

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
وَأَنْتَ يَا مُحَمَّدُ  
أَنْتَ مُحَمَّدٌ بْنُ عَبْدِ اللَّهِ  
وَأَبِيكَ عَبْدُ اللَّهِ بْنُ عَبْدِ  
مُطَّلِبٍ وَكَاتِبُكَ  
أَبِي بَكْرٍ



دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دکتری مهندسی برق گرایش قدرت

**حفاظت دیفرانسیل هوشمند ترانسفورماتور قدرت با استفاده از تبدیل S**

دانشجو:

علی اکبر عبدوس

استاد راهنما:

دکتر زهرا مروج

استاد مشاور:

دکتر مجید صنایع پسند

بهمن ۱۳۹۱



دانشگاه سمنان

# صورتجلسه دفاعیه رساله دکتری

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

مشخصات دانشجو :

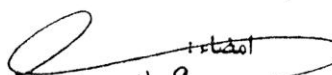
نام : **علی اکبر** نام خانوادگی : **عبدوس** شماره دانشجویی : **۸۷۱۱۱۱۴۰۰۱**

رشته : **برق** گرایش : **قدرت** تاریخ دفاع : **۹۱/۱۱/۹**


عنوان پایان نامه : **حفاظت دیفرانسیل هوشمند ترانسفورماتور قدرت با استفاده از تبدیل S**

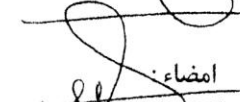
تعداد واحد : **۲۴ واحد** نمره پایان نامه : **۱۹/ -** به حروف : **نوزده و ۴**

درجه ارزشیابی :

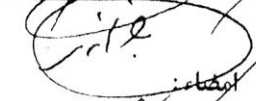
امضاء : 	مرتبۀ دانشگاهی : <b>دانشیار</b>	نام و نام خانوادگی استاد راهنما : <b>دکتر مروج</b>
امضاء : <b>۹۱/۱۱/۹</b>	مرتبۀ دانشگاهی : <b>استاد</b>	نام و نام خانوادگی استاد مشاور : <b>دکتر صنایع پسند</b>

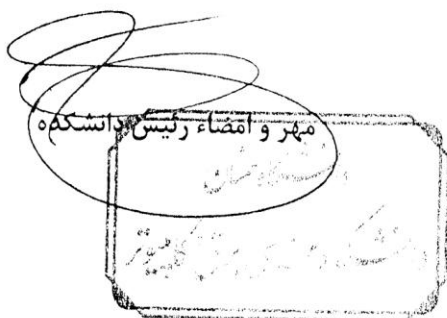
هیات داوران :

امضاء : 	مرتبۀ دانشگاهی : <b>دانشیار</b>	از دانشگاه : <b>صنعت اب و برق</b>	نام و نام خانوادگی : <b>دکتر خدرزاده</b>
--	---------------------------------	-----------------------------------	--

امضاء : 	مرتبۀ دانشگاهی : <b>استادیار</b>	از دانشگاه : <b>شاهرود</b>	نام و نام خانوادگی : <b>دکتر بانژاد</b>
--	----------------------------------	----------------------------	---

امضاء : 	مرتبۀ دانشگاهی : <b>استادیار</b>	از دانشگاه : <b>سمنان</b>	نام و نام خانوادگی : <b>دکتر جزائری</b>
--	----------------------------------	---------------------------	---

امضاء : 	مرتبۀ دانشگاهی : <b>استادیار</b>	از دانشگاه : <b>سمنان</b>	نام و نام خانوادگی : <b>دکتر علی نژاد</b>
--	----------------------------------	---------------------------	---



امضاء مدیر تحصیلات تکمیلی  
 علی اکبر  
 ۹۱/۱۱/۱۷

بسمه تعالی



اینجانب **علی اکبر عبدوس** متعهد می‌شوم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان **حفاظت دیفرانسیل هوشمند ترانسفورماتور قدرت با استفاده از تبدیل S که به عنوان رساله دکتری رشته مهندسی برق گرایش قدرت به گروه مهندسی قدرت و کنترل** دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سمنان ارائه شده، دارای اصالت پژوهشی بوده و حاصل فعالیت‌های علمی اینجانب می‌باشد.

در صورتی که خلاف ادعای فوق در هر زمانی محرز شود، کلیه حقوق معنوی متعلق به این رساله از اینجانب سلب شده و موارد قانونی مترتب به آن نیز از طرف مراجع ذیربط قابل پیگیری است.

نام و نام خانوادگی: **علی اکبر عبدوس**

امضاء

شماره دانشجویی: **۸۷۱۱۱۴۰۰۱**

تقدیم به پدر و مادر و برداران عزیزم  
حامد، عادل و ہاتف

با تشکر از اساتید محترم دانشکده برق و کامپیوتر بالاخص  
استاد ارجمند سرکار خانم **دکتر مروج** و همچنین جناب  
آقای **پروفسور صنایع** **پسند** که همواره مرا از  
راهنمایی‌های عالمانه خود بهره‌مند ساختند.

