بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید چمران اهواز

پردیس دانشگاهی

۹۳٤۰۲۰۲۳۲

پایان‌نامه کارشناسی ارشد برق

گرایش قدرت

عنوان: بررسی حالت‌های گذرای ناشی از رزونانس ترانسفورماتور زمین با شبکه فشار متوسط و راهکارهای مقابله با آن

استاد راهنما:

دکتر محمود جورابیان

استاد مشاور:

دکتر علیرضا صفاریان

نگارنده:

محمود معتمدی

شهریورماه سال ۱۳۹۳

باسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز
پردیس دانشگاهی

(نتیجه ارزشیابی پایان‌نامه کارشناسی ارشد)

پایان‌نامه آقای محمود معتمدی دانشجوی رشته مهندسی برق گرایش قدرت

دانشکده مهندسی به شماره دانشجویی ۹۱۵۵۵۳۹۱۲۲

با عنوان :

بررسی حالت‌های گذرای ناشی از رزونانس ترانسفورماتور زمین با شبکه فشار متوسط و راهکارهای مقابله با آن

جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در تاریخ ۱۳۹۳/۶/۳۱ توسط هیأت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه عالی تصویب گردید.

۱.	اعضای هیأت داوران :	رتبه علمی	امضاء
	استاد راهنما: دکتر محمود جورابیان	استاد	
	استاد مشاور : دکتر علیرضا صفاریان	استادیار	
	استاد داور : دکتر مرتضی رزاز	دانشیار	
	استاد داور : دکتر رضا کیانی نژاد	دانشیار	
	نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر محسن ریحانیان	دانشیار	
۲.	مدیر گروه : دکتر محمد سروش	استادیار	
۳.	معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر علی حقیقی	استادیار	
۴.	مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر عبدالرحمن راسخ	استاد	

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به:

- پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یاوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

- به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است.

نهایت تقدیر و تشکر را دارم :

از استاد ارجمند جناب آقای **پروفسور محمود جورابیان** که با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند.

از استاد گرامی و صبور، جناب آقای **دکتر علیرضا صفاریان** که زحمت مشاوره این پایان نامه را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید.

و از استادان عزیز:

جناب آقای **دکتر مرتضی رزاز** و جناب آقای **دکتر رضا کیانی نژاد** که زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده

نام خانوادگی : معتمدی	**نام:** محمود	**شماره دانشجویی :** ۹۱۵۵۵۳۹۱۲۲
عنوان پایان نامه : بررسی حالت‌های گذرای ناشی از رزونانس ترانسفورماتور زمین با شبکه فشار متوسط و راهکارهای مقابله با آن		
استاد/ اساتیدراهنما: پروفسور محمود جورابیان		
استاد/ اساتید مشاور: دکتر علیرضا صفاریان		
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	**رشته:** مهندسی برق	**گرایش:** قدرت
دانشگاه : شهید چمران اهواز	**دانشکده:** مهندسی	**گروه :** برق
تاریخ فارغ التحصیلی : ۱۳۹۳/۶/۳۱		**تعداد صفحه: ۱۱۷**

کلید واژه ها :حالت‌های گذرا، شبکه فشار متوسط، رزونانس، فرورزونانس،ترانسفورماتور زمین

