



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: برق و رباتیک

گروه: قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان :

بررسی تأثیر جریان هجومی بر سیستم حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر علیرضا احمدی فرد

دانشجو:

معصومه رسول پور

آبان ۱۳۹۰

## تعهد نامه

اینجانب ..... **مصطفی رسول پور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ..... **برق (قدرت)** دانشکده مهندسی برق و رباتیک

دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

**بررسی تأثیر جریان هجوری بر سیستم حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت**

تحت راهنمایی آقای دکتر **مهدی بانزاد** متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ : ۱۳۹۵ ، ۸ ، ۸

امضاء دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

شماره : ۷۰۸۹  
تاریخ : ۹۰/۰۸/۰۸  
ویرایش : -----

بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :  
معصومه رسول پور رشته : برق گرایش : قدرت  
تحت عنوان : : بررسی تأثیر جریان هجومی بر سیستم حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت  
که در تاریخ ۹۰/۰۷/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول ( با درجه : عالی ) امتیاز ( ۱۹,۶۸۹ )  دفاع مجدد  مردود

- ۱- عالی ( ۱۹ - ۲۰ )  
۲- بسیار خوب ( ۱۸ - ۱۸/۹۹ )  
۳- خوب ( ۱۶ - ۱۷/۹۹ )  
۴- قابل قبول ( ۱۴ - ۱۵/۹۹ )  
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	صهدی بانزاده	۱- استاد راهنما
	استادیار	عبدالله فرز	۲- استاد مشاور
	استادیار	امیررضا فرز	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	هادی هاشمی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	کمن امینی	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده:

## تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش را به ما عطا فرمود. اینجانب بر خود لازم می‌دانم که در این چند خط محدود از تلاش‌ها و کمک‌های فراوان استادانم دکتر مهدی بانژاد و دکتر علیرضا احمدی فرد کمال تشکر را داشته باشم، که در مسیر تهیه و ارائه این پروژه کمال همکاری را با اینجانب داشته‌اند. همچنین از تلاش‌های آقایان مهندس حسن نیا و مهندس خسروی در اجرای تست آزمایشگاهی این پایان نامه تشکر می‌نمایم.

## چکیده :

رله های دیفرانسیل از حفاظت های اصلی و اولیه ترانسفورماتور قدرت هستند. بنابراین عملکرد صحیح و سریع این ادوات دارای اهمیت خاصی می باشد. در برخی موارد عملکرد نادرست رله دیفرانسیل رخ می دهد که به دلیل جریان های هجومی، اشباع ترانسفورماتورهای جریان، اضافه تحریک ترانسفورماتور و جریان تفاضلی ناشی از عدم تناسب نسبت ترانسفورماتورهای جریان به واسطه عملکرد تپ چنجر ترانسفورماتور می باشد. در میان این دلایل تأثیر جریان هجومی مهم ترین عامل خطای عملکرد رله دیفرانسیل می باشد. به همین دلیل مطالعات زیادی جهت ارائه روش های تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی در ترانسفورماتور قدرت صورت گرفته است.

در این پایان نامه نیز به منظور جلوگیری از عملکرد نادرست رله دیفرانسیل، یک روش جدید برای تشخیص جریان هجومی ارائه می شود. در روش پیشنهادی از یک ابزار پردازش سیگنال به نام تبدیل موجک استفاده می شود. الگوریتم پیشنهادی بر اساس ویژگی های استخراج شده از تحلیل زمان-فرکانسی تبدیل موجک می باشد. تحلیل موجک منجر به ایجاد مؤلفه های فرکانسی متغیر با زمان، در سطوح فرکانسی مختلف می شود. بررسی های انجام شده در این پایان نامه، روی توزیع انرژی این مؤلفه ها در سطوح فرکانسی مختلف، نشان دهنده اختلاف انرژی بین جریان هجومی و جریان خطای داخلی در سطوح فرکانسی می باشد. این تفاوت جهت متمایزسازی جریان های خطا و هجومی استفاده می شود. به منظور ایجاد یک الگوی مناسب و استفاده از آن در الگوریتم پیشنهادی از یک معیار آماری به نام ضریب همبستگی استفاده می شود. فاکتور ضریب همبستگی برای بیان ارتباط بین انرژی های ضرایب تبدیل موجک در سطوح فرکانسی مختلف به کار می رود. بر این اساس یک معیار تشخیص ایجاد شده و برای جلوگیری از عملکرد رله دیفرانسیل در مورد جریان هجومی به کار می رود. نتایج حاصل از شبیه سازی و تست آزمایشگاهی صحت روش پیشنهادی را تأیید می کنند.

## کلمات کلیدی:

ترانسفورماتور قدرت، حفاظت دیفرانسیل، جریان هجومی، جریان خطای داخلی، تحلیل موجک

فصل اول : مقدمه

مقدمه ..... ۲

فصل دوم : خطاها و حفاظت های ترانسفورماتور قدرت

۱-۲- خطاهای ترانسفورماتور قدرت ..... ۸

۱-۱-۲- خطاهای الکتریکی داخلی ..... ۸

۱-۱-۱-۲- خطای فاز به زمین ..... ۸

۱-۱-۱-۱-۲- اتصال در سیم پیچ ستاره ترانسفورماتور با نقطه زمین شده از طریق یک امپدانس ..... ۸

