ۲۲

شکل(۲-۱۲): شکل موج ضربه صاعقه استاندارد ۲۲

شکل(۲-۱۳): شکل موج ضربه کلید زنی استاندارد ۲۳

شکل(۲-۱۴): شکل موج ضربه صاعقه پشت بریده استاندارد ۲۴

شکل(۲-۱۵): سیستم اندازه گیری ولتاژ ضربه ۲۴

شکل(۳-۱): مدل یک طول کوچک از خط انتقال تک سیمه ۲۷

شکل(۳-۲): مدل خط انتقال چند سیمه برای سیم ۲۸

شکل(۳-۳): ساختار ترانسفورماتور روغنی با سیم پیچ دیسکی فشار قوی ۳۲

شکل(۳-۴): مدل هندسی ساده شده عایق بین دو دیسک ۳۳

شکل(۳-۵): مدل هندسی ساده شده عایق بین دو سیم پیچ HV و LV ۳۴

شکل(۳-۶):دو هادی دایره‌ای هم مرکز برای محاسبه اندوکتانس متقابل ۳۶

شکل(۴-۱) تابع فرکانسی ادمیتانس ورودی سیم پیچ ترانسفورماتور در بازه وسیع فرکانسی ۴۷

شکل(۴-۲): تابع فرکانسی ادمیتانس ورودی سیم پیچ ترانسفورماتور در بازه وسیع فرکانسی بر حسب لگاریتم ۴۸

شکل(۴-۳): تابع فرکانسی امپدانس ورودی سیم پیچ ترانسفورماتور در بازه وسیع فرکانسی ۴۸

شکل(۴-۴): نحوه توزیع ولتاژ در حلقه های سیم پیچ در فرکانس ۱ کیلو هرتز ۴۹

شکل(۴-۵): ولتاژ در سر ابتدایی هر حلقه از سیم پیچ در چند فرکانس رزونانس تمونه ۵۱

شکل(۴-۶): پاسخ فرکانسی تابع ولتاژ هر حلقه به ولتاژ ابتدای سیم پیچ ۵۲

شکل(۴-۷): پاسخ فرکانسی اختلاف ولتاژ بین هر دو حلقه در رنج فرکانسی وسیع از دو نمای مختلف ۵۳

شکل(۴-۸): اختلاف ولتاژ بین حلقه های سیم پیچ ۵۴

شکل(۴-۹): اختلاف ولتاژ بین ۱۰۰ حلقه اول سیم پیچ ۵۵

شکل(۴-۱۰): نحوه توزیع اولیه ولتاژ بین الف) تمام حلقه های سیم پیچ. ب) ۵۰ حلقه اول سیم پیچ ۵۷