## چکیده:

رله دیفرانسیل درصدی یکی از ابتدایی‌ترین طرحهای حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت می‌باشد. رله‌های دیفرانسیل درصدی به خاطر عملکرد اشتباه در هنگام برقرار کردن ترانسفورماتورها و شرایط اضافه تحریک به واحد نگهدارنده هارمونیک تجهیز شده‌اند. امروزه با پیشرفت در تکنولوژی ساخت هسته‌های جدید، مقدار هارمونیک مرتبه دوم در حین برقرار کردن ترانسفورماتورها تا حدی کاهش پیدا کرده است و همچنین هارمونیک دوم در شکل موج جریان خطا ظاهر می‌گردد. علاوه بر این اشباع ترانسفورماتور جریان در حین خطای داخلی هارمونیکهای مرتبه بالا تولید می‌کند. لذا روش نگهدارنده هارمونیک ممکن است در برخی از شرایط خطای داخلی و جریان هجومی مغناطیس کننده عملکرد نادرستی داشته باشد. بنابراین در این تحقیق روشهای جدیدی براساس تشخیص الگوهای جریان دیفرانسیل ارائه شده است. در مرحله اول توسط تبدیل S آنالیز سیگنال در حوزه زمان و فرکانس انجام می‌گیرد. از ماتریس خروجی تبدیل S، شکل موجهای کانتور دامنه، کانتور فرکانس و کانتور ماتریس S به دست می‌آیند. پس از آن مجموعه‌ای از ویژگیها از کانتورهای به دست آمده استخراج می‌گردد. سپس زیر مجموعه‌ای از ویژگیهای برتر، براساس دقت الگوریتم ارائه شده تعیین می‌گردد. روشهای انتخاب پیشرو، انتخاب پسرو و الگوریتم ژنتیک برای تعیین ویژگیهای برتر استفاده می‌شوند. دو طبقه‌بندی کننده معروف مانند ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی احتمالی، به منظور تشخیص خطا و طبقه‌بندی وقایع به کار گرفته می‌شوند. به علاوه، دو معیار دیگر برای تشخیص خطای داخلی براساس ویژگیهای برتر به دست آمده ارائه شده است. الگوریتمهای ارائه شده تقریباً تمامی خطاهای ترمینال واقع در ناحیه حفاظتی ترانسفورماتور را در حدود یک سیکل شناسایی می‌نماید. همچنین الگوریتمهای ارائه شده در شرایط اضافه تحریک، خطای خارجی و برقرار کردن ترانسفورماتورها حتی در زمان اشباع ترانسفورماتورهای جریان پایدار می‌باشد. نتایج به دست آمده از سیگنالهای واقعی یک ثبت کننده خطا، قابلیت اجرای این روش بر روی سیستمهای قدرت واقعی را تصدیق می‌نماید.

**کلید واژه:** ترانسفورماتورهای قدرت، اشباع ترانسفورماتور جریان، استخراج ویژگی، انتخاب ویژگی،

طبقه‌بندی کننده، الگوشناسی.

## فهرست مطالب

عنوان..... صفحه

### فصل اول

#### انگیزه‌های تحقیق

- ۱-۱ مقدمه ..... ۱
- ۲-۱ نیاز به یک الگوریتم جدید ..... ۳
- ۳-۱ اهداف تحقیق ..... ۵

### فصل دوم

#### مروری بر روش‌های ارائه شده جهت حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت

- ۱-۲ روشهای سنتی حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت ..... ۷
- ۱-۱-۲ حفاظت دیفرانسیل ..... ۷
- ۱-۱-۱-۲ حفاظت دیفرانسیل با به کارگیری رله‌های اضافه جریان ..... ۹
- ۲-۱-۱-۲ حفاظت دیفرانسیل با به کارگیری رله‌های دیفرانسیل درصدی ..... ۹
- ۳-۱-۱-۲ حفاظت دیفرانسیل با به کارگیری رله دیفرانسیل درصدی با نگهدارنده جریان هجومی و فوق تحریک ..... ۱۱
- ۱-۳-۱-۱-۲ روشهای نگهدارنده هارمونیکی ..... ۱۱
- ۲-۳-۱-۱-۲ روشهای بازدارنده هارمونیکی ..... ۱۳
- ۲-۱-۲ بررسی عدم کارایی حفاظت دیفرانسیل درصدی مجهز به بایاس هارمونیکی ..... ۱۵
- ۲-۲ روشهای حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت به وسیله تشخیص شکل موج ..... ۲۳
- ۱-۲-۲ آنالیز در حوزه زمانی ..... ۲۳
- ۱-۱-۲-۲ اندازه‌گیری بین دو پیک متوالی ..... ۲۳
- ۲-۱-۲-۲ روش تشخیص جریان کم ..... ۲۳
- ۳-۱-۲-۲ روش نگهدارنده DC ..... ۲۴
- ۴-۱-۲-۲ آنالیز همبستگی ..... ۲۵