۱-۱-۱-۲- خطای اتصال زمین در سیم پیچ ستاره با نقطه ستاره مستقیم زمین شده ..... ۱۰

۱-۱-۱-۳- خطای اتصال زمین در سیم پیچ مثلث ..... ۱۰

۲-۱-۱-۲- خطای فاز به فاز ..... ۱۰

۳-۱-۱-۲- خطای اتصال حلقه ..... ۱۱

۴-۱-۱-۲- خطاهای هسته ..... ۱۱

۲-۱-۲- خطاهای الکتریکی خارجی ..... ۱۲

۱-۲-۱-۲- خطای اضافه بار ..... ۱۲

۲-۲-۱-۲- خطای اتصال کوتاه ..... ۱۲

۳-۲-۱-۲- خطای حاصل از اضافه ولتاژهای گذرا ..... ۱۲

۴-۲-۱-۲- خطای فوق تحریک یا اضافه شار ..... ۱۳

۳-۱-۲- خطاهای غیر الکتریکی ..... ۱۳

۱-۳-۱-۲- خطای تانک روغن ترانسفورماتور ..... ۱۳

۲-۳-۱-۲- اشکالات سیستم تنظیم کننده ولتاژ ..... ۱۳

۲-۲- حفاظت های ترانسفورماتور قدرت ..... ۱۴

۱-۲-۲- رله اتصال زمین محدود ..... ۱۴

۲-۲-۲- حفاظت اضافه جریان ..... ۱۴

۱-۲-۲-۲- فیوزها ..... ۱۴

۲-۲-۲-۲- رله های اضافه جریان ..... ۱۴

۳-۲-۲- حفاظت اضافه شار ..... ۱۵



۱۵	۴-۲-۲- حفاظت درجه حرارت سیم پیچ ترانسفورماتور.....
۱۵	۵-۲-۲- حفاظت اتصال زمین مخزن ترانسفورماتور.....
۱۵	۶-۲-۲- حفاظت روغن ترانسفورماتور.....
۱۶	۷-۲-۲- حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت.....
۱۹	۱-۷-۲-۲- حفاظت دیفرانسیل برای ترانسفورماتورهای قدرت معمول.....
۲۰	۲-۷-۲-۲- رله های دیفرانسیل استاتیکی.....
۲۱	۳-۷-۲-۲- رله های دیفرانسیل عددی.....
۲۲	۴-۷-۲-۲- عوامل تأثیر گذار در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت.....
۲۲	۱-۴-۷-۲-۲- خطای جریان هجومی وصل ترانسفورماتور.....
۲۳	۲-۴-۷-۲-۲- خطای نسبت تبدیل و خطای گروه برداری.....
۲۵	۳-۴-۷-۲-۲- خطای اضافه تحریک در ترانسفورماتورهای قدرت.....
۲۶	۴-۴-۷-۲-۲- خطای جریان بی باری.....
۲۶	۵-۴-۷-۲-۲- خطای اشباع ترانسفورماتورهای جریان.....
۲۷	۶-۴-۷-۲-۲- خطای دستگاه تنظیم کننده ولتاژ.....
۲۸	۳-۲- جمع بندی.....

### فصل سوم : جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت

۳۰	۱-۳- مقدمه.....
۳۱	۲-۳- روابط حاکم بر جریان هجومی ترانسفورماتور.....
۳۵	۳-۳- شکل، دامنه و مدت عبور جریان هجومی.....
۳۵	۱-۳-۳- اندازه ترانسفورماتور.....
۳۵	۲-۳-۳- امیدانس شبکه متصل به ترانسفورماتور.....
۳۶	۳-۳-۳- خواص مغناطیسی ماده هسته ترانسفورماتور.....
۳۶	۴-۳-۳- مقدار شار پس ماند در هسته.....
۳۶	۵-۳-۳- لحظه برقدار شدن ترانسفورماتور.....
۳۶	۶-۳-۳- روش برقدار شدن ترانسفورماتور.....
۳۶	۴-۳- انواع جریان هجومی ترانسفورماتور.....
۳۷	۱-۴-۳- جریان هجومی ناشی از تحریک اولیه ترانسفورماتور قدرت.....
۳۷	۲-۴-۳- جریان هجومی بازیابی.....
۳۷	۳-۴-۳- جریان هجومی القایی.....

۳۸	۵-۳- کاهش جریان هجومی و عوامل مؤثر بر آن
۳۹	۶-۳- محتوای هارمونیک جریان هجومی
۴۰	۱-۶-۳- هارمونیک دوم
۴۰	۲-۶-۳- هارمونیک سوم
۴۰	۷-۳- اثر پارامترهای طراحی ترانسفورماتور روی مؤلفه دوم هارمونیک جریان هجومی
۴۰	۱-۷-۳- اثر چگالی شار هسته
۴۱	۲-۷-۳- اثر نوع اتصال سیم پیچی
۴۲	۸-۳- جمع بندی

### فصل چهارم : روش های تشخیص جریان هجومی در ترانسفورماتور قدرت

۴۴	۱-۴- مقدمه
۴۴	۲-۴- استفاده از مؤلفه های هارمونیک جریان
۴۵	۳-۴- استفاده از ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور به عنوان عامل بازدارنده
۴۶	۴-۴- استفاده از میزان تشابه بین شکل موج ولتاژ و جریان
۴۷	۵-۴- روش توان تفاضلی
۴۸	۶-۴- روش تابع مشتق دوم جریان های تفاضلی
۴۹	۷-۴- استفاده از یک معیار جدید بر اساس هارمونیک دوم
۵۰	۸-۴- روش زاویه مرده
۵۰	۹-۴- روش مبنی بر تحلیل مؤلفه اصلی
۵۲	۱۰-۴- استفاده از تکنیک بازدارنده شاری
۵۵	۱۱-۴- روش های مبتنی بر هوش مصنوعی
۵۵	۱-۱۱-۴- شبکه عصبی
۵۶	۲-۱۱-۴- منطق فازی
۵۷	۱۲-۴- جمع بندی

### فصل پنجم : تبدیل موجک و کاربردهای آن در سیستم قدرت

۵۹	۱-۵- مقدمه
۵۹	۲-۵- چرا تجزیه سیگنال ؟
۶۰	۳-۵- گذارهای سیستم قدرت
۶۱	۴-۵- تبدیل فوریه