چکیده: در این پایان‌نامه به بررسی حالت‌های گذرای ناشی از رزونانس و فرورزونانس ترانسفورماتور زمین با شبکه فشار متوسط پرداخته شده است. در ابتدا داده های یک شبکه واقعی مربوط به پست برق شماره ۱۰ شرکت فولاد خوزستان گردآوری شده است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار تحلیل حالت‌های گذرا **PSCAD/EMTDC** ، شبیه‌سازی‌های زیادی به منظور تحلیل حالت‌های گذرا، شامل اضافه ولتاژها و اضافه جریان‌های به وجود آمده در شبکه فشار متوسط مورد مطالعه انجام شده است. سپس حالت هایی از پیکر بندی شبکه که مستعد ایجاد رزونانس و فرورزونانس می باشند، شناسایی شده اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می دهندکه جریان نقطه صفر ترانسفورماتور زمین می‌تواند به عنوان یکی از نشانه های رزونانس ترانسفورماتور زمین مورد استفاده قرار گیرد. برای مقابله با رزونانس ترانسفورماتور زمین، استفاده از مقاومت در نقطه صفر این تجهیز برای میرا کردن نوسان های جریان پیشنهاد شده است. در مدار قرار دادن بار به صورت پیوسته برای ایجاد تلفات به منظور میرا کردن اعوجاج های ولتاژ ناشی از فرو رزونانس نیز از نتایج شبیه‌سازی بوده است. در بررسی های به عمل آمده بر روی نتایج شبیه‌سازی مشخص گردیده است که تغییر در امپدانس معادل شبکه با استفاده از خازن‌های جبران ساز می‌تواند با برهم زدن تعادل راکتانس سلفی و خازنی شبکه در حالت رزونانس، از وقوع این پدیده جلوگیری نماید. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می دهند که در حالت وقوع پدیده رزونانس در شبکه مورد مطالعه، دامنه هارمونیک پنجم به شدت افزایش می یابد و می توان از این پارامتر برای شناسایی وقوع این پدیده استفاده نمود. از دیگر نتایج به دست آمده در این پایان نامه، لزوم تغییر در منطق سیستم حفاظتی و کنترلی پست برق ، جهت جلوگیری از در مدار ماندن ترانسفورماتور زمین پس از قطع برق شین اصلی پست به عنوان راهکار پیشنهادی برای پیشگیری و محدود کردن دامنه نوسان‌های رزونانس می‌باشد. علاوه بر این نتایج شبیه‌سازی نشان می دهند اعوجاج‌های مربوط به این حالت‌های گذرا بر روی شبکه بالادست تاثیری ندارند ولی به صورت مستقیم به شبکه پایین دست منتقل می شوند. شبیه‌سازی های انجام شده نشان می دهند که دامنه شکل موج ولتاژ قبل از بروز اغتشاش یا به عبارت دیگر لحظه کلیدزنی نقش مهمی در دامنه اعوجاج های رزونانس دارد و با افزایش دامنه ولتاژ در لحظه کلید زنی اعوجاج ها تشدید می شوند. این مساله بر لزوم کنترل لحظه کلید زنی در شبکه تاکید می نماید. در قسمتی دیگر از این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی نشان می دهند که اتصال مثلث و یا اتصال ستاره زمین نشده تجهیزات بر خلاف اتصال ستاره زمین شده، تأثیر مثبتی در میرا کردن نوسان های رزونانس ندارد. همچنین نتایج نشان می دهند که مقاومت خطا تأثیر مشابه ای با مقاومت نقطه صفر ترانسفورماتور زمین در میرا کردن اعوجاج ها رزونانس دارد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول

مقدمه و طرح مسئله ۱

۱-۱ موضوع پژوهش ۳

۱-۲ اهمیت و ضرورت ۱

۱-۳ بیان مسئله ۲

۱-٤ اهداف ۲

۱-۵ پرسش‌ها یا فرضیه‌ها، فرضیات اولیه و محدودیت‌ها ۳

۱-٦ تعریف اصطلاحات و مفاهیم مهم ۳

۱-۷ ساختار پایان‌نامه ۵

۱-۸ مرور پژوهش های پیشین ٦

فصل دوم

انواع سیستم های زمین و ترانسفورماتور زمین ۱۰

مقدمه ۱۰

۲-۱ اهداف سیستم زمین ۱۰

۲-۲ نکات فنی مربوط به شبکه و سیستم حفاظتی از دید سیستم زمین به هنگام طراحی شبکه ۱۱

۲-۳ نکات ایمنی سیستم‌های مختلف زمین کردن شبکه ۱۳

۲-٤ نکات بهره‌برداری سیستم‌های مختلف زمین کردن شبکه ۱٤

۲-۵ انواع سیستم های زمین ۱٤

۲-٦ ایجاد نقطه صفر مصنوعی در شبکه زمین نشده ۲۳

۲-٦-۱ ایجاد نقطه صفر مصنوعی در شبکه با در دسترس بودننقطه صفر شبکه ۲۳

۲-٦-۲ ایجاد نقطه صفر مصنوعی در شبکه با در دسترس نبودن نقطه صفر شبکه ۲٤

۲-۷ ترانسفورماتور زمین ۲۵

۲-۷-۱ اصول کار ترانسفورماتور زمین ۲۵

۲-۷-۲ آرایش‌های مختلف ترانسفورماتور زمین با طرح‌های حفاظتی مربوطه ۲۶
۲-۷-۳ مشخصات مقاومت نقطه صفر ترانسفورماتورهای زمین ۲۷
۲-۷-٤ شاخص‌های تعیین و انتخاب مقادیر نامی ۲۸
۲-۷-۵ اهداف استفاده از ترانسفورماتور زمین ۲۹
۲-۷-٦ انواع ترانسفورماتور زمین ۳۰
۲-۸ بررسی تأثیر روش زمین شدن شبکه قدرت بر روی برق‌گیر ۳۱
۲-۸-۱ انتخاب انواع برق‌گیر ۳۱
۲-۸-۲ انتخاب برق‌گیر برای دو شبکه نمونه ۳۷
۲-۸-۳ تأثیر مقادیر حفاظتی به دست آمده در انتخاب برق‌گیر و قیمت آن ۳۸
۲-۹ بررسی تأثیر روش زمین شدن شبکه قدرت بر روی سیستم حفاظتی شبکه‌های زمین نشده و زمین شده با مقاومت ۳۹
۲-۹-۱ حفاظت شبکه‌های زمین نشده ۳۹
۲-۹-۲ حفاظت شبکه‌های زمین شده با مقاومت ٤۱
۲-۹-۳ مقایسه حفاظت‌های خطای تک فاز به زمین بکار رفته در سیستم‌های زمین نشده و زمین شده با مقاومت ٤۳

