



۱۳۷۸ / ۷ / ۱۲

# دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی برق

حفاظت دیفرانسیل دیجیتال ترانسفورماتور

با استفاده از منطق فازی

اسمعیل فرجی جوبنی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق - قدرت

استاد راهنما: دکتر سید محمد شهرتاش

3914, ۲

مهرماه ۱۳۷۷

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به :

گرائقدرترین گوهر وجودم

همسر عزیزم

سونیا

## چکیده

در این پروژه مسائل حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور مطالعه گردیده و یک سیستم فازی جهت حفاظت ترانسفورماتور قدرت طراحی و شبیه سازی شده است. در این راستا ابتدا روشهای دیجیتالی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور بررسی شده اند و چگونگی عملکرد آنها مقایسه شده است. سپس جهت مطالعه دقیقتر مسائل حفاظت دیفرانسیل، خطاهای داخلی ترانسفورماتور و پدیده های دیگری که در حفاظت دیفرانسیل موثرند شبیه سازی شده اند. نتایج این شبیه سازیها پردازش گردیده و با استفاده از آنها قوانین فازی و توابع عضویت مربوط به آنها استخراج شده است. سیستم حفاظتی به گونه ای طراحی شده است که علاوه بر میزان اطمینان در وقوع خطای داخلی، میزان اطلاعات سیگنال و ضریب خسارت ناشی از عملکرد نادرست نیز در تصمیم گیری رله استفاده شده اند. سپس این سیستم شبیه سازی گردیده و با استفاده از داده های شبیه سازی و آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایشها نشان داده است که رله قادر است در صورت وقوع خطای داخلی در زمان کمتر از یک سیکل آنرا تشخیص داده و دستور عملکرد صادر نماید و در موارد غیر خطا نیز رله هیچگاه عمل نکرده است.

## تقدیرنامه

منت خدای را عز و جل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت

پژوهش حاضر مرهون همکاری ، همفکری و زحمات افراد بسیاری بوده است که بی شک بدون مساعدتهای آنان انجام این پژوهش میسر نبود ، لذا جا دارد که از تمامی کسانی که به نحوی مرا در مراحل مختلف پروژه یاری نمودند صمیمانه تشکر نمایم . به خصوص از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر سید محمد شهرتاش که با وجود مشغله های فراوان ، صمیمانه مرا در پیشبرد پروژه راهنمایی فرمودند سپاسگزارم و امیدوارم لایق استفاده از رهنمودهای ارزشمند ایشان در طول زندگی باشم . از اساتید هیات داوری آقایان دکتر جدید و دکتر عسکریان نیز بخاطر نکته سنجیها و راهنماییهایشان تشکر میکنم .

از آقای مهندس زند بصیری که در انجام شبیه سازیها مرا یاری فرمودند سپاسگزارم و از مسئولین آزمایشگاههای اندازه گیری و رله و حفاظت به خاطر مساعدتهایی که در استفاده از امکانات آزمایشگاهها فرمودند تشکر میکنم . همچنین از سایر عزیزانی که در هر یک از مراحل مطالعاتی ، آزمایشگاهی ، شبیه سازی و تایپ و ... به نحوی در انجام این پژوهش موثر بوده اند تشکر مینمایم . در پایان از درگاه ایزد منان برای یکایک آن بزرگواران طلب توفیق روز افزون مینمایم .

اسمعیل فرجی جوبنی

مهرماه ۱۳۷۷

## فهرست عناوین

صفحه	عنوان
۵	فصل اول : مقدمه .....
۱۰	فصل دوم : روشهای حفاظت دیفرانسیل دیجیتالی .....
۱۱	۲-۱- استفاده از روشهای دیجیتالی در حفاظت سیستمهای قدرت .....
۱۲	۲-۲- استفاده از عامل بازدارنده جریان متوسط عبوری در رله های دیجیتال .....
۱۴	۲-۳- استفاده از هارمونیکهای مقاوم در رله های دیجیتال .....
۱۵	۲-۴- استفاده از ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور بعنوان عامل بازدارنده .....
۱۶	۲-۵- استفاده از شار بعنوان عامل بازدارنده .....
۱۹	۲-۶- استفاده از مدلسازی ترانسفورماتور جهت تشخیص خطای داخلی و جریان هجومی .....
۲۱	۲-۷- استفاده از شبکه عصبی جهت تشخیص خطای داخلی و جریان هجومی .....
۲۳	فصل سوم : شبیه سازی پدیده های مؤثر در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت
۲۴	۳-۱- پدیده های مؤثر در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور .....
۲۵	۳-۲- شبیه سازی خطای داخلی .....
۲۵	۳-۲-۱- تئوری استفاده شده جهت شبیه سازی خطای داخلی .....
۲۷	۳-۲-۲- شبیه سازی خطای حلقه به زمین .....
۳۰	۳-۲-۳- شبیه سازی خطای حلقه به حلقه .....
۳۶	۳-۲-۴- محاسبه ضرایب نشتی .....