۶۲	۵-۵- تبدیل فوریه زمان کوتاه
۶۳	۵-۶- تبدیل موجک
۶۷	۵-۷- تبدیل موجک گسسته
۶۹	۵-۸- تبدیل موجک سیگنال های ورودی گسسته با طول محدود
۶۹	۵-۹- الگوریتم تجزیه چند سطحی
۷۰	۵-۱۰- فیلترسازی
۷۱	۵-۱۱- انواع توابع موجک
۷۲	۵-۱۱-۱- موجک HAAR
۷۳	۵-۱۱-۲- موجک DAUBECHIES
۷۵	۵-۱۱-۳- موجک SYMLET
۷۵	۵-۱۱-۴- موجک COIFLETS
۷۶	۵-۱۱-۵- موجک BIORTHOGONAL
۷۷	۵-۱۱-۶- موجک MORLET
۷۸	۵-۱۱-۷- موجک MEXICAN HAT
۷۸	۵-۱۱-۸- موجک MEYER
۷۸	۵-۱۲- کاربردهای تبدیل موجک در سیستم قدرت
۷۹	۵-۱۲-۱- مسائل کیفیت توان
۸۱	۵-۱۲-۲- تشخیص و مکان یابی تخلیه جزئی
۸۱	۵-۱۲-۳- پیش بینی بار
۸۱	۵-۱۲-۴- اندازه گیری های سیستم قدرت
۸۲	۵-۱۲-۵- حفاظت سیستم قدرت
۸۳	۵-۱۲-۶- گذارهای سیستم قدرت
۸۴	۵-۱۳- تشخیص جریان هجومی از جریان خطا در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت با استفاده از تبدیل موجک
۹۷	۵-۱۴- جمع بندی

### فصل ششم : ارائه روش پیشنهادی تشخیص جریان هجومی و بیان نتایج

۹۹	۶-۱- مقدمه
۱۰۰	۶-۲- روش تشخیص جریان هجومی از جریان خطا
۱۰۰	۶-۲-۱- مبنای روش پیشنهادی

۱۰۷	۲-۲-۶-الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطا
۱۱۰	۳-۶- بررسی روش پیشنهادی با استفاده از نتایج شبیه سازی
۱۱۰	۱-۳-۶- سیستم قدرت مورد مطالعه
۱۱۱	۲-۳-۶- شبیه سازی سیگنال های جریان
۱۱۳	۳-۳-۶- شبیه سازی و تحلیل جریان خطای داخلی ترانسفورماتور
۱۲۰	۴-۳-۶- شبیه سازی و تحلیل جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت
۱۲۳	۴-۶- بررسی الگوریتم پیشنهادی در یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی
۱۲۵	۱-۴-۶- آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور و تحلیل نتایج آن
۱۳۰	۲-۴-۶- آزمایش جریان هجومی ترانسفورماتور و تحلیل نتایج آن
۱۳۴	۵-۶- تحلیل نتایج

### فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۳۶	۱-۷- نتیجه گیری
۱۳۸	۲-۷- پیشنهادات

### پیوست

۱۴۰	۱- پیوست- ضریب همبستگی
۱۴۱	۲- پیوست- ضریب همبستگی و استقلال

### مراجع

۱۴۳	مراجع
-----	-------

## لیست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) شرایط اتصالی در ترمینال خروجی اتصال ستاره ..... ۸
- شکل (۲-۲) جریان خطا و جریان اولیه متناظر با آن در اتصالی در سیم پیچ ستاره ..... ۹
- شکل (۳-۲) جریان خطا و جریان اولیه متناظر با آن در نقطه ستاره مستقیم زمین شده ..... ۱۰
- شکل (۴-۲) جریان اتصال حلقه و جریان اولیه متناظر با آن ..... ۱۱
- شکل (۵-۲) اتصال اصلی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ..... ۱۷
- شکل (۶-۲) مشخصه تریپ یک رله دیفرانسیل نمونه ..... ۱۷
- شکل (۷-۲) حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور تکفاز ..... ۱۸
- شکل (۸-۲) اتصال رله دیفرانسیل عددی ..... ۲۱
- شکل (۹-۲) حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت با استفاده از CT های وارد شده ..... ۲۴
- شکل (۱-۳) جریان هجومی سه فاز ..... ۳۰
- شکل (۲-۳) مدل منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور ..... ۳۲
- شکل (۳-۳) مدار معادل ترانسفورماتور تک فاز بدون بار ..... ۳۲
- شکل (۴-۳) توصیف گرافیکی جریان هجومی ..... ۳۴
- شکل (۵-۳) نرخ هارمونیک دوم به پیک جریان هجومی نمونه ..... ۴۱
- شکل (۱-۴) کلیدزنی بدون خطای ترانسفورماتور ..... ۴۶
- شکل (۲-۴) کلیدزنی ترانسفورماتور همراه با خطای داخلی ..... ۴۶
- شکل (۳-۴) خطای داخلی ترانسفورماتور ..... ۴۶
- شکل (۴-۴) الف) جریان هجومی، ب) جریان خطای داخلی ..... ۴۸
- شکل (۵-۴) جریان هجومی، A) هارمونیک دوم بزرگ، B) هارمونیک دوم کوچک ..... ۴۹
- شکل (۶-۴) تشریح PCA ..... ۵۱
- شکل (۷-۴) اجرای تحلیل PCA برای یک ترانسفورماتور نمونه ..... ۵۲
- شکل (۸-۴) مدار معادل ترانسفورماتور ..... ۵۳
- شکل (۹-۴) محدوده خطا و غیر خطا در منحنی مغناطیس کنندگی ..... ۵۴
- شکل (۱-۵) نمایش تحلیل فوریه ..... ۶۱
- شکل (۲-۵) نمایش تبدیل فوریه زمان کوتاه ..... ۶۳
- شکل (۳-۵) آنالیز تبدیل موجک ..... ۶۴