فصل سوم

رزونانس و فرورزونانس ترانسفورماتور زمین در شبکه فشار متوسط ٤٤
مقدمه ٤٤
۳-۱ تشریح مبنای علمی مفاهیم رزونانس و فرورزونانس ٤٤
۳-۲ نیازمندی‌های فرورزونانس ٤٦
۳-۳ عوامل به وجود آورنده فرورزونانس ٤۷
۳-٤ پیامدهای فرورزونانس ٤۷
۳-۵ پیکربندی‌های فرورزونانس ٤۸
۳-٦ تقسیم‌بندی فرورزونانس بر اساس محتوای فرکانسی ٤۹
۳-۷ راه‌های کلی مقابله با فرورزونانس ۵۱
۳-۸ تشریح مشکل رزونانس و فرورزونانس ترانسفورماتور زمین در شبکه فشارمتوسط ۵۲
۳-۸-۱ رزونانس ترانسفورماتور زمین در اثر خطای تک فاز به زمین ۵۳

۳-۸-۲ مدار معادل شبکه در حالت خطای تک فاز به زمین با استفاده از شبکه توالی ۵٤
۳-۸-۳ به دست آوردن معادلات شبکه ۵۵
۳-۸-٤ مدار معادل نهایی با استفاده از شبکه‌های توالی ۵۷
۳-۸-۵ معادلات شبکه ۵۹
۳-۸-٦ فرورزونانس ترانسفورماتور زمین در اثر خطای تک فاز به زمین ٦۱

فصل چهارم

ارائه نتایج شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها ٦۳
مقدمه ٦۳
٤-۱ معرفی نرم‌افزار ٦٤
٤-۲ تشریح روش مورد استفاده در پژوهش ٦٤
٤-۳ نمودار تک خطی شبکه مورد مطالعه ٦۵
٤-٤ بررسی ایجاد رزونانس و فرو رزونانس در حالت‌های وجود و یا عدم وجود ترانسفورماتور زمین و جبران ساز خازنی ٦۸
٤-٤-۱ شبکه ٦/٦ کیلوولت بدون ترانسفورماتور زمین، بدون جبران ساز، بدون بار. ٦۸
٤-٤-۲ شبکه ٦/٦ کیلوولت بدون ترانسفورماتور زمین، با جبران ساز خازنی ۳/۲ مگاواری اتصال مثلث، بدون بار ۷۰
٤-٤-۳ شبکه ٦/٦ کیلوولت بدون ترانسفورماتور زمین با جبران ساز خازنی ۳/۲ مگاواری اتصال ستاره، بدون بار ۷۲
٤-٤-٤ شبکه ٦/٦کیلوولت بدون ترانسفورماتور زمین بدون جبران ساز خازنی با بار مقاومتی یک مگاواتی اتصال ستاره ۷۳
٤-٤-۵ شبکه ٦/٦کیلوولت با ترانسفورماتور زمین،با جبران ساز خازنی ۳/۲مگاواری، اتصال ستاره بدون بار ۷۳
٤-٤-٦ شبکه ٦/٦کیلوولت با ترانسفورماتور زمین با جبران ساز خازنی ۳/۲مگاواری، اتصال مثلث بدون بار ۷۷
٤-٤-۷ شبکه ٦/٦کیلوولت با ترانسفورماتور زمین، بدون جبران ساز خازنی، بدون بار ۷۸
٤-٤-۸ شبکه ٦/٦کیلوولت با ترانسفورماتور زمین بدون جبران ساز خازنی با بار مقاومتی یک مگاواتی اتصال ستاره ۸۰