- ۴۶ ..... ۵-۲-۳- نتایج شبیه سازی خطای داخلی ترانسفورماتور
- ۵۶ ..... ۳-۳- شبیه سازی جریان هجومی
- ۶۲ ..... ۳-۴- شبیه سازی اضافه تحریک
- ۶۴ ..... ۳-۵- شبیه سازی اشباع CT در اثر اتصال کوتاه خارجی
- ۶۷ ..... ۳-۶- شبیه سازی عدم تطابق نسبت CT ها
- ۶۸ ..... فصل چهارم: حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت با استفاده از منطق فازی
- ۶۹ ..... ۴-۱- حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت و لزوم استفاده از منطق فازی
- ۷۱ ..... ۴-۲- مقدمه ای بر منطق فازی
- ۷۳ ..... ۴-۳- فازی کردن سیگنالهای حفاظتی
- ۷۵ ..... ۴-۴- فازی کردن تنظیم ها
- ۷۷ ..... ۴-۵- قوانین مختلف رله دیفرانسیل و تعیین توابع عضویت آنها
- ۷۷ ..... ۴-۵-۱- قوانین مربوط به رد جریان هجومی
- ۸۵ ..... ۴-۵-۲- قوانین مربوط به رد اضافه تحریک
- ۹۰ ..... ۴-۵-۳- قوانین مربوط به رد اشباع CT ها
- ۹۵ ..... ۴-۵-۴- قوانین رد عدم تناسب نسبت CT ها
- ۹۹ ..... ۴-۶- عملکرد رله دیفرانسیل فازی
- ۹۹ ..... ۴-۶-۱- تشخیص خطای داخلی از پدیده های دیگر
- ۱۰۱ ..... ۴-۶-۲- مینیمم کردن خسارت ناشی از تصمیم گیری نادرست
- ۱۰۳ ..... ۴-۶-۳- استفاده از ماکزیمم اطلاعات جهت تصمیم گیری

۱۰۵	..... فصل پنجم : عملکرد رله
۱۰۶	..... ۵-۱ مراحل عملیات سیستم حفاظتی
۱۰۸	..... ۵-۲ نتایج آزمایش طراحی رله
۱۰۸	..... ۵-۲-۱ پاسخ رله به خطای حلقه به زمین
۱۱۴	..... ۵-۲-۲ پاسخ رله به خطای حلقه به حلقه آزمایشگاهی
۱۲۰	..... ۵-۲-۳ پاسخ رله به جریان هجومی آزمایشگاهی
۱۲۶	..... ۵-۲-۴ پاسخ رله به جریان هجومی شبیه سازی
۱۳۲	..... ۵-۲-۵ پاسخ رله به اشباع CT در اثر اتصال کوتاه خارجی
۱۳۹	..... فصل ششم : نتیجه گیری
۱۴۲	..... ضمایم
۱۴۳	..... الف - اندازه گیری منحنی $\lambda-I$ ترانسفور ماتور آزمایشگاهی
۱۴۵	..... ب - تعیین هارمونیک های یک شکل موج به روش فوریه
	..... پ - روتین BCTAN جهت محاسبه ماتریسهای [R] و [L] با استفاده از نتایج آزمایشهای
۱۴۶	..... بی باری و اتصال کوتاه
۱۴۶	..... ت - تعیین ماتریسهای [R] و [L] جدید در خطای حلقه به زمین
۱۴۸	..... ث - تعیین ماتریسهای [R] و [L] جدید در خطای حلقه به حلقه
۱۴۹	..... مراجع