شکل(۴-۱۱) : نحوه توزیع اولیه ولتاژ بین دیسکهای سیم پیچ ۵۹

شکل(۴-۱۲): توزیع اولیه ولتاژ در طول سیم پیچ به ازای دو مقدار متفاوت خازن طولی ۶۰

شکل(۴-۱۳): توزیع ولتاژ نهایی در طول سیم پیچ ترانسفورماتور ۶۱

شکل(۴-۱۴): سیگنال ضربه صاعقه تولید شده به صورت نرم افزاری ۶۲

شکل(۴-۱۵): طیف فرکانسی موج ضربه صاعقه استاندارد ۶۳
شکل(۴-۱۶): ادمیتانس ورودی سیم پیچ در بازه وسیع فرکانسی (دامنه و فاز بر حسب فرکانس) ۶۴
شکل(۴-۱۷): اندازه جریان ورودی سیم پیچ در بازه وسیع فرکانسی ۶۵
شکل(۴-۱۸): توزیع ولتاژ در ابتدای هر حلقه از سیم پیچ در چند فرکانس نمونه ۶۷
شکل(۴-۱۹): توزیع ولتاژ در تمام حلقه های سیم پیچ در رنج فرکانسی وسیع: ۶۸
شکل(۴-۲۰):ولتاژ چند حلقه نمونه از سیم پیچ به ورودی ضربه صاعقه استاندارد ۶۹
شکل(۴-۲۱): ولتاژ چند حلقه نمونه از دیسک اول به ورودی ضربه صاعقه استاندارد ۶۹
شکل(۴-۲۲): ولتاژ چند حلقه نمونه از دیسک های ابتدایی به ورودی ضربه صاعقه استاندارد ۷۰
شکل(۴-۲۳): ولتاژ چند حلقه نمونه از دیسک۳۳ ام (اواسط سیم پیچ)به ورودی ضربه صاعقه استاندارد..... ۷۰
شکل(۴-۲۴): ورودی ضربه صاعقه ولتاژ چند حلقه نمونه از دیسک۳۶ ام ۷۱
شکل(۴-۲۵):ولتاژ حلقه‌های سیم پیچ ناشی از اعمال ورودی ضربه صاعقه استاندارد از دو نمای مختلف..... ۷۳
شکل(۴-۲۶): ماکزیمم ولتاژ ایجاد شده بر روی حلقه های سیم پیچ ۷۴
شکل(۴-۲۷): اختلاف ولتاژ بین ۵۰ حلقه اول سیم پیچ تحت ضربه صاعقه ۷۵
شکل(۴-۲۸): اختلاف ولتاژ بین ۵۰ حلقه‌های۵۰ ام تا ۲۵۰ ام سیم پیچ تحت ضربه صاعقه..... ۷۵
شکل(۴-۲۹): اختلاف ولتاژ بین حلقه های ۲۵۰ ام تا ۴۵۶ ام سیم پیچ تحت ضربه صاعقه..... ۷۶
شکل(۴-۳۰): توزیع ولتاژ در طول سیم پیچ در چند زمان مختلف ۷۷
شکل(۴-۳۱): تابع فرکانسی ادمیتانس ورودی سیم پیچ ترانسفورماتور در بازه وسیع فرکانسی ۷۸
شکل(۴-۳۲): نحوه توزیع اولیه ولتاژ بین حلقه های سیم پیچ..... ۷۹

شکل(۴-۳۳): ماکزیمم ولتاژ ایجاد شده بر روی حلقه های سیم پیچ ۸۰

شکل(۴-۳۴): ولتاژ بر روی حلقه هفتم سیم پیچ ناشی از اعمال ورودی ضربه صاعقه استاندارد ۸۱

شکل(۴-۳۵): توزیع ولتاژ در طول سیم پیچ در چند زمان مختلف ۸۱

شکل(۵-۱): مقایسه اندوکتانس های حاصل از دو روش دقیق و تقریبی ۸۶

شکل(۵-۲): ادمیتانس ورودی سیم پیچ بر حسب فرکانس با استفاده از مدل دقیق و تقریبی ۸۷

شکل(۵-۳): توزیع ولتاژ در هر حلقه از سیم پیچ در فرکانسهای مختلف ۸۷

شکل(۵-۴):ولتاژ روی حلقه‌هایی از دیسک اول ۸۸

شکل(۵-۵): ولتاژ روی برخی حلقه ها در طول سیم پیچ..... ۸۹

شکل(۵-۶): توزیع ولتاژ در تمام حلقه ها در طول سیم پیچ ۹۰

شکل(۵-۷): اختلاف ولتاژ بین حلقه ها در طول سیم پیچ ۹۰

شکل(۵-۸): اختلاف ولتاژ بین ۱۰۰ حلقه اول سیم پیچ..... ۹۱

شکل(۵-۹): اختلاف ولتاژ بین حلقه های ۲۵۰ ام تا حلقه ۴۵۶ ام سیم پیچ ۹۱

شکل(۵-۱۰): توزیع ولتاژ در طول سیم پیچ در چند زمان مختلف ۹۲

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق، گرایش قدرت

بررسی حالت گذرای ترانسفورماتور و برخورد موج صاعقه با استفاده از مدل خط انتقال

استاد راهنما : دکتر مهرداد رستمی

نگارش : سمیه فرهادخانی

زمستان۸۹

تشکر و قدردانی:

با سپاس از زحمات بی‌دریغ استاد عزیزم، جناب آقای دکتر رستمی

که در به پایان رساندن این پایان نامه مرا یاری نمودند.

.