- شکل (۴-۵) A) توابع موج محلی موجک، B) انتقال، C) فشردگی یا گسترده‌گی در واحد مقیاس ..... ۶۴
- شکل (۵-۵) موج سینوسی با یک اغتشاش کوچک ..... ۶۵
- شکل (۶-۵) ضرایب تبدیل فوریه و تبدیل موجک ..... ۶۵
- شکل (۷-۵) طیف انرژی فوریه موجک های گسترده شده، A) توابع موجک گسترده شده، B) طیف انرژی متناظر با آن ..... ۶۶
- شکل (۸-۵) شماتیک تجزیه چند سطحی تبدیل موجک ..... ۷۰
- شکل (۹-۵) A) روند فیلترینگ برای تجزیه سیگنال، B) روند فیلترینگ برای بازسازی سیگنال ..... ۷۱
- شکل (۱۰-۵) تابع موجک HAAR ..... ۷۲
- شکل (۱۱-۵) موجک های DAUBECHIES ..... ۷۴
- شکل (۱۲-۵) دو نمونه موجک SYMLET و توابع مقیاس آن A) S6، B) S10 ..... ۷۵
- شکل (۱۳-۵) تابع موجک و مقیاس COIFLET C) C18، B) C12، A) C6 ..... ۷۶
- شکل (۱۴-۵) موجک BIORTHOGONAL ..... ۷۷
- شکل (۱۵-۵) موجک MORLET ..... ۷۷
- شکل (۱۶-۵) تابع موجک MEXICAN HAT ..... ۷۸
- شکل (۱۷-۵) تابع موجک MEYER ..... ۷۸
- شکل (۱۸-۵) قرارگیری زمان-فرکانس تبدیل موجک برای دو موج سینوسی ..... ۸۶
- شکل (۱۹-۵) روند تجزیه تک سطحی و بازسازی آن ..... ۸۶
- شکل (۲۰-۵) تجزیه چهار سطحی سیگنال جریان  $(I_\alpha)$  ..... ۸۷
- شکل (۲۱-۵) تجزیه جریان هجومی با تبدیل موجک گسسته ..... ۸۸
- شکل (۲۲-۵) تجزیه جریان خطای دو فاز به زمین (BC-G) با تبدیل موجک گسسته ..... ۸۸
- شکل (۲۳-۵) تجزیه جریان حاصل از وقوع همزمان جریان هجومی و خطای دو فاز (B-C) با تبدیل موجک گسسته ..... ۸۹
- شکل (۲۴-۵) پاسخ الگوریتم به جریان هجومی ..... ۹۰
- شکل (۲۵-۵) پاسخ الگوریتم به وقوع همزمان جریان هجومی و خطا (B-C) ..... ۹۰
- شکل (۲۶-۵) جریان خطای دو فاز به زمین و ضرایب تبدیل موجک آن ..... ۹۱
- شکل (۲۷-۵) جریان هجومی و ضرایب تبدیل موجک آن ..... ۹۲
- شکل (۲۸-۵) ضرایب جزئیات سطح پنجم در A) جریان هجومی، B) جریان خطا ..... ۹۳
- شکل (۲۹-۵) ویژگی جریان هجومی و جریان خطا ..... ۹۴
- شکل (۳۰-۵) سطوح فرکانسی جریان هجومی ..... ۹۵

- شکل (۳۱-۵) سطوح فرکانسی جریان خطای دو فاز به زمین..... ۹۵
- شکل (۳۲-۵) فاصله زمانی برای (A) جریان هجومی و (B) جریان خطا ..... ۹۶
- شکل (۱-۶) فلوجارت الگوریتم پیشنهادی ..... ۱۰۹
- شکل (۲-۶) دیاگرام تک خطی سیستم قدرت نمونه ..... ۱۱۰
- شکل (۳-۶) سیستم قدرت شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD ..... ۱۱۱
- شکل (۴-۶) جریان خطای تک فاز به زمین ..... ۱۱۴
- شکل (۵-۶) جریان خطای دو فاز به زمین ..... ۱۱۴
- شکل (۶-۶) جریان خطای سه فاز به زمین ..... ۱۱۵
- شکل (۷-۶) ضرایب همبستگی برای خطای تک فاز به زمین ..... ۱۱۶
- شکل (۸-۶) ضرایب همبستگی برای خطای دو فاز به زمین ..... ۱۱۶
- شکل (۹-۶) ضرایب همبستگی برای خطای سه فاز به زمین ..... ۱۱۷
- شکل (۱۰-۶) تعداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای تک فاز به زمین ..... ۱۱۸
- شکل (۱۱-۶) عداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای دو فاز به زمین ..... ۱۱۹
- شکل (۱۲-۶) عداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای سه فاز به زمین ..... ۱۱۹
- شکل (۱۳-۶) جریان هجومی ترانسفورماتور ..... ۱۲۰
- شکل (۱۴-۶) جریان هجومی فاز A ..... ۱۲۱
- شکل (۱۵-۶) ضرایب همبستگی برای جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت ..... ۱۲۱
- شکل (۱۶-۶) تعداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت ..... ۱۲۲
- شکل (۱۷-۶) سیستم نمونه آزمایشگاهی ..... ۱۲۴
- شکل (۱۸-۶) جریان های خطا ..... ۱۲۵
- شکل (۱۹-۶) ضرایب همبستگی برای خطای تک فاز به زمین ..... ۱۲۶
- شکل (۲۰-۶) ضرایب همبستگی برای خطای دو فاز به زمین ..... ۱۲۷
- شکل (۲۱-۶) ضرایب همبستگی برای خطای سه فاز به زمین ..... ۱۲۷
- شکل (۲۲-۶) تعداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای تک فاز به زمین ..... ۱۲۸
- شکل (۲۳-۶) تعداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای دو فاز به زمین ..... ۱۲۹
- شکل (۲۴-۶) تعداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای سه فاز به زمین ..... ۱۲۹
- شکل (۲۵-۵) جریان هجومی در ولتاژ ۱۵۰ ولت ..... ۱۳۰
- شکل (۲۶-۶) جریان هجومی در ولتاژ ۱۶۰ ولت ..... ۱۳۱
- شکل (۲۷-۶) ضرایب همبستگی جریان هجومی در ولتاژ ۱۵۰ ولت ..... ۱۳۱