فهرست نمودارها و تصاویر

صفحه	عنوان	شکل
<b>فصل اول</b>		
۶	ترانسفورماتور تکفاز دارای تپ چنجر	۱-۱
۷	منحنی عملکرد رله دیفرانسیل درصدی	۱-۲
<b>فصل دوم</b>		
۱۲	منحنی عملکرد رله دیفرانسیل درصدی دیجیتال	۲-۱
۱۷	منحنی شار-جریان در هنگام وقوع خطا و غیر خطا	۲-۲
۱۷	اثر شار پسماند بر منحنی $\lambda-I$	۲-۳
<b>فصل سوم</b>		
۲۵	سیم پیچهای یک ترانسفورماتور تکفاز و ماتریسهای مدل کننده آن	۳-۱
۲۶	خطای حلقه به زمین و حلقه به حلقه در ترانسفورماتور	۳-۲
۲۸	تغذیه سری سیم پیچهای a و b	۳-۳
۳۱	تغذیه سری سیم پیچهای a ، b و c	۳-۴
۳۲	تغذیه سری سیم پیچهای b و c	۳-۵
۳۷	تغییرات شدید شدت میدان مغناطیسی در داخل یک ترانسفورماتور	۳-۶
۴۱	شدت میدان مغناطیسی در داخل سیم پیچها در خطای حلقه به زمین	۳-۷
۴۳	شدت میدان مغناطیسی در داخل سیم پیچها در خطای حلقه به حلقه	۳-۸
۴۷	ابعاد ترانسفورماتور مورد آزمایش	۳-۹
۴۷	تغییرات ضریب نشتی نسبت به موقعیت حلقه خطا در خطای حلقه به زمین	۳-۱۰
	تغییرات ضریب نشتی نسبت به موقعیت حلقه های خطا در خطای حلقه به حلقه	۳-۱۱
۴۸	(تعداد دورهای حلقه میانی برابر ۳۳ فرض شده است)	

- ۳-۱۲ تغییرات ضریب ناشی نسبت به موقعیت حلقه های خطا در خطای حلقه به حلقه  
 (تعداد دورهای حلقه میانی برابر ۹۹ فرض شده است) ۴۸
- ۳-۱۳ جریان تفاضلی ناشی از خطای حلقه به زمین ۵۰
- ۳-۱۴ جریان تفاضلی ناشی از خطای حلقه ۱۳۲ به حلقه ۱۶۵ ۵۳
- ۳-۱۵ جریان تفاضلی ناشی از خطای حلقه ۹۹ به حلقه ۱۹۸ ۵۵
- ۳-۱۶ مدار شبیه سازی جریان هجومی ۵۸
- ۳-۱۷ جریان هجومی هنگام برقدار شدن ترانسفورماتور در زاویه صفر ۵۹
- ۳-۱۸ جریان هجومی هنگام برقدار شدن ترانسفورماتور در زاویه ۴۵ درجه ۶۰
- ۳-۱۹ جریان هجومی هنگام برقدار شدن ترانسفورماتور در زاویه ۹۰ درجه ۶۰
- ۳-۲۰ جریان هجومی هنگام برقدار شدن ترانسفورماتور آزمایشگاه ۶۱
- ۳-۲۱ مدار شبیه سازی اضافه تحریک ۶۲
- ۳-۲۲ جریان تفاضلی در شبیه سازی اضافه تحریک ترانسفورماتور ۶۳
- ۳-۲۳ مدار شبیه سازی اشباع CT در اثر اتصال کوتاه خارجی ۶۵
- ۳-۲۴ اشباع یکی از CT ها در اثر اتصال کوتاه خارجی ۶۶
- ۳-۲۵ اشباع هر دو CT در اثر اتصال کوتاه خارجی ۶۶
- ۳-۲۶ جریان تفاضلی ناشی از عدم تناسب نسبت CT ها در بار کامل ۶۷

#### فصل چهارم

- ۴-۱ بلوک دیاگرام یک سیستم فازی ۷۲
- ۴-۲ نمونه ای از تابع عضویت مثلثی ۷۴
- ۴-۳ تغییرات مقادیر جریان در هنگام وقوع خطا و مقادیر فازی آنها ۷۵
- ۴-۴ تنظیم فازی و تنظیم قطعی ۷۵
- ۴-۵ مقایسه یک سیگنال فازی با یک تنظیم فازی ۷۶