چکیده

ترانسفورماتورها یکی از ادوات بسیار مهم و گرانقیمت مورد استفاده در شبکه‌های برق می‌باشند که همواره در معرض اضافه‌ولتاژهای گذرا قرار دارند. این اضافه‌ولتاژها از برخورد صاعقه، عملیات کلیدزنی و یا اغتشاشات سیستم ناشی می‌شوند. یک ترانسفورماتور باید به‌گونه‌ای طراحی شود که در برابر این اضافه‌ولتاژها ایستادگی کند و به همین منظور پس از ساخت تحت تستهای مختلفی از جمله تست ضربه قرار می‌گیرد. ولتاژهایی که در داخل سیم‌پیچی در خلال تست ضربه ایجاد می‌شوند از نوع ولتاژهای گذرا بوده و محاسبه آن ساده نیست. اطلاع از نحوه توزیع این ولتاژها برای طراحی ساختار عایقی ترانسفورماتور امری ضروری است. در طول سالیان متمادی، مدلها و روشهای مدلسازی مختلفی برای بررسی حالت گذرای ترانسفورماتورها ارائه شده اند که عمدتا از فرمولها و روابط ریاضی پیچیده بهره برده و حل آنها نیازمند محاسبات قابل توجهی می باشد. یکی از این روشها، مدل خط انتقال چند فازه می باشد که در مقایسه با روشهای دیگر مدلسازی فرکانس بالا، از اعتبار فرکانسی بالایی برخوردار است. در سالهای اخیر با پیشرفت در ساخت کامپیوترهای با سرعت پردازش بالا، استفاده از مدل خط انتقال چند فازه برای بررسی حالت گذرای ترانسفورماتور مورد توجه قرار گرفته است. در این پروژه، ابتدا مدل خط انتقال چند فازه تشریح شده و نحوه محاسبه پارامترهای مدل بیان شده است. سپس بر اساس این مدل، سیم پیچ فشارقوی یک ترانسفورماتور ۶۳/۲۰ Kv, ۳۰MVA بر اساس اطلاعات موجود در برگه طراحی ترانسفورماتور مدلسازی شده است. سپس رفتار حالت گذرای آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در ادامه رفتار سیم پیچ ترانسفورماتور به ورودی ضربه صاعقه استاندارد مورد کنکاش قرار گرفته است. نوسانات و اضافه ولتاژها بررسی شده و ساختار عایقی سیم پیچ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور، حالت گذرا، صاعقه، مدل خط انتقال

فهرست مطالب:

فصل اول:مقدمه ۱

۱-۱- ضرورت بررسی حالتهای گذر ۲

۱-۲- روشهای مدلسازی و تحلیل حالتهای گذرا ۳

۱-۲-۱- روشهاي مدلسازي جعبه سياه ٤

۱-۲-۲- روشهاي مدلسازي فيزيكي ٥

۱-۲-۲-۱- مدل مشروح ٥

۱-۲-۲-۲- مدل خط انتقال چند فازه ٦

۱-۳- مروری بر کارهای گذشته ٦

۱-٤-طرحِ هدف و ساختار پایان نامه ۷

فصل دوم: اضافه ولتاژهای گذرا در ترانسفورماتور ۹

۲-۱-مقدمه ۱۰

۲-۲-انواع اضافه ولتاژ : ۱۰

۲-۲-۱- تقسیم‌بندی اضافه ولتاژها بر اساس علت وقوع ۱۱

۲-۲-۲- تقسیم‌بندی اضافه ولتاژها بر اساس طبیعت الکترومغناطیس امواج ۱۱

۲-۳-امواج سیار ۱۲

۲-٤-تعیین توزیع ولتاژ در سیم پیچ ترانسفورماتور با استفاده از مدل واگنر ۱٤

۲-۴-۱-توزیع اولیه ولتاژ ۱۴

۲-۴-۲-توزیع نهایی ولتاژ: ۱۵

۲-۴-۳-نوسانات ولتاژ:.....۱۶
۲-۵-اثر شکل موج بر توزیع ولتاژ: ۱۸
۲-۵-۱- پیشانی موج: ۱۸
۲-۵-۲- شکل موج بریده ۱۹
۲-۶-تست ضربه صاعقه در ترانسفورماتور..... ۲۱
۲-۶-۱-تولید ولتاژ ضربه..... ۲۱
۲-۷-۲- اندازه‌گیری والتاژ ضربه ۲۴
۲-۷-۳-موج ضربه به فرم ریاضی ۲۵
فصل سوم:مدل خطوط انتقال چند سیمه ۲۶
۳-۱- مقدمه ۲۷
۳-۲- ساختار مدل خط انتقال چند فازه..... ۲۷
۳-۳-محاسبه پارامترهای مدل ۳۱
۳-۳-۱- ماتریس ظرفیت ۳۲
۳-۳-۲-ماتریس اندوکتانس ۳۵
۳-۳-۳-مقاومت سری..... ۳۷
۳-۳-۴-هدایت موازی ۳۷
۳-۴-چالشهای محاسباتی مدل MTL..... ۳۸
فصل چهارم: مدلسازی و شبیه سازیهای ترانسفورماتور نمونه ٤١