٤-٥ بررسی محتوا هارمونیکی ولتاژها در حالت‌های مختلف وجود و یا عدم وجود ترانسفورماتور زمین و جبران ساز خازنی در شبکه ٨١
٤-٥-١ شبکه ٦/٦ کیلوولت با ترانسفورماتور زمین، با جبران ساز خازنی ٣/٢ مگاواری اتصال مثلث، بدون بار ٨١
٤-٥-٢ شبکه ٦/٦ کیلوولت با ترانسفورماتور زمین، بدون جبران ساز خازنی، بدون بار ٨٢
٤-٥-٣ شبکه ٦/٦ کیلوولت با ترانسفورماتور زمین، بدون جبران ساز خازنی، با بار مقاومتی یک مگاواتی اتصال ستاره ٨٢
٤-٦ بررسی تأثیر حالت‌های مختلف برداشته شدن خطا در حضور ترانسفورماتور زمین و جبران ساز خازنی بر روی رزونانس و فرورزونانس ٨٣
٤-٦-١ برداشته شدن خودکار خطا (FAULT OFF) ٨٣
٤-٦-٢ برداشته شدن خطا توسط رله حفاظتی فیدر معیوب(BREAKER OFF) ٩٠
٤-٦-٣ برداشته شدن خطا توسط رله حفاظتی فیدر اصلی(MAIN OFF) ٩٥
٤-٦-٤ جمع بندی نتایج شبیه‌سازی حالت‌های مختلف برداشته شدن خطا در حضور ترانسفورماتور زمین و جبران ساز خازنی بر روی رزونانس و فرورزونانس ٩٩
٤-٧ بررسی تأثیر لحظه کلیدزنی و مقاومت خطا بر اعوجاج ها و انتقال آنها به شبکه‌های بالادست و پایین دست ١٠٠
٤-٧-١ بررسی تأثیر لحظه کلید زنی ١٠٠
٤-٧-٢ بررسی تأثیر مقاومت خطا ١٠١
٤-٧-٣ بررسی تأثیر اعوجاج ناشی از رزونانس و فرورزونانس در شبکه‌های بالادست و پایین‌دست شبکه ٦/٦کیلوولت مورد مطالعه ١٠٤
٤-٨ محاسبه مقادیر نامی ترانسفورماتور زمین محاسبه مقادیر نامی ترانسفورماتور زمین مورد نیاز برای زمین کردن شبکه ٦/٦ کیلو ولت پست بر مورد مطالعه ١٠٥
٤-٨-١ تعیین مقدار $3I_{C0}$ ١٠٥
٤-٨-٢ تعیین مقدار مقاومت کل ترانسفورماتور زمین(ترانسفورماتور زمین و مقاومت) ١٠٧
٤-٨-٣ محاسبه مقادیر نامی ترانسفورماتور زمین ١٠٨

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد جهت ادامه پژوهش ١٠٩

۵-۱ بیان نتایج اصلی حاصله و اهمیت آن‌ها ۱۰۹
۵-۲ ارائه پیشنهادها برای ادامه کار ۱۱۱
۵-۳ فهرست مقالات ارائه‌شده مستخرج از پایان‌نامه ۱۱۲
منابع ۱۱۳
چکیده انگلیسی ۱۱۶

فهرست شکل‌ها

فصل دوم

شکل(۲-۱): خطای تک فاز به زمین در یک شبکه زمین نشده ۱۵
شکل(۲-۲): جابجایی ولتاژ نقطه صفر ۱۵
شکل(۲-۳): خطای تک فاز به زمین در یک شبکه مستقیم زمین شده ۱۷
شکل(۲-٤):خطای تک فاز به زمین در یک شبکه زمین شده با مقاومت ۱۸
شکل(۲-۵): خطای تک فاز به زمین در یک شبکه زمین شده رزونانسی ۱۹
شکل(۲-٦): زمین کردن نقطه صفر با استفاده از یک مقاومت مستقیماً نصب‌شده در نقطه صفر سیم‌پیچ ستاره ترانسفورماتور ۲۳
شکل(۲-۷): زمین کردن نقطه صفر شبکه با استفاده از یک ترانسفورماتور تک فاز در نقطه صفر سیم‌پیچ ستاره ترانسفورماتور ۲۳
شکل(۲-۸): زمین کردن شبکه با استفاده از ترانسفورماتور ستاره مثلث و نصب مقاومت در نقطه صفر سیم‌پیچ ستاره ۲٤
شکل(۲-۹): زمین کردن شبکه با استفاده از سیم‌پیچ زیگزاگ و نصب مقاومت درنقطه صفرآن.. ۲٤
شکل(۲-۱۰): آرایش سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور زمین زیگزاگ ۲۵
شکل(۲-۱۱): روش مرسوم اتصال یک ترانسفورماتور زمین به یک شبکه زمین نشده ۲٦
شکل(۲-۱۲): منحنی‌های حفاظتی کابل ها و عملکرد رله‌ها ۲۹
شکل(۲-۱۳): منحنی ولتاژ فرکانس قدرت بر حسب زمان یک برق‌گیر نمونه ۳۳
شکل(۲-۱٤): جریان خطای تک فاز خازنی در شبکه زمین نشده ۳۹
شکل(۲-۱۵): تجهیزات ناظر وضعیت عایقی ٤۰
شکل(۲-۱٦): حفاظت جابجایی نقطه صفر و حفاظت خطای زمین جهت‌یاب ٤۰
شکل(۲-۱۷): زمین کردن با نصب مقاومت بین زمین و نقطه صفر ٤۱
شکل(۲-۱۸): حفاظت‌های مورد نیاز برای خطای فاز به زمین در شبکه زمین شده با مقاومت ٤۲

فصل سوم

شکل(۳-۱): مدار RLC سری تغذیه شده با ولتاژ U ٤۵
شکل(۳-۲): نمودار برداری مدار RLC سری تغذیه شده با ولتاژ U ٤۵
شکل(۳-۳): مدار RLC موازی تغذیه شده با منبع جریان J ٤۵