شکل (۶-۲۸) ضرایب همبستگی جریان هجومی در ولتاژ ۱۶۰ ولت ..... ۱۳۲

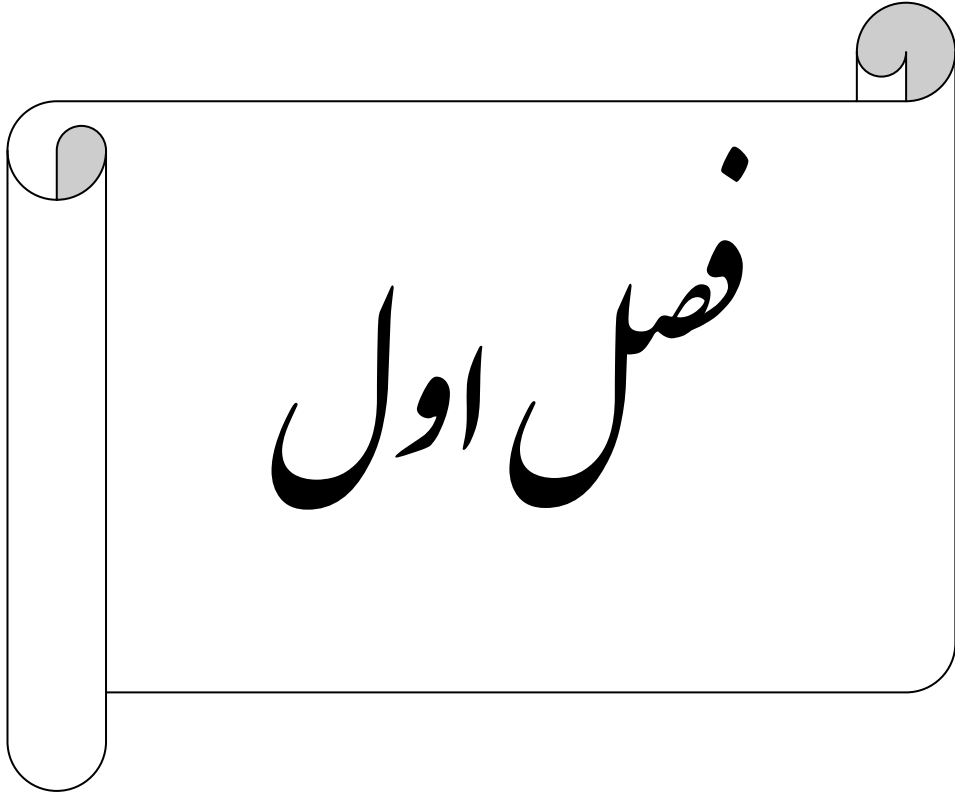
شکل (۶-۲۹) تعداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای جریان هجومی ۱۵۰ ولت ..... ۱۳۳

شکل (۶-۳۰) تعداد قله های موجود در ضرایب همبستگی برای جریان هجومی ۱۶۰ ولت ..... ۱۳۳



## لیست جداول

جدول (۱-۲) مقدار نسبی هارمونیک ها در حالت جریان هجومی و جریان خطای داخلی ..... ۲۲



مقدمه

## مقدمه

ترانسفورماتورها در اندازه های مختلف، از سایز بسیار کوچک در شارژرهای تلفن همراه تا اندازه های بزرگ با توان بالا، وجود دارند. تمام آنها بر اساس قانون القای مغناطیسی عمل می کنند. هرچند تفاوت هایی در طراحی ها وجود دارد که آنها را ویژه استفاده از کاربردهای صنعتی یا خانگی می کند. بنابراین ترانسفورماتورهای قدرت یکی از اجزای مهم و گرانبه سیستم های انتقال و توزیع برق هستند.

بروز خطا در ترانسفورماتور قدرت، به طور طبیعی می تواند به خسارت جدی در ترانسفورماتور منجر شود. برای تعمیر و بازسازی ترانسفورماتور، باید آن را به کارگاه تولیدی حمل نمود که خود مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است. از سوی دیگر خارج شدن ترانسفورماتور از سیستم قدرت متصل به آن بهره برداری از شبکه های قدرت مرتبط با آن را دچار مشکل می کند. بنابراین خطای ترانسفورماتور قدرت به طور معمول یک اختلال جدی در بهره برداری از شبکه است.

انتخاب مناسب حفاظت ترانسفورماتور می تواند با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی انجام شود. این عامل همیشه برای حفاظت ترانسفورماتورها یکسان نیست و متناسب با درجه اهمیت ترانسفورماتور در سیستم قدرت تغییر می کند. ساده ترین حفاظت مانند فیوز ممکن است برای ترانسفورماتورهای با قدرت خیلی کم و درجه اهمیت پایین مورد قبول باشد در صورتی که برای ترانسفورماتورهای با قدرت چند صد مگاوات آمپر و درجه اهمیت زیاد، باید بهترین حفاظت ها طراحی شود.