۴-۱- مقدمه ۴۲
۴-۲- مشخصات ترانسفورماتور نمونه ۴۲
۴-۳-الگوریتم حل مدل ۴۳
۴-۴- نتایج شبیه سازی مدل ۴۶
۴-۴-۱- شبیه سازی حالت گذرای ضربه سیم پیچ ۴۶
۴-۴-۲-توزیع ولتاژ اولیه و نهایی در سیم پیچ: ۵۵
۴-۴-۳- شبیه سازی حالت گذرای ضربه صاعقه در سیم پیچ ۶۱
۴-۴-۳-۱-نتایج شبیه سازی ضربه صاعقه بر روی ترانسفوماتور نمونه ٦٣
۴-۴-۳-۲-بررسی گذرای ضربه در یک ترانسفورماتور توزیع: ۷۸
فصل پنجم: شبیه سازی‌های مدل ساده شده خط انتقال در ترانسفورماتور ۸۲
۵-۱- مقدمه ۸۳
۵-۲- حل معادلات مدل ۸۳
۵-۳- نتایج شبیه سازی مدل ۸۵
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ٩٤
نتیجه‌گیری ۹۵
پیشنهادات: ۹۷
مراجع: ۹۸

فهرست اشکال:

شکل(۲-۱): اضافه ولتاژ ساده صاعقه ۱۱

شکل(۲-۲): امواج اضافه ولتاژ پریودیک ۱۲

شکل(۲-۳):شبکه خازنی حاکم بر ساختار یک ترانسفورماتور ۱۳

شکل(۲-۴): شبکهٔ نردبانی یک سیم پیچ لایه ای ۱۳

شکل(۲-۵): مدل قسمتی از سیم‌پیچ ۱۳

شکل(۲-۶): اثر پارامتر α بر توزیع ولتاژ ضربه (انتهای سیم‌پیچ زمین شده است ۱۶

شکل(۲-۷): حداکثر ولتاژ نقاط مختلف حین نوسانات گذرا به ازای مقادیر مختلف ۱۷

شکل(۲-۸): شکل موج ساده شدهٔ ضربه با پیشانی موج غیر صفر و پشت موج بینهایت ۱۸

شکل(۲-۹): اثر پیشانی موج ضربه بر نوسانات سیم‌پیچ ۱۹

شکل(۲-۱۰): نوسانات ولتاژ سیم‌پیچ بر اثر اعمال ولتاژ ۲۰

شکل(۲-۱۱): مدار معدل ژنراتور ضربه ۲۲

شکل(۲-۱۲): شکل موج ضربه صاعقه استاندارد ۲۲

شکل(۲-۱۳): شکل موج ضربه کلید زنی استاندارد ۲۳

شکل(۲-۱۴): شکل موج ضربه صاعقه پشت بریده استاندارد ۲۴

شکل(۲-۱۵): سیستم اندازه گیری ولتاژ ضربه ۲۴

شکل(۳-۱): مدل یک طول کوچک از خط انتقال تک سیمه ۲۷

شکل(۳-۲): مدل خط انتقال چند سیمه برای سیم ۲۸

شکل(۳-۳): ساختار ترانسفورماتور روغنی با سیم پیچ دیسکی فشار قوی ۳۲

شکل(۳-۴): مدل هندسی ساده شده عایق بین دو دیسک ۳۳

شکل(۳-۵): مدل هندسی ساده شده عایق بین دو سیم پیچ HV و LV ۳۴

شکل(۳-۶):دو هادی دایره‌ای هم مرکز برای محاسبه اندوکتانس متقابل ۳۶

شکل(۴-۱):) تابع فرکانسی ادمیتانس ورودی سیم پیچ ترانسفورماتور در بازه وسیع فرکانسی ۴۷

شکل(۴-۲): تابع فرکانسی ادمیتانس ورودی سیم پیچ ترانسفورماتور در بازه وسیع فرکانسی بر حسب لگاریتم ۴۸

شکل(۴-۳): تابع فرکانسی امپدانس ورودی سیم پیچ ترانسفورماتور در بازه وسیع فرکانسی ۴۸