شکل(۳–٤): ترانسفورماتورهای ولتاژ، برق دار شده توسط خازن‌های متعادل‌کننده ولتاژ کلیدهای فشارقوی ٤٨
شکل(۳–٥): ترانسفورماتورهای ولتاژ، در یک سیستم زمین نشده و یا رزونانسی ٤٨
شکل(۳–٦): برق دار کردن دو فاز ترانسفورماتور قدرت اتصال مثلث در یک سیستم زمین نشده و یا رزونانسی ٤٩
شکل(۳–۷): برق دار کردن دو فاز ترانسفورماتور قدرت اتصال ستاره زمین نشده در یک سیستم زمین نشده و یا رزونانسی ٤٩
شکل(۳–۸): نصب مقاومت در اتصال مثلث باز برای میرا کنندگی توالی صفر ٥٢
شکل(۳–۹): نصب مقاومت در اتصال ستاره ثانویه برای میرا کنندگی فاز ٥٢
شکل(۳–۱۰): نمودار تک خطی سیستم مورد مطالعه ٥٤
شکل(۳–۱۱): شبکه‌های توالی برای خطای تک فاز به زمین صلب در سیستم مورد مطالعه ٥٥
شکل(۳–۱۲): نمودار تک خطی ساده‌شده سیستم مورد مطالعه ٥٥
شکل(۳–۱۳): مدار معادل ساده‌شده سیستم مورد مطالعه ٥٦
شکل(۳–۱٤): مدار معادل ساده‌شده سیستم مورد مطالعه در حالت خطای تک فاز به زمین ٥٦
شکل(۳–۱٥): مدار معادل جداکننده بازه‌های زمانی قبل و بعد از خطا ٥۷
شکل(۳–۱٦): شبکه‌های توالی برای خطای تک فاز به زمین در سیستم مورد مطالعه در بازه زمانی $t_1 < t < t_2$ ٥۸
شکل(۳–۱۷): شبکه‌های توالی ساده‌شده برای خطای تک فاز به زمین صلب در سیستم مورد مطالعه در بازه زمانی $t_1 < t < t_2$ ٥۸
شکل(۳–۱۸): مدار معادل نهایی شبکه‌های توالی برای خطای تک فاز به زمین صلب در سیستم مورد مطالعه در بازه زمانی $t_1 < t < t_2$ ٥۹
شکل(۳–۱۹): مدار معادل نهایی شبکه‌های توالی برای خطای تک فاز به زمین صلب در سیستم مورد مطالعه در بازه زمانی $t < t_2$ ٥۹

فصل چهارم

شکل(٤–۱): نمودار تک خطی شبکه مورد مطالعه ٦٦
شکل(٤–۲): نمودار تک خطی شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار PSCAD ٦۷

شکل(٤-٣): اضافه ولتاژ فاز سالم قبل از آغاز خطا در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن توزیع‌شده در شبکه ٦٩
شکل(٤-٤): جریان نقطه صفر ترانسفورماتور کمکی در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن توزیع‌شده در شبکه ٦٩
شکل(٤-٥): جریان خازن توزیع‌شده شبکه در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن توزیع‌شده شبکه ٦٩
شکل(٤-٦): اضافه ولتاژ فاز معیوب در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن شبکه ٧٠
شکل(٤-٧): اضافه ولتاژ فاز سالم در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن شبکه ٧٠
شکل(٤-٨): اضافه ولتاژ فاز معیوب در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن شبکه با فرض وصل ماندن کلید جبران ساز پس از قطع خطا ٧١
شکل(٤-٩): اضافه ولتاژ فاز سالم در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن شبکه با فرض وصل ماندن کلید جبران ساز پس از خطا ٧١
شکل(٤-١٠): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن شبکه ٧٢
شکل(٤-١١): اضافه ولتاژ فاز معیوب در رزونانس بین ترانسفورماتور کمکی و خازن شبکه با فرض وصل ماندن کلید جبران ساز پس از قطع خطا ٧٢
شکل(٤-١٢): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم با وجود بار مقاومتی یک مگاواتی ٧٣
شکل(٤-١٣): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در فرورزونانس ترانسفورماتور زمین ٧٤
شکل(٤-١٤): شکل موج ولتاژ فاز معیوب در اثر فرورزونانس شبه متناوب در ترانسفورماتور زمین ٧٤
شکل(٤-١٥): شکل موج ولتاژ فاز معیوب(فازA)و فاز سالم (فازB) در اثر حذف فرورزونانس شبه متناوب در ترانسفورماتور زمین ٧٥
شکل(٤-١٦): میرا شدن جریان نقطه صفر در ترانسفورماتور زمین پس از قطع هم زمان کلید اصلی و ترانسفورماتور زمین ٧٥
شکل(٤-١٧): تأخیر در میرا شدن اضافه ولتاژها پس از قطع هم زمان کلید اصلی و ترانسفورماتور زمین به علت در مدار بودن جبران ساز خازنی ٧٥
شکل(٤-١٨): تأخیر در میرا شدن جریان نقطه صفر در ترانسفورماتور زمین پس از قطع هم زمان کلید اصلی و ترانسفورماتور زمین به علت در مدار بودن جبران ساز خازنی ٧٦