- ۲۶..... ۵-۱-۲-۲ بررسی عدم کارایی روشهای مبتنی بر آنالیز زمان
- ۲۷..... ۲-۲-۲ آنالیز در حوزه فرکانسی
- ۲۸..... ۳-۲-۲ آنالیز در حوزه فرکانس زمانی
- ۲۸..... ۱-۳-۲-۲ روش تبدیل فوریه کوتاه مدت
- ۲۸..... ۲-۳-۲-۲ روش تبدیل موجک
- ۲۹..... ۳-۳-۲-۲ روش تبدیل S
- ۲۹..... ۴-۲-۲ ماشینهای یادگیری
- ۳۱..... ۵-۲-۲ روشهای ترکیبی

## فصل سوم

### شبیه‌سازی سیستم قدرت

- ۳۲..... ۱-۳ مدار معادل ترانسفورماتور قدرت
- ۳۴..... ۲-۳ خطاهای ترانسفورماتورهای قدرت
- ۳۵..... ۱-۲-۳ شبیه‌سازی خطای داخلی سیم پیچ ترانسفورماتور تکفاز
- ۳۶..... ۲-۲-۳ شبیه‌سازی خطای داخلی سیم پیچ اتوترانسفورماتور
- ۳۷..... ۳-۳ جریان هجومی مغناطیس کننده
- ۳۸..... ۴-۳ جریان هجومی اضافه تحریک
- ۳۹..... ۵-۳ ترانسفورماتور جریان
- ۴۱..... ۶-۳ سیستم قدرت شبیه‌سازی شده

## فصل چهارم

### ابزارهای به کار گرفته شده جهت تشخیص شکل موج

- ۴۳..... ۱-۴ آنالیز فرکانس زمانی
- ۴۳..... ۱-۱-۴ تبدیل S
- ۴۴..... ۱-۱-۱-۴ به دست آوردن تبدیل S از تبدیل فوریه کوتاه مدت
- ۴۴..... ۲-۱-۱-۴ به عنوان کانونلوشن
- ۴۵..... ۳-۱-۱-۴ به دست آوردن تبدیل S از تبدیل موجک
- ۴۵..... ۴-۱-۱-۴ تبدیل گسسته S

۴۷.....	۲-۱-۴ تبدیل بهبود یافته S
۵۰.....	۳-۱-۴ تبدیل هیپرپولیکی S
۵۱.....	۲-۴ طبقه‌بندی کننده‌ها
۵۱.....	۱-۲-۴ شبکه‌های عصبی احتمالی
۵۴.....	۲-۲-۴ ماشینهای بردار پشتیبان
۵۵.....	۱-۲-۲-۴ طبقه‌بندی کننده خطی ماشین بردار پشتیبان
۵۶.....	۲-۲-۲-۴ طبقه‌بندی کننده غیرخطی ماشین بردار پشتیبان
۵۶.....	۳-۲-۲-۴ موارد جدانشدنی
۵۸.....	۴-۲-۲-۴ توابع کرنل
۵۸.....	۵-۲-۲-۴ طبقه‌بندی بیش از دو کلاس

## فصل پنجم

### الگوریتم‌های هوشمند ارائه شده

۱-۵	تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی با استفاده از تبدیل S و طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی احتمالی
۶۰.....	
۶۲.....	۱-۱-۵ استخراج بردار ویژگی
۶۸.....	۲-۱-۵ بررسی جداپذیری ویژگی‌های استخراج شده
۷۲.....	۳-۱-۵ نتایج به دست آمده
۷۴.....	۴-۱-۵ بررسی نتایج تحت شرایط نویزی
۷۵-۱-۵	بررسی عملکرد روش ارائه شده برای انواع خطاها و جریانهای هجومی مغناطیس کننده
۷۶.....	
۲-۵	طرح حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با استفاده از روش ترکیبی استخراج ویژگی براساس تبدیل بهبود یافته S و انتخاب ویژگی‌های برتر
۸۱.....	
۸۴.....	۱-۲-۵ روشهای انتخاب ویژگی
۸۴.....	۱-۱-۲-۵ روش انتخاب ترتیبی پیشرو
۸۵.....	۲-۱-۲-۵ روش انتخاب ترتیبی پسرو
۸۶.....	۳-۱-۲-۵ الگوریتم ژنتیک
۸۷.....	۲-۲-۵ تحلیل نتایج