شکل(۴-۴): نحوه توزیع ولتاژ در حلقه های سیم پیچ در فرکانس ۱ کیلو هرتز ۴۹

شکل(۴-۵): ولتاژ در سر ابتدایی هر حلقه از سیم پیچ در چند فرکانس رزونانس تمونه ۵۱

شکل(۴-۶): پاسخ فرکانسی تابع ولتاژ هر حلقه به ولتاژ ابتدای سیم پیچ ۵۲

شکل(۴-۷): پاسخ فرکانسی اختلاف ولتاژ بین هر دو حلقه در رنج فرکانسی وسیع از دو نمای مختلف ۵۳

شکل(۴-۸): اختلاف ولتاژ بین حلقه های سیم پیچ ۵۴

شکل(۴-۹): اختلاف ولتاژ بین ۱۰۰ حلقه اول سیم پیچ ۵۵

شکل(۴-۱۰): نحوه توزیع اولیه ولتاژ بین الف) تمام حلقه های سیم پیچ. ب) ۵۰ حلقه اول سیم پیچ ۵۷

شکل(۴-۱۱) : نحوه توزیع اولیه ولتاژ بین دیسکهای سیم پیچ ۵۹

شکل(۴-۱۲): توزیع اولیه ولتاژ در طول سیم پیچ به ازای دو مقدار متفاوت خازن طولی ۶۰

شکل(۴-۱۳): توزیع ولتاژ نهایی در طول سیم پیچ ترانسفورماتور ۶۱

شکل(۴-۱۴): سیگنال ضربه صاعقه تولید شده به صورت نرم افزاری ۶۲

شکل(۴-۱۵): طیف فرکانسی موج ضربه صاعقه استاندارد ۶۳
شکل(۴-۱۶): ادمیتانس ورودی سیم پیچ در بازه وسیع فرکانسی (دامنه و فاز بر حسب فرکانس) ۶۴
شکل(۴-۱۷): اندازه جریان ورودی سیم پیچ در بازه وسیع فرکانسی ۶۵
شکل(۴-۱۸): توزیع ولتاژ در ابتدای هر حلقه از سیم پیچ در چند فرکانس نمونه ۶۷
شکل(۴-۱۹): توزیع ولتاژ در تمام حلقه های سیم پیچ در رنج فرکانسی وسیع: ۶۸
شکل(۴-۲۰):ولتاژ چند حلقه نمونه از سیم پیچ به ورودی ضربه صاعقه استاندارد ۶۹
شکل(۴-۲۱): ولتاژ چند حلقه نمونه از دیسک اول به ورودی ضربه صاعقه استاندارد ۶۹
شکل(۴-۲۲): ولتاژ چند حلقه نمونه از دیسک های ابتدایی به ورودی ضربه صاعقه استاندارد ۷۰
شکل(۴-۲۳): ولتاژ چند حلقه نمونه از دیسک۳۳ ام (اواسط سیم پیچ)به ورودی ضربه صاعقه استاندارد..... ۷۰
شکل(۴-۲۴): ورودی ضربه صاعقه ولتاژ چند حلقه نمونه از دیسک۳۶ ام ۷۱
شکل(۴-۲۵):ولتاژ حلقه‌های سیم پیچ ناشی از اعمال ورودی ضربه صاعقه استاندارد از دو نمای مختلف..... ۷۳
شکل(۴-۲۶): ماکزیمم ولتاژ ایجاد شده بر روی حلقه های سیم پیچ ۷۴
شکل(۴-۲۷): اختلاف ولتاژ بین ۵۰ حلقه اول سیم پیچ تحت ضربه صاعقه ۷۵
شکل(۴-۲۸): اختلاف ولتاژ بین ۵۰ حلقه‌های۵۰ ام تا ۲۵۰ ام سیم پیچ تحت ضربه صاعقه..... ۷۵
شکل(۴-۲۹): اختلاف ولتاژ بین حلقه های ۲۵۰ ام تا ۴۵۶ ام سیم پیچ تحت ضربه صاعقه..... ۷۶
شکل(۴-۳۰): توزیع ولتاژ در طول سیم پیچ در چند زمان مختلف ۷۷
شکل(۴-۳۱): تابع فرکانسی ادمیتانس ورودی سیم پیچ ترانسفورماتور در بازه وسیع فرکانسی ۷۸
شکل(۴-۳۲): نحوه توزیع اولیه ولتاژ بین حلقه های سیم پیچ..... ۷۹