شکل(٤-١٩): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین ٧٦
شکل(٤-٢٠): جریان نقطه صفر در ترانسفورماتور زمین به علت در مدار بودن جبران ساز خازنی پس از قطع کلید اصلی ٧٧
شکل(٤-٢١): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین به علت در مدار بودن جبران ساز خازنی پس از قطع کلید اصلی ٧٧
شکل(٤-٢٢): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین ٧٨
شکل(٤-٢٣): میرا شدن اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم با قطع هم زمان کلید ترانسفورماتور زمین و کلید اصلی ٧٨
شکل(٤-٢٤): پایین بودن جریان نقطه صفر ترانسفورماتور زمین به دلیل اتصال مثلث جبران ساز خازنی ٧٨
شکل(٤-٢٥): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین ٧٩
شکل(٤-٢٦): جریان نقطه صفر در ترانسفورماتور زمین در رزونانس ترانسفورماتور زمین ٧٩
شکل(٤-٢٧): میرا شدن جریان نقطه صفر در ترانسفورماتور زمین پس از قطع هم زمان کلید اصلی و ترانسفورماتور زمین ٧٩
شکل(٤-٢٨): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین ٨٠
شکل(٤-٢٩): میرا شدن اضافه ولتاژهای رزونانس ترانسفورماتور زمین با قطع هم زمان کلید اصلی و ترانسفورماتور زمین ٨٠
شکل ٤-٣٠: دامنه اعوجاج هارمونیک ها در شبکه ٦/٦ کیلوولت با ترانسفورماتور زمین، با جبران ساز خازنی ٣/٢ مگاواری اتصال مثلث، بدون بار ٨١
شکل(٤-٣١): دامنه اعوجاج هارمونیک ها در شبکه ٦/٦کیلوولت با ترانسفورماتور زمین با جبران ساز خازنی ٣/٢ مگاواری اتصال مثلث بدون بار ٨٢
شکل(٤-٣٢): دامنه اعوجاج هارمونیک ها در شبکه ٦/٦کیلوولت با ترانسفورماتور زمین بدون جبران ساز خازنی با بار مقاومتی یک مگاواتی اتصال ستاره ٨٢
شکل(٤-٣٣): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین ٨٤
شکل(٤-٣٤): میرا شدن اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین ٨٤
شکل(٤-٣٥): تأخیر در میرا شدن جریان نقطه صفر ترانسفورماتور زمین در حالت بدون بار ٨٥
شکل(٤-٣٦): میرا شدن جریان نقطه صفر ترانسفورماتور زمین در حالت وجود بار ٨٥

شکل(٤-٣٧): میرا شدن اعوجاج‌ها پس از مدت زمان ۵ سیکل در حالت وجود بار ۸۵
شکل(٤-٣٨): عدم وجود اعوجاج ولتاژ پس از قطع کلید اصلی در حالت وجود بار ۸٦
شکل(٤-٣٩): اضافه ولتاژ فاز معیوب در رزونانس ترانسفورماتور زمین ۸٦
شکل(٤-٤٠): میرا شدن اعوجاج‌ها با قطع هم زمان کلید ترانسفورماتور زمین وکلید اصلی ۸۷
شکل(٤-٤١): دامنه جریان خطا (نقطه صفر ترانسفورماتور زمین) در حالت بدون مقاومت نقطه صفر ترانسفورماتور زمین ۸۷
شکل(٤-٤٢): دامنه جریان خطا (نقطه صفر ترانسفورماتور زمین) در حالت با مقاومت ۵ اهم ۸۸
شکل(٤-٤٣): فرکانس جریان خطا (نقطه صفر ترانسفورماتور زمین) در حالت بدون مقاومت نقطه صفر ترانسفورماتور زمین ۸۸
شکل(٤-٤٤): جریان خطا (نقطه صفر ترانسفورماتور زمین) در حالت با مقاومت ۵ اهم در نقطه صفر ترانسفورماتور زمین ۸۸
شکل(٤-٤٥): اعوجاج ولتاژ در حالت بدون مقاومت نقطه صفر ترانسفورماتور زمین ۸۹
شکل(٤-٤٦): نبود اعوجاج ولتاژ در شکل موج فاز معیوب در حالت با مقاومت پنج اهم در نقطه صفر ترانسفورماتور زمین ۸۹
شکل(٤-٤٧): دامنه جریان خطا (نقطه صفر ترانسفورماتور زمین) در حالت با مقاومت ۲۰ اهم ۹۰
شکل(٤-٤٨): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین ۹۰
شکل(٤-٤٩): میرا شدن اضافه ولتاژ فاز معیوب در رزونانس ترانسفورماتور زمین ۹۱
شکل(٤-٥٠): میرا شدن جریان نقطه صفر ترانسفورماتور زمین در حالت وجود بار ۹۱
شکل(٤-٥١) میرا شدن اعوجاج‌های شکل موج ولتاژ فاز معیوب پس از مدت زمان پنج سیکل در حالت وجود بار ۹۱
شکل(٤-٥٢): عدم وجود اعوجاج ولتاژ در شکل موج ولتاژ فاز معیوب(فازA)و فاز سالم (فازB) پس از قطع کلید اصلی در حالت وجود بار ۹۲
شکل(٤-٥٣): اضافه ولتاژ فاز معیوب(فازA)واعوجاج به وجود آمده در رزونانس ترانسفورماتور زمین با خازن توزیع‌شده شبکه ۹۲