- ۱-۲-۲-۵ مشاهدات به دست آمده از روشهای انتخاب ویژگی به کار گرفته شده ... ۸۸
- ۲-۲-۲-۵ مشاهدات به دست آمده از ویژگیهای استخراج شده ..... ۸۸
- ۳-۵ طرح حفاظتی ترانسفورماتور با استفاده از روش ترکیبی استخراج ویژگی براساس تبدیل هیپربولیکی S و انتخاب ویژگیهای برتر ..... ۹۴
- ۱-۳-۵ بررسی روند تغییرات ویژگیهای برتر انتخاب شده در رخدادهای مختلف ..... ۹۷
- ۱-۱-۳-۵ خطای ترمینال ..... ۹۷
- ۲-۱-۳-۵ جریان هجومی مغناطیس کننده ..... ۹۹
- ۳-۱-۳-۵ شرایط فوق تحریک ..... ۱۰۱
- ۴-۱-۳-۵ خطای خارجی ..... ۱۰۳
- ۵-۱-۳-۵ دیگر حالات ترکیبی ..... ۱۰۴
- ۲-۳-۵ ارزیابی نتایج ..... ۱۰۵
- ۱-۲-۳-۵ خطای داخلی سیم پیچ به زمین ..... ۱۰۵
- ۴-۵ نتایج مقایسه‌ای با سایر روشهای ارائه شده ..... ۱۱۴
- ۱-۴-۵ مقایسه روشهای ترکیبی ارائه شده مبتنی بر الگوشناسی با الگوریتمهای هوشمند ..... ۱۱۴
- ۲-۴-۵ مقایسه روشهای ترکیبی ارائه شده مبتنی بر الگوشناسی با روش نگهدارنده درصدی با بایاس هارمونیک ..... ۱۱۴

## فصل ششم

### ارائه شاخص جهت حفاظت ترانسفورماتوهای قدرت

- ۱-۶ شاخص ارائه شده جهت تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی مغناطیس کننده ..... ۱۱۷
- ۱-۱-۶ آنالیز سیگنالهای جریان دیفرانسیل با استفاده از تبدیل S ..... ۱۱۷
- ۲-۱-۶ تعیین شاخص جهت تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی مغناطیس کننده .. ۱۱۸
- ۳-۱-۶ نتایج شبیه‌سازی ..... ۱۲۲
- ۲-۶ شاخص ارائه شده جهت تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی مغناطیس کننده، فوق تحریک، خطای خارجی و شرایط نرمال ..... ۱۲۴
- ۱-۲-۶ آنالیز سیگنالهای جریان دیفرانسیل توسط تبدیل هیپربولیکی S ..... ۱۲۵
- ۱-۱-۲-۶ خطای داخلی ..... ۱۲۵
- ۲-۱-۲-۶ جریان هجومی ..... ۱۲۸

- ۱۳۰..... ۳-۱-۲-۶ شرایط فوق تحریک
- ۱۳۲..... ۴-۱-۲-۶ خطای خارجی
- ۱۳۳..... ۲-۲-۶ تعیین شاخص جهت تشخیص خطای داخلی از دیگر شرایط کاری ترانسفورماتور
- ۱۳۵..... ۳-۲-۶ تحلیل نتایج
- ۱۳۵..... ۱-۳-۲-۶ تعیین مقدار آستانه مناسب
- ۱۳۸..... ۲-۳-۲-۶ ارزیابی عملکرد شاخص ارائه شده در شرایط کاری مختلف
- ۱۴۳..... ۳-۳-۲-۶ نتایج به دست آمده برای بانک ترانسفورماتوری و اتوترانسفورماتور
- ۴-۳-۲-۶ مقایسه شاخص ارائه شده با رله دیفرانسیل درصدی مجهز به بایاس
- ۱۴۶..... هارمونیکی
- ۱۴۸..... ۵-۳-۲-۶ ارزیابی عملکرد شاخص ارائه شده توسط سیگنالهای واقعی ثبت شده

## فصل هفتم

### نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱۵۲..... ۱-۷ ارزیابی نتایج به دست آمده
- ۱۵۴..... ۲-۷ پیشنهادات
- ۱۵۶..... مراجع

## ضمیمه الف

### مدلهای به کار گرفته شده

- ۱۶۳..... الف-۱ مدل ترانسفورماتور
- ۱۶۳..... الف-۱-۱ مدل کلاسیک
- ۱۶۵..... الف-۱-۱-۱ نمایش تلفات سیم پیچ و هسته
- ۱۶۵..... الف-۱-۱-۲ اشباع هسته
- ۱۶۸..... الف-۱-۲ مدل مبتنی بر مدار معادل مغناطیسی یکپارچه
- ۱۶۸..... الف-۱-۲-۱ روش مدلسازی
- ۱۷۱..... الف-۱-۲-۲ مدل اتوترانسفورماتور
- ۱۷۳..... الف-۱-۲-۲-۱ مدار معادل توالی مثبت اتوترانسفورماتور