- ۴-۶ تابع عضویت رد جریان هجومی با استفاده از مقدار جریان تفاضلی ۸۲
- ۴-۷ تابع عضویت رد جریان هجومی با استفاده از عدم تغییر ولتاژ در سیکل گذشته ۸۲
- ۴-۸ تابع عضویت رد جریان هجومی با استفاده از تغییرات جریان متوسط عبوری ۸۳
- ۴-۹ تابع عضویت رد جریان هجومی با استفاده از میزان هارمونیک دوم ۸۴
- ۴-۱۰ تابع عضویت رد جریان هجومی با استفاده از مقایسه دو پیک متوالی ۸۵
- ۴-۱۱ تابع عضویت رد اضافه تحریک با استفاده از دامنه مولفه اصلی جریان تفاضلی ۸۸
- ۴-۱۲ تابع عضویت رد اضافه تحریک با استفاده از مجموع مقادیر ولتاژ ۸۹
- ۴-۱۳ تابع عضویت رد اضافه تحریک با استفاده از نسبت هارمونیک پنجم به اول ۹۰
- ۴-۱۴ تابع عضویت رد اشباع CT با استفاده از متوسط جریان عبوری ۹۳
- ۴-۱۵ تابع عضویت رد اشباع CT با استفاده از نسبت هارمونیک دوم ۹۴
- ۴-۱۶ تابع عضویت رد اشباع CT با استفاده از دامنه مولفه اصلی ۹۵
- ۴-۱۷ تابع عضویت رد عدم تناسب CT ها با استفاده از نسبت مولفه اصلی به جریان تفاضلی ۹۷
- ۴-۱۸ تابع عضویت رد عدم تناسب CT ها با استفاده از دامنه مولفه اصلی ۹۸
- ۴-۱۹ منحنی میزان خسارت ناشی از عملکرد نادرست ۱۰۱

### فصل پنجم

- ۵-۱ الگوریتم سیستم حفاظت دیفرانسیل فازی ۱۰۷
- ۵-۲-۱-۱ خروجیهای فازی پنج قانون رد جریان هجومی در هنگام وقوع خطای داخلی و خروجی فازی نهایی مبنی بر رد وقوع جریان هجومی ۱۰۹
- ۵-۲-۱-۲ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اضافه تحریک و خروجی فازی نهایی مبنی بر رد وقوع اضافه تحریک در هنگام وقوع خطای داخلی ۱۱۰
- ۵-۲-۱-۳ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اشباع CT ها و خروجی فازی نهایی مبنی بر رد اشباع CT ها در هنگام وقوع خطای داخلی ۱۱۱

- ۵-۲-۱-۴ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد عدم تناسب نسبت CT ها و خروجی فازی
- ۱۱۲ نهایی مبنی بر رد عدم تناسب نسبت CT ها در هنگام وقوع خطای داخلی
- ۵-۲-۱-۵ خروجیهای فازی هر یک از معیارهای سه گانه تصمیم گیری رله و خروجی
- ۱۱۳ نهایی مبنی بر عملکرد رله در هنگام وقوع خطای داخلی
- ۵-۲-۲-۱ خروجیهای فازی پنج قانون رد جریان هجومی در هنگام وقوع خطای داخلی
- ۱۱۵ آزمایشگاهی و خروجی فازی نهایی مبنی بر رد وقوع جریان هجومی
- ۵-۲-۲-۲ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اضافه تحریک و خروجی فازی نهایی
- ۱۱۶ مبنی بر رد وقوع اضافه تحریک در هنگام وقوع خطای داخلی آزمایشگاهی
- ۵-۲-۲-۳ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اشباع CT ها و خروجی فازی نهایی
- ۱۱۷ مبنی بر رد اشباع CT ها در هنگام وقوع خطای داخلی آزمایشگاهی
- ۵-۲-۲-۴ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد عدم تناسب نسبت CT ها و خروجی فازی
- ۱۱۸ نهایی مبنی بر رد عدم تناسب نسبت CT ها در هنگام وقوع خطای داخلی
- ۵-۲-۲-۵ خروجیهای فازی هر یک از معیارهای سه گانه تصمیم گیری رله و خروجی
- ۱۱۹ نهایی مبنی بر عملکرد رله در هنگام وقوع خطای داخلی آزمایشگاهی
- ۵-۲-۳-۱ خروجیهای فازی پنج قانون رد جریان هجومی در هنگام وقوع جریان هجومی
- ۱۲۱ و خروجی فازی نهایی مبنی بر رد وقوع جریان هجومی
- ۵-۲-۳-۲ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اضافه تحریک و خروجی فازی نهایی
- ۱۲۲ مبنی بر رد وقوع اضافه تحریک در هنگام وقوع جریان هجومی
- ۵-۲-۳-۳ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اشباع CT ها و خروجی فازی نهایی
- ۱۲۳ مبنی بر رد اشباع CT ها در هنگام وقوع جریان هجومی
- ۵-۲-۳-۴ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد عدم تناسب نسبت CT ها و خروجی فازی
- ۱۲۴ نهایی مبنی بر رد عدم تناسب نسبت CT ها در هنگام وقوع جریان هجومی