شکل(٤-٥٤): حذف اضافه ولتاژ فاز معیوب(فازA)و اعوجاج به وجود آمده در رزونانس ترانسفورماتور زمین با خازن توزیع‌شده شبکه با قطع هم زمان کلید ترانسفورماتور زمین و کلید اصلی ۹۲
شکل(٤-٥٥): اعوجاج شدید در شکل موج ولتاژ فاز معیوب به علت فرورزونانس به وجود آمده بین ترانسفورماتور زمین و المان‌های فیدر معیوب ۹۳
شکل(٤-٥٦): اعوجاج در شکل موج ولتاژ فاز معیوب به علت فرورزونانس به وجود آمده بین ترانسفورماتور زمین و المان‌های فیدر معیوب.(قطع ترانسفورماتور زمین از مدار در زمان ۱,۲ ثانیه از شبیه‌سازی ۹۳
شکل(٤-٥٧): اعوجاج در شکل موج ولتاژ فاز معیوب به علت فرورزونانس به وجود آمده بین ترانسفورماتور زمین و المان‌های فیدر معیوب باوجود بار مقاومتی ۱۹ مگاواتی ۹۳
شکل(٤-٥٨): دامنه و میرایی جریان خطا در حالت با مقاومت ۵ اهم ۹٤
شکل(٤-٥٩): نبود اعوجاج در شکل موج ولتاژ فاز معیوب در حالت با مقاومت پنج اهم در نقطه صفر ترانسفورماتور زمین ۹٤
شکل(٤-٦٠): کاهش دامنه جریان خطا (جریان نقطه صفر ترانسفورماتور زمین) در حالت با مقاومت ۲۰ اهم ۹۵
شکل(٤-٦١): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم در رزونانس ترانسفورماتور زمین ۹۵
شکل(٤-٦٢): میرایی اضافه ولتاژ فاز معیوب(فازA) در رزونانس ترانسفورماتور زمین پس از خروج ترانسفورماتور زمین از مدار در زمان ۲,۳ ثانیه از شبیه‌سازی ۹٦
شکل(٤-٦٣): اضافه ولتاژ فازهای معیوب و سالم ۹٦
شکل(٤-٦٤): اضافه ولتاژ فاز معیوب در فرورزونانس ترانسفورماتور زمین ۹۷
شکل(٤-٦٥): میرایی اضافه ولتاژ فاز معیوب در فرورزونانس ترانسفورماتور زمین پس از خروج ترانسفورماتور زمین از مدار در زمان ۲ ثانیه از شبیه‌سازی ۹۷
شکل(٤-٦٦): کاهش دامنه جریان خطا در حالت با مقاومت ۲۰اهم ۹۸
شکل(٤-٦٧): میرایی سریع اضافه ولتاژ فاز معیوب(فازA)و فاز سالم (فازB) با خارج کردن ترانسفورماتور زمین از مدار در زمان ۲ ثانیه از شبیه‌سازی ۹۸
شکل(٤-٦٨): کاهش دامنه جریان خطا (جریان نقطه صفر ترانسفورماتور زمین) در حالت با مقاومت ۲۰ اهم ۹۹
شکل(٤-٦٩): شکل موج ولتاژ فاز معیوب پس از قطع خطا توسط