- الف-۱-۲-۲-۲ مدار معادل توالی صفر ..... ۱۷۴
- الف-۱-۲-۲-۳ شبیه‌سازی اتوترانسفورماتور در نرم افزار PSCAD ..... ۱۷۴
- الف-۲ مدل ترانسفورماتور جریان ..... ۱۷۵
- الف-۲-۱ مدل جیلز اسرتون ..... ۱۷۵
- الف-۲-۲ تعیین پارامترهای مدل جیلز اسرتون ..... ۱۷۸

## ضمیمه ب

### داده‌های مورد نیاز جهت شبیه‌سازی سیستم قدرت

- ب-۱ پارامترهای ترانسفورماتورهای قدرت ..... ۱۸۰
- ب-۱-۱ ترانسفورماتور واحد (افزاینده) ..... ۱۸۰
- ب-۱-۲ ترانسفورماتورهای کاهنده ..... ۱۸۱
- ب-۱-۲-۱ ترانسفورماتور دو سیم پیچه ..... ۱۸۱
- ب-۱-۲-۲ ترانسفورماتور سه سیم پیچه ..... ۱۸۱
- ب-۱-۳ اتوترانسفورماتور ..... ۱۸۲
- ب-۱-۴ بانکهای ترانسفورماتوری ..... ۱۸۲
- ب-۲ پارامترهای ترانسفورماتور جریان ..... ۱۸۲
- لیست مقالات منتشر شده ..... ۱۸۶

## فهرست جداول

### فصل پنجم

- جدول ۵-۱: دقت طبقه‌بندی روش ترکیبی تبدیل S و شبکه عصبی احتمالی بدون وجود نویز ..... ۷۳
- جدول ۵-۲: دقت طبقه‌بندی روش ترکیبی تبدیل S و شبکه عصبی احتمالی با وجود ۲۰ دسیبل نویز ..... ۷۵
- جدول ۵-۳: دقت به دست آمده از روش تبدیل S و شبکه عصبی احتمالی برای انواع مختلف ترانسفورماتورهای قدرت ..... ۸۰
- جدول ۵-۴: نتایج به دست آمده از روش انتخاب ویژگی ترتیبی پیشرو با به کارگیری طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی احتمالی ..... ۸۵
- جدول ۵-۵: نتایج به دست آمده از روش انتخاب ویژگی ترتیبی پیشرو با به کارگیری طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان ..... ۸۵
- جدول ۵-۶: نتایج به دست آمده از روش انتخاب ویژگی ترتیبی پسرو با به کارگیری طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی احتمالی ..... ۸۶
- جدول ۵-۷: نتایج به دست آمده از روش انتخاب ویژگی ترتیبی پسرو با به کارگیری طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان ..... ۸۶
- جدول ۵-۸: نتایج به دست آمده از روش الگوریتم ژنتیک با به کارگیری طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی احتمالی و ماشین بردار پشتیبان ..... ۸۷
- جدول ۵-۹: دقت به دست آمده از روش تبدیل بهبود یافته S و شبکه عصبی احتمالی برای انواع مختلف ترانسفورماتورها (برحسب درصد) ..... ۹۴
- جدول ۵-۱۰: نتایج به دست آمده حاصل از روش انتخاب ترتیبی پیشرو در الگوریتم ترکیبی تبدیل هیپربولیکی S و شبکه عصبی احتمالی ..... ۹۶
- جدول ۵-۱۱: نتایج به دست آمده حاصل از روش انتخاب ترتیبی پسرو در الگوریتم ترکیبی تبدیل هیپربولیکی S و شبکه عصبی احتمالی ..... ۹۶
- جدول ۵-۱۲: نتایج به دست آمده حاصل از روش انتخاب براساس الگوریتم ژنتیک ..... ۹۶
- جدول ۵-۱۳: دقت به دست آمده از روش تبدیل هیپربولیکی S و شبکه عصبی احتمالی برای انواع مختلف بانکهای ترانسفورماتوری ..... ۱۰۶

جدول ۵-۱۴: دقت به دست آمده از روش تبدیل هیپربولیکی S و شبکه عصبی احتمالی برای اتوترانسفورماتور ..... ۱۱۳

جدول ۵-۱۵: میزان دقت تشخیص خطای داخلی سیم پیچ به هسته برای مقاومت‌های مختلف خطا.. ۱۱۳

جدول ۵-۱۶: مقایسه دقت طبقه‌بندی الگوریتم‌های هوشمند ارائه شده با دیگر روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی ..... ۱۱۴

### فصل ششم

جدول ۶-۱: شاخص محاسبه شده مبتنی بر تبدیل S برای بانک‌های ترانسفورماتوری ..... ۱۲۴

جدول ۶-۲: میزان حداقل و حداکثر مقدار شاخص محاسبه شده مبتنی بر تبدیل هیپربولیکی S برای بانک‌های ترانسفورماتوری ..... ۱۴۳

جدول ۶-۳: میزان حداقل و حداکثر مقدار شاخص ارائه شده مبتنی بر تبدیل هیپربولیکی S برای اتوترانسفورماتور ..... ۱۴۴