حفاظت دیفرانسیل از حفاظت های اصلی و مهم ترانسفورماتور قدرت محسوب می شود. این حفاظت بر اساس مقایسه جریان های تفاضلی در دو سمت ترانسفورماتور طراحی می شود. در حالت عملکرد عادی ترانسفورماتور جریان تفاضلی تقریباً برابر با جریان مغناطیسی سیم پیچ های ترانسفورماتور است. بنابراین فراتر رفتن جریان های تفاضلی دو سمت ترانسفورماتور از یک مقدار تعیین شده، نشان دهنده بروز خطا در ترانسفورماتور می باشد. یک طراحی مناسب از رله دیفرانسیل باید دارای سرعت و

دقت کافی باشد تا علاوه بر تشخیص درست خطای داخلی ترانسفورماتور، به سرعت آن را از بقیه سیستم قدرت جدا کند این امر علاوه بر حفاظت ترانسفورماتور در برابر جریان های شدید خطا، مانع از دست رفتن تعادل و پایداری شبکه می گردد.

در طراحی رله دیفرانسیل باید عوامل عملکرد نادرست آن در نظر گرفته شده و در الگوریتم تشخیص آن لحاظ شود. عواملی که باعث عملکرد نادرست رله دیفرانسیل می شود می تواند شامل جریان هجومی مغناطیس کننده، اضافه تحریک ترانسفورماتور، اشباع ترانسفورماتورهای جریان ناشی از اتصال کوتاه های داخلی شدید و نسبت تبدیل متغیر ترانسفورماتور به واسطه تپ چنجر ترانسفورماتور باشد. در این پایان نامه تمرکز اصلی بر روی عملکرد نادرست رله دیفرانسیل ناشی از جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت است. در میان انواع جریان های هجومی، جریان های ناشی از کلیدزنی ترانسفورماتور، از مهم ترین دلایل عملکرد نادرست رله دیفرانسیل است که موضوع مورد بحث بسیاری از محققان در زمینه حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت، قرار گرفته است. بنابراین در این پایان نامه روش تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت مورد بررسی قرار می گیرد.

اکثر روش های ارائه شده برای جلوگیری از عملکرد نامطلوب ترانسفورماتور و روش هایی که در حال حاضر در سیستم های قدرت واقعی استفاده می شود، بر اساس غالب بودن مؤلفه هارمونیک دوم جریان هجومی بر جریان خطا است. که این روش بر اساس تغییرات سیستم های قدرت جدید و به کارگیری زیاد از خازن های جبران سازی خط و استفاده از مواد جدید در مواد تشکیل دهنده هسته ترانسفورماتور قدرت دچار مشکل شده است. به این صورت که میزان مؤلفه هارمونیک دوم جریان خطا بر خلاف انتظار از جریان هجومی بیشتر شده و الگوریتم تشخیص مبنی بر این روش ها را دچار اشتباه می کند. بر این اساس در سال های متمادی تلاش های زیادی برای ارائه روش های نوین

تشخیص جریان هجومی در حفاظت دیفرانسیل که دارای قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش های معمول باشد صورت گرفته است.

در این میان می توان به روش هایی مانند توان تفاضلی، روش تشخیص بر مبنای میزان تشابه بین شکل موج ولتاژ و جریان، تابع مشتق دوم جریان های تفاضلی، استفاده از یک معیار جدید بر اساس هارمونیک دوم، استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی، روش زاویه مرده، روش مبنی بر ولتاژ القایی، تبدیل مودال شکل موج های ولتاژ و جریان، تکنیک مبنی بر اندوکتانس نشستی، روش مبنی بر فاصله بین دو پیک متوالی از جریان تفاضلی اشاره کرد. هر کدام از این روش ها دارای مزایا و معایبی می باشند که تأخیر بیش از حد در زمان تشخیص، وابستگی به هارمونیک دوم، وابسته بودن به شکل موج، نیاز داشتن به سیگنال ولتاژ علاوه بر جریان، نیاز به تعیین آستانه عملکرد برای هر سیستم قدرت جدید و داشتن حجم بالای محاسبات از معایب اصلی این روش ها می باشد. در سال های اخیر تکنیک هایی بر اساس هوش مصنوعی مانند روش های مبنی بر منطق فازی و شبکه عصبی نیز بیان شده است.