عملیات کلید زنی در لحظه 0.613 S ۱۰۱
شکل(٤-۷۰): شکل موج ولتاژ فاز معیوب پس از قطع خطا توسط
عملیات کلید زنی در لحظه 0.619 S ۱۰۱
شکل(٤-۷۱): شکل موج ولتاژ فاز معیوبپس از قطع خطا توسط
عملیات کلید زنی در لحظه 0.621 S ۱۰۱
شکل(٤-۷۲): اضافه ولتاژ فاز معیوب با مقاومت خطای صفر اهم ۱۰۲
شکل(٤-۷۳): اضافه ولتاژ فاز سالم با مقاومت خطای صفر اهم ۱۰۲
شکل(٤-۷٤): جریان خطا با مقاومت خطای صفر اهم ۱۰۳
شکل(٤-۷٥): اضافه ولتاژ فاز معیوب با مقاومت خطای یک اهم ۱۰۳
شکل(٤-۷٦): اضافه ولتاژ فاز سالم با مقاومت خطای یک اهم ۱۰۳
شکل(٤-۷۷): جریان خطا با مقاومت خطای یک اهم ۱۰۳
شکل(٤-۷۸): شکل موج ولتاژ فاز معیوب در شبکه ٦/٦ کیلوولت ۱۰٤
شکل(٤-۷۹): شکل موج ولتاژ فاز معیوب در شبکه ۰/٤کیلوولت ۱۰٥
شکل(٤-۸۰): شکل موج ولتاژ فاز معیوب در شبکه ۳۳کیلوولت ۱۰٥
شکل (٤-۸۱): جریان خطای تک فاز به زمین بدون حضور ترانسفورماتور زمین (جریان خازنی شبکه) ۱۰۷
شکل(٤-۸۲): جریان نقطه صفر ترانسفورماتور زمین با مقاومت نقطه صفر ٤ اهم ۱۰۸

فهرست جدول‌ها

فصل دوم

جدول(۲-۱): مقایسه ویژگی‌های گوناگون سیستم‌های زمین ۲۱
جدول(۲-۲): جریان‌های استاندارد نامی تخلیه برق‌گیر ۳۵
جدول(۲-۳): کلاس‌های استاندارد تخلیه خط برق‌گیر ۳۵
جدول(۲-٤): جریان‌های ضربه کلید زنی برای کلاس‌های مختلف برق‌گیر بر اساس استاندارد IEC 60099-4 ۳٦

فصل چهارم

جدول(٤-۱): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۱-۱ حالت اول ۸۳
جدول(٤-۲): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۱-۱ حالت دوم ۸٤
جدول(٤-۳): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۱-۲ ۸۵
جدول(٤-٤): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۱-۳ ۸٦
جدول(٤-۵): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۱-٤ ۸۷
جدول(٤-٦): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۱-۵ ۸۹
جدول(٤-۷): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۲-۱ ۹۰
جدول(٤-۸): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۲-۲ ۹۱
جدول(٤-۹): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۲-۳ ۹۲
جدول(٤-۱۰): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۲-۵ ۹٤
جدول(٤-۱۱): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۲-۵ ۹٤
جدول (٤-۱۲): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۳-۱ ۹٦
جدول(٤-۱۳): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۳-۲ ۹٦
جدول(٤-۱٤):تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۳-۳ ۹۷
جدول(٤-۱۵): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۳-٤ ۹۷
جدول(٤-۱٦): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-۳-۳-۵ ۹۸
جدول(٤-۱۷): جمع بندی نتایج شبیه‌سازی حالت‌های مختلف برداشته شدن خطا ۹۹
جدول(٤-۱۸): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-٤-۱ ۱۰۰
جدول(٤-۱۹): تنظیمات شبیه‌سازی بند ٤-٤-۲ ۱۰۲
جدول(٤-۲۰): مشخصات تجهیزات شبکه مورد مطالعه ۱۰٦

فصل اول

مقدمه و طرح مسئله

۱-۱ موضوع پژوهش

موضوع این پایان‌نامه بررسی حالت‌های گذرای ناشی از رزونانس ترانسفورماتور زمین در شبکه فشار متوسط و راهکارهای مقابله با آن می‌باشد. این حالت‌های گذرا به صورت معمول پس از به وجود آمدن اغتشاش در شبکه مانند بروز خطا و یا کلید زنی به وجود می‌آیند.

۱-۲ اهمیت و ضرورت

نقطه نوترال بسیاری از شبکه‌های فشار متوسط صنعتی در حال بهره‌برداری زمین نشده است. این شبکه‌ها در کنار مزایای بهره‌برداری خود که به بهبود فرآیند تولید مراکز صنعتی کمک می‌کند، دارای معایبی مانند بروز اضافه ولتاژهای زیاد در هنگام بروز خطای تک فاز، اضافه ولتاژهای ناشی از پدیده قوس زمین، تبدیل خطاهای فاز به زمین به خطاهای دو فاز و سه فاز سنگین و...، می‌باشند. برای دوری جستن از خسارات مربوط به معایب بالا در گذشته گرایشی در طراحان شبکه برای زمین کردن این نوع شبکه ایجادشده است. به دلیل اینکه این شبکه‌ها در حال بهره‌برداری بوده و امکان انجام تغییرات اساسی در ساختار آن‌ها، مانند تعویض ترانسفورماتورهای قدرت موجود (با نقطه صفر زمین نشده) و... وجود ندارد، به ناچار مهندسان طراح اقدام به زمین کردن این شبکه‌ها از طریق ایجاد نقطه صفر مصنوعی می‌نمایند. این اقدام بایستی بتواند ضمن از بین بردن معایب شبکه‌های زمین نشده که پیش از این بیان شد، کماکان مزایای بهره‌برداری اولیه