- ۵-۲-۳-۵ خروجیهای فازی هر یک از معیارهای سه گانه تصمیم گیری رله و خروجی  
 ۱۲۵ نهایی مبنی بر عملکرد رله در هنگام وقوع جریان هجومی
- ۵-۲-۴-۱ خروجیهای فازی پنج قانون رد جریان هجومی در هنگام وقوع جریان هجومی  
 ۱۲۷ آزمایشگاهی و خروجی فازی نهایی مبنی بر رد وقوع جریان هجومی
- ۵-۲-۴-۲ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اضافه تحریک و خروجی فازی نهایی  
 مبنی بر رد وقوع اضافه تحریک در هنگام وقوع جریان هجومی آزمایشگاهی ۱۲۸
- ۵-۲-۴-۳ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اشباع CT ها و خروجی فازی نهایی  
 مبنی بر رد اشباع CT ها در هنگام وقوع جریان هجومی آزمایشگاهی ۱۲۹
- ۵-۲-۴-۴ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد عدم تناسب نسبت CT ها و خروجی فازی  
 نهایی مبنی بر رد عدم تناسب نسبت CT ها در هنگام وقوع جریان هجومی ۱۳۰
- ۵-۲-۴-۵ خروجیهای فازی هر یک از معیارهای سه گانه تصمیم گیری رله و خروجی  
 ۱۳۱ نهایی مبنی بر عملکرد رله در هنگام وقوع جریان هجومی آزمایشگاهی
- ۵-۲-۵-۱ خروجیهای فازی پنج قانون رد جریان هجومی در هنگام اشباع CT  
 و خروجی فازی نهایی مبنی بر رد وقوع جریان هجومی ۱۳۳
- ۵-۲-۵-۲ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اضافه تحریک و خروجی فازی نهایی  
 مبنی بر رد وقوع اضافه تحریک در هنگام اشباع CT ۱۳۴
- ۵-۲-۵-۳ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد اشباع CT ها و خروجی فازی نهایی  
 مبنی بر رد اشباع CT ها در هنگام اشباع CT ۱۳۵
- ۵-۲-۵-۴ خروجیهای فازی هر یک از قوانین رد عدم تناسب نسبت CT ها و خروجی فازی  
 نهایی مبنی بر رد عدم تناسب نسبت CT ها در هنگام اشباع CT ۱۳۶
- ۵-۲-۵-۵ خروجیهای فازی هر یک از معیارهای سه گانه تصمیم گیری رله و خروجی  
 نهایی مبنی بر عملکرد رله در هنگام اشباع CT ۱۳۷

## فهرست جداول

صفحه	عنوان	جدول
<b>فصل سوم</b>		
۳۴	دستگاه ۶ معادله-۶ مجهول جهت تعیین درایه های ماتریس [L]	۳-۱
۵۸	منحنی $\lambda$ -I ترانسفورماتور آزمایشگاه	۳-۲
۶۴	منحنی مغناطیسی CT از نوع a	۳-۳
۶۴	منحنی مغناطیسی CT از نوع b	۳-۴
<b>فصل چهارم</b>		
۸۰	پارامترهای حفاظتی در زوایای مختلف برقدار شدن ترانسفورماتور	۴-۱
۸۱	پارامترهای حفاظتی در خطاهای داخلی مختلف جهت رد جریان هجومی	۴-۲
۸۷	پارامترهای حفاظتی در انواع مختلف اضافه تحریک	۴-۳
۸۷	پارامترهای حفاظتی در خطاهای داخلی مختلف جهت رد اضافه تحریک	۴-۴
۹۲	پارامترهای حفاظتی در انواع مختلف اشباع CT ها	۴-۵
۹۲	پارامترهای حفاظتی جهت رد اشباع CT ها در خطاهای داخلی مختلف	۴-۶
۹۶	پارامترهای حفاظتی تشخیص عدم تناسب نسبت CT ها در شبیه سازی عدم تناسب نسبت CT ها	۴-۷
۹۶	پارامترهای حفاظتی تشخیص عدم تناسب نسبت CT ها در شبیه سازی خطاهای داخلی مختلف	۴-۸

# فصل اول

## مقدمه