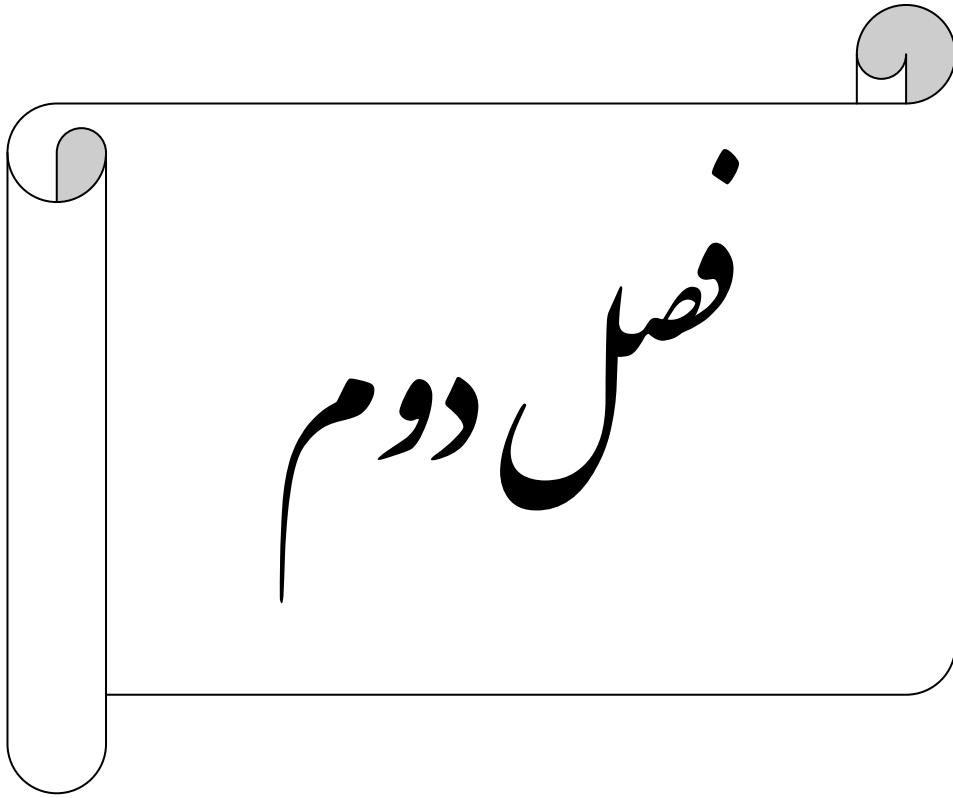
روش های مبنی بر شبکه عصبی نیاز به آموزش قوانین زیادی برای تصمیم گیری دارند که ایجاد این قوانین و آموزش شبکه نیاز به زمان زیادی دارد. علاوه بر آن این قوانین نمی توانند با تغییرات توپولوژی شبکه قدرت تطبیق یابند و برای هر تغییر و سیستم قدرت جدید نیاز است تا قوانین جدیدی ایجاد شود. روش های مبنی بر منطق فازی نیز به قوانین زیادی نیاز دارند که تصمیم گیری را مشکل و زمان پاسخ گویی آن را نیز آهسته می کند. روش های پردازش سیگنال که تبدیل موجک از روش های جدید آن می باشد، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است و بر اساس آن رهیافت هایی ارائه شده است. استفاده از سیگنال توان و نیاز داشتن به سیگنال ولتاژ علاوه بر جریان برای محاسبه آن، مشکل بودن تعیین یک معیار عددی و حجم محاسبات زیاد در محاسبه آن از معایب اصلی این روش ها می باشد. بنابراین در این پایان نامه یک روش صحیح، دقیق، با قابلیت اطمینان بالا و محاسبات ساده تر بر اساس تحلیل موجک پیشنهاد می شود.

در روش ارائه شده در این پایان نامه از تبدیل موجک گسسته برای تشخیص خطا استفاده می شود. در این روش با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال های جریان تفاضلی به یک سری مؤلفه های فرکانسی پایین تر، برای استخراج ویژگی های هر یک از جریان ها تجزیه شده و رفتار این مؤلفه های فرکانسی به عنوان اساس روش تشخیص مورد تحلیل قرار می گیرد. بررسی توزیع انرژی مؤلفه های زمان-فرکانسی تبدیل موجک نشان دهنده متفاوت بودن این توزیع به ازای جریان های هجومی و جریان های خطا در مقیاس های زمانی مختلف می باشد. فاکتور ضریب همبستگی که یک روش آماری می باشد برای تعیین یک الگوی رفتاری مشخص در مورد انرژی ضرایب تبدیل موجک، در الگوریتم پیشنهادی به کار می رود. سپس یک معیار تشخیص بر اساس مقادیر ضریب همبستگی تشکیل و برای تمایز بین جریان هجومی و جریان خطای داخلی ترانسفورماتور به کار می رود.

صحت الگوریتم ارائه شده در این پایان نامه توسط سیگنال های جریان هجومی و جریان خطای شبیه سازی شده مورد بررسی قرار می گیرد. شبیه سازی سیگنال های جریان توسط برنامه گذرای الکترومغناطیسی PSCAD/EMTDC که نرم افزار قدرمندی جهت بررسی سیگنال های گذرا می باشد، صورت می گیرد. در ادامه برای تأیید نتایج حاصل از شبیه سازی از یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی استفاده شده و الگوریتم تشخیص با استفاده از سیگنال های جریان واقعی تست می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی و تست آزمایشگاهی صحت روش ارائه شده را اثبات می کنند.

در یک نگاه کلی در فصل دوم به طور خلاصه خطاهای ترانسفورماتور قدرت و حفاظت های مورد استفاده برای آن بیان می شود. در فصل سوم به چگونگی ایجاد جریان هجومی، روابط حاکم بر جریان هجومی و عوامل مؤثر بر میزان دامنه آن پرداخته می شود. مروری بر برخی روش های تشخیص جریان هجومی از جریان خطا در فصل چهارم انجام می شود. سپس اساس روش پیشنهادی که تبدیل موجک است، در فصل پنجم بیان و روابط آن و همچنین یک نمونه از روش تشخیص انجام شده بر اساس تبدیل موجک مطرح می گردد. در فصل ششم اصول عملکرد روش پیشنهادی ارائه و عملکرد

آن توسط سیگنال های جریان شبیه سازی شده و همچنین سیگنال های به دست آمده از تست آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می گیرد. نتیجه گیری و پیشنهادات نیز در فصل هفتم بیان می شوند.



خطاها و حفاظت های ترانسفورماتور قدرت



## ۱-۲- خطاهای ترانسفورماتور قدرت

خطاهای ترانسفورماتور قدرت به طور کلی به سه دسته خطاهای الکتریکی داخلی، خطاهای الکتریکی خارجی و خطاهای غیر الکتریکی تقسیم بندی می شود که به صورت زیر بیان می شوند.

### ۱-۱-۲- خطاهای الکتریکی داخلی

خطاهای الکتریکی داخلی شامل موارد زیر است.

#### ۱-۱-۱-۲- خطای فاز به زمین

مقدار جریان این نوع خطا، به نوع اتصال، امپدانس زمین و محل اتصالی بستگی دارد.