### ضمیمه ب

جدول ب-۱: مشخصات ترانسفورماتور افزایشنده ..... ۱۸۰

جدول ب-۲: داده‌های مربوط به منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته ترانسفورماتور افزایشنده ..... ۱۸۰

جدول ب-۳: مشخصات ترانسفورماتور دو سیم پیچه ..... ۱۸۱

جدول ب-۴: داده‌های مربوط به منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته ترانسفورماتور دو سیم پیچه ... ۱۸۱

جدول ب-۵: مشخصات ترانسفورماتور سه سیم پیچه ..... ۱۸۱

جدول ب-۶: داده‌های مربوط به منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته ترانسفورماتور سه سیم پیچه . ۱۸۱

جدول ب-۷: مشخصات اتوترانسفورماتور ..... ۱۸۲

جدول ب-۸: داده‌های مربوط به منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته اتوترانسفورماتور ..... ۱۸۲

جدول ب-۹: مشخصات بانک‌های ترانسفورماتوری ..... ۱۸۲

جدول ب-۱۰: پارامترهای مربوط به مشخصات هسته ترانسفورماتور جریان در مدل جیلزاسرتون .. ۱۸۳

جدول ب-۱۱: ترانسفورماتورهای جریان به کار گرفته شده در ترانسفورماتور افزایشنده ..... ۱۸۳

جدول ب-۱۲: ترانسفورماتورهای جریان ۱ و ۵ آمپری به کار گرفته شده در ترانسفورماتور دو سیم پیچه ..... ۱۸۴

جدول ب-۱۳: ترانسفورماتورهای جریان به کار گرفته شده در ترانسفورماتور سه سیم پیچه ..... ۱۸۴

جدول ب-۱۴: ترانسفورماتورهای جریان به کار گرفته شده در اتوترانسفورماتور ..... ۱۸۴  
جدول ب-۱۵: ترانسفورماتورهای جریان به کار گرفته شده در بانک ترانسفورماتوری ۳۱۵ مگاوات  
آمپری ..... ۱۸۴  
جدول ب-۱۶: ترانسفورماتورهای جریان به کار گرفته شده در بانک ترانسفورماتوری ۲۰۰ مگاوات  
آمپری ..... ۱۸۵  
جدول ب-۱۷: ترانسفورماتورهای جریان به کار گرفته شده در بانک ترانسفورماتوری ۱۶۰ مگاوات  
آمپری ..... ۱۸۵



## فهرست اشکال

### فصل دوم

- شکل ۱-۲: چگونگی اتصال رله دیفرانسیل برای ترانسفورماتور تکفاز ..... ۸
- شکل ۲-۲: تنظیمات مشخصه رله‌های دیفرانسیل درصدی [۵] ..... ۱۱
- شکل ۳-۲: منطق عملکرد هارمونیک دوم و پنجم یک رله دیفرانسیل [۵] ..... ۱۳
- شکل ۴-۲: نمونه‌ای از جریان خطای داخلی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان ..... ۱۶
- شکل ۵-۲: عملکرد رله دیفرانسیل درصدی در حین خطای داخلی ..... ۱۶
- شکل ۶-۲: نسبت هارمونیک دوم به مولفه اصلی در حین خطای داخلی با اشباع ترانسفورماتور جریان ..... ۱۷
- شکل ۷-۲: نمونه‌ای از جریان هجومی مغناطیس کننده ..... ۱۷
- شکل ۸-۲: عملکرد رله دیفرانسیل درصدی در حین برقرار شدن ترانسفورماتور ..... ۱۸
- شکل ۹-۲: نسبت هارمونیک دوم به مولفه اصلی در حین برقرار شدن ترانسفورماتور به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان ..... ۱۸
- شکل ۱۰-۲: شبیه‌سازی جریان هجومی موافق ..... ۲۰
- شکل ۱۱-۲: نسبت هارمونیک دوم به مولفه اصلی برای جریان هجومی موافق ..... ۲۰
- شکل ۱۲-۲: مغناطیس شونگی دو نوع هسته مربوط به ترانسفورماتور ۲۳۰/۶۳ کیلو ولت ..... ۲۱
- شکل ۱۳-۲: جریان هجومی مربوط به دو نوع هسته مختلف ..... ۲۱
- شکل ۱۴-۲: مولفه‌های موجود در شکل موج جریان هجومی با هسته نوع A ..... ۲۲
- شکل ۱۵-۲: مولفه‌های موجود در شکل موج جریان هجومی با هسته نوع B ..... ۲۲
- شکل ۱۶-۲: نسبت هارمونیک دوم به مولفه اصلی برای دو نوع هسته متفاوت ..... ۲۲
- شکل ۱۷-۲: چگونگی عملکرد بازدارندگی رله دیفرانسیل بر مبنای تشخیص جریان کم [۵] ..... ۲۴
- شکل ۱۸-۲: دیاگرام منطقی برای روش نگهدارنده DC [۵] ..... ۲۵
- شکل ۱۹-۲: بررسی عملکرد روش مبتنی بر اندازه‌گیری دو پیک متوالی برای جریان خطای داخلی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان ..... ۲۶
- شکل ۲۰-۲: بررسی عملکرد روش مبتنی بر اندازه‌گیری جریان کم برای جریان هجومی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان ..... ۲۶

## فصل سوم

- شکل ۳-۱: مدار معادل ترانسفورماتور تکفاز ..... ۳۲
- شکل ۳-۲: مدل اشباع هسته ترانسفورماتور ..... ۳۳
- شکل ۳-۳: مدل خطای داخلی اتوترانسفورماتور بر روی سیم پیچ سری ..... ۳۷
- شکل ۳-۴: سیستم قدرت شبیه‌سازی شده ..... ۴۲

## فصل چهارم

- شکل ۴-۱: مراحل محاسبه تبدیل S ..... ۴۷
- شکل ۴-۲: تغییرات عرض پنجره گوسی برای یک فرکانس مشخص (۲۵ هرتز) ..... ۴۸
- شکل ۴-۳: کانتور ماتریس به دست آمده از تبدیل بهبود یافته S ..... ۴۹
- شکل ۴-۴: کانتور ماتریس به دست آمده از تبدیل استاندارد S ..... ۴۹
- شکل ۴-۵: پنجره هیپربولیکی در فرکانس ۰/۵ (خط ممتد)، ۱ (خط نقطه) و ۲ هرتز (نقطه نقطه) برای  $\gamma_{HY}^B = 1.5$  و  $\gamma_{HY}^F = 0.5$  و  $\lambda_{HY} = 1/16$  ..... ۵۱
- شکل ۴-۶: ساختار شبکه عصبی احتمالی ..... ۵۳
- شکل ۴-۷: ابر صفحه جدا کننده دو کلاس ..... ۵۵

## فصل پنجم

- شکل ۵-۱: الگوریتم تشخیص و طبقه‌بندی خطا با استفاده از شبکه‌های عصبی احتمالی و تبدیل S ... ۶۱
- شکل ۵-۲: شکل موج جریان فاز A در حالت برقرار کردن ترانسفورماتور و شکل موجهای استخراج شده از تبدیل S ..... ۶۵
- شکل ۵-۳: شکل موج جریان فاز A در حالت خطای ABCG بدون اشباع ترانسفورماتور جریان و شکل موجهای استخراج شده از تبدیل S ..... ۶۶
- شکل ۵-۴: شکل موج جریان فاز A در حالت خطای ABCG با در نظر گرفتن اشباع شدید ترانسفورماتور جریان و شکل موجهای استخراج شده از تبدیل S ..... ۶۸
- شکل ۵-۵: نمایش هیستوگرام ویژگی ۱ ..... ۶۹
- شکل ۵-۶: نمایش هیستوگرام ویژگی ۲ ..... ۶۹
- شکل ۵-۷: نمایش هیستوگرام ویژگی ۳ ..... ۷۰

- شکل ۵-۸: نمایش هیستوگرام ویژگی ۴ ..... ۷۰
- شکل ۵-۹: نمایش هیستوگرام ویژگی ۵ ..... ۷۰
- شکل ۵-۱۰: نمایش ویژگی ۱ در مقابل ویژگی ۲ ..... ۷۱
- شکل ۵-۱۱: نمایش ویژگی ۲ در مقابل ویژگی ۳ ..... ۷۱
- شکل ۵-۱۲: نمایش ویژگی ۳ در مقابل ویژگی ۴ ..... ۷۲
- شکل ۵-۱۳: نمایش ویژگی ۴ در مقابل ویژگی ۵ ..... ۷۲
- شکل ۵-۱۴: جریانهای دیفرانسیل سه فاز هجومی به همراه سیگنال خروجی طبقه‌بندی کننده اول به عنوان تشخیص دهنده خطا ..... ۷۷
- شکل ۵-۱۵: جریانهای دیفرانسیل سه فاز خطای AG به همراه سیگنال خروجی طبقه‌بندی کننده اول به عنوان تشخیص دهنده خطا ..... ۷۷
- شکل ۵-۱۶: جریانهای دیفرانسیل سه فاز خطای ABG به همراه سیگنال خروجی طبقه‌بندی کننده اول به عنوان تشخیص دهنده خطا ..... ۷۷
- شکل ۵-۱۷: جریانهای دیفرانسیل سه فاز خطای AB به همراه سیگنال خروجی طبقه‌بندی کننده اول به عنوان تشخیص دهنده خطا ..... ۷۸
- شکل ۵-۱۸: جریانهای دیفرانسیل سه فاز خطای ABCG به همراه سیگنال خروجی طبقه‌بندی کننده اول به عنوان تشخیص دهنده خطا ..... ۷۸
- شکل ۵-۱۹: جریانهای دیفرانسیل سه فاز خطای ABCG با اشباع شدید ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال خروجی طبقه‌بندی کننده اول به عنوان تشخیص دهنده خطا ..... ۷۸
- شکل ۵-۲۰: جریانهای دیفرانسیل سه فاز هجومی به همراه سیگنال خروجی طبقه‌بندی کننده اول به عنوان تشخیص دهنده خطا با وجود نویز ..... ۷۹
- شکل ۵-۲۱: جریانهای دیفرانسیل سه فاز خطای AG به همراه سیگنال خروجی طبقه‌بندی کننده اول به عنوان تشخیص دهنده خطا با وجود نویز ..... ۷۹
- شکل ۵-۲۲: طرح حفاظتی ارائه شده با استفاده از طبقه‌بندی ویژگی‌های برتر ..... ۸۳
- شکل ۵-۲۳: نمایش ویژگی ۱ در برابر ۴ ..... ۹۰
- شکل ۵-۲۴: نمایش ویژگی ۱ در برابر ۱۷ ..... ۹۰
- شکل ۵-۲۵: نمایش ویژگی ۴ در برابر ۱۷ ..... ۹۰
- شکل ۵-۲۶: جریانهای سه فاز مربوط به برقرار شدن ترانسفورماتور به همراه سیگنال فرمان قطع الگوریتم مبتنی بر تبدیل بهبود یافته S ..... ۹۱

شکل ۵-۲۷: جریانهای سه فاز مربوط به شرایط اضافه تحریک به همراه سیگنال فرمان قطع الگوریتم مبتنی بر تبدیل بهبود یافته S ..... ۹۱

شکل ۵-۲۸: جریانهای سه فاز مربوط به خطای خارجی سه فاز به زمین ABCG با وجود اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال فرمان قطع الگوریتم مبتنی بر تبدیل بهبود یافته S ..... ۹۲

شکل ۵-۲۹: جریانهای سه فاز مربوط به خطای داخلی تکفاز AG به زمین به همراه سیگنال فرمان قطع الگوریتم مبتنی بر تبدیل بهبود یافته S ..... ۹۲

شکل ۵-۳۰: جریانهای سه فاز مربوط به خطای خارجی دو فاز AB با وجود اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال فرمان قطع الگوریتم مبتنی بر تبدیل بهبود یافته S ..... ۹۳

شکل ۵-۳۱: جریانهای سه فاز مربوط به خطای داخلی سه فاز به زمین ABCG با وجود اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال فرمان قطع الگوریتم مبتنی بر تبدیل بهبود یافته S ..... ۹۳

شکل ۵-۳۲: خطای دو فاز به زمین ABG به همراه ویژگیهای برتر انتخاب شده ..... ۹۹

شکل ۵-۳۳: جریان هجومی مغناطیس کننده به همراه ویژگیهای برتر انتخاب شده ..... ۱۰۱

شکل ۵-۳۴: جریان فوق تحریک ناشی از افزایش ولتاژ به همراه ویژگیهای برتر انتخاب شده ..... ۱۰۲

شکل ۵-۳۵: جریان خطای خارجی به همراه ویژگیهای برتر انتخاب شده ..... ۱۰۴

شکل ۵-۳۶: جریان خطای داخلی بعد از برقدار کردن ترانسفورماتور تحت بار به همراه سیگنال قطع روش ترکیبی تبدیل هیپربولیکی S و شبکه عصبی احتمالی ..... ۱۰۵

شکل ۵-۳۷: تغییرات جریان خطا نسبت به موقعیت خطا در سمت سیم پیچ ثانویه برای اتصالات مختلف بانک ترانسفورماتوری ۳۱۵ مگاوات آمپری ..... ۱۰۸

شکل ۵-۳۸: جریان گذرنده از رله اضافه جریان در حفاظت خطای زمین محدود شده برای خطاهای داخلی سیم پیچ سمت اولیه (ستاره) به زمین با وجود مقاومت خطای یک اهم ..... ۱۰۹

شکل ۵-۳۹: جریان گذرنده از رله اضافه جریان در حفاظت خطای زمین محدود شده برای خطاهای داخلی سیم پیچ سمت ثانویه (مثلث) به زمین با وجود مقاومت خطای یک اهم ..... ۱۰۹

شکل ۵-۴۰: جریان خطای داخلی سیم پیچ سری به زمین در اتوترانسفورماتور به همراه جریان دیفرانسیل متناظر ..... ۱۱۰

شکل ۵-۴۱: جریان عبوری از رله خطای زمین محدود شده در هنگام رخداد خطای داخلی سیم پیچ سری به زمین در اتوترانسفورماتور ..... ۱۱۰

شکل ۵-۴۲: جریان خطای داخلی سیم پیچ مشترک به زمین در اتوترانسفورماتور به همراه جریان دیفرانسیل متناظر ..... ۱۱۱