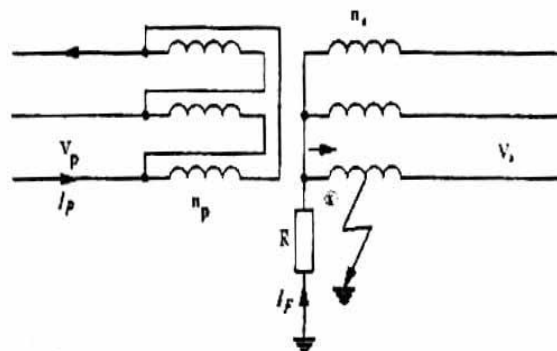
#### ۱-۱-۱-۱-۲- اتصالی در سیم پیچ ستاره ترانسفورماتور با نقطه زمین شده از طریق یک

##### امپدانس

مقدار جریان زمین سیم پیچ ترانسفورماتور، به امپدانس زمین بستگی داشته و متناسب با محل اتصالی

مقدار آن تغییر می کند. مطابق شکل (۱-۲) اگر ترانسفورماتور ولتاژ اولیه  $V_p$  و ولتاژ ثانویه  $V_s$  را

داشته باشد و فاصله نقطه اتصالی از نقطه ستاره  $x$  باشد، خواهیم داشت [۱]:



شکل (۱-۲) شرایط اتصالی در ترمینال خروجی اتصال ستاره

$$I_F = \frac{V_s \cdot x}{\sqrt{3}R} \quad (1-2)$$

نسبت تبدیل ترانسفورماتور با  $K$  نشان داده شده و به صورت زیر تعریف می شود.

$$K = \frac{N_p}{N_s} \quad (2-2)$$

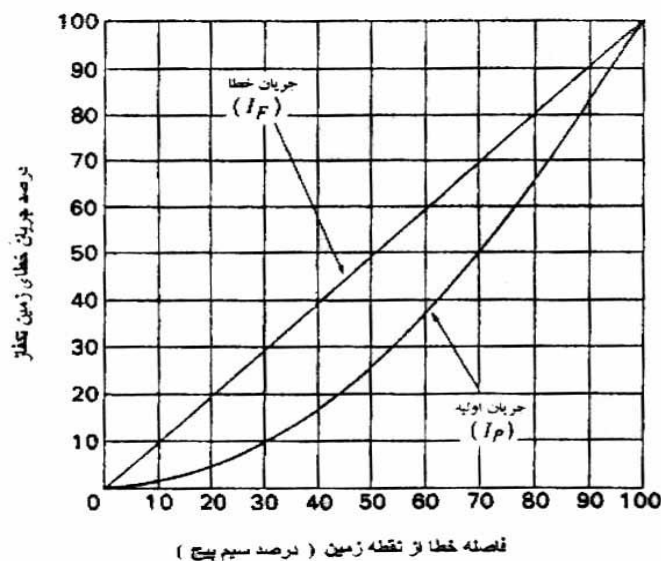
در این رابطه  $N_p$  تعداد دورهای سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور و  $N_s$  تعداد دورهای سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور است. در شرایطی که اتصالی در فاصله  $x$  ( $m$ ) از نقطه ستاره باشد، رابطه نسبت تبدیل به صورت زیر در می آید.

$$K = \frac{N_p}{N_s} x \quad (3-2)$$

با توجه به رابطه نسبت تبدیل، جریان اولیه متناظر با جریان خطا از حاصلضرب جریان خطا (جریان ثانویه ترانسفورماتور) با نسبت تبدیل به دست می آید که به صورت زیر است.

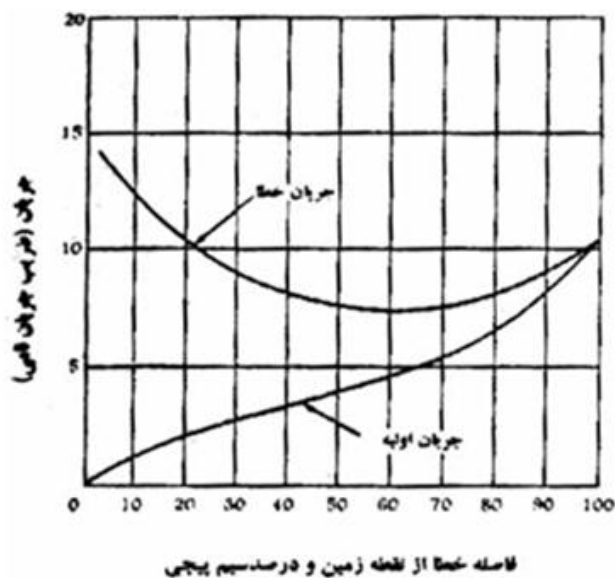
$$I_p = \frac{V_s \cdot x}{\sqrt{3}R} \cdot \frac{x \cdot n_s}{n_p} \Rightarrow I_p = I_F \cdot \frac{X^2}{\sqrt{3}} \quad (4-2)$$

در این روابط  $I_p$  و  $I_F$  به ترتیب جریان خطا و جریان اولیه ترانسفورماتور و  $R$  مقاومت خطا (با واحد  $\Omega \cdot m$ ) در ترانسفورماتور هستند. در شکل (2-2) منحنی جریان خطا و جریان اولیه متناظر با آن در شرایط بروز اتصالی در نقاط مختلف سیم پیچ نشان داده شده است.



شکل (2-2) جریان خطا و جریان اولیه متناظر با آن در اتصالی سیم پیچ ستاره [۱]

۲-۱-۱-۱-۲- خطای اتصال زمین در سیم پیچ ستاره با نقطه ستاره مستقیم زمین شده در این حالت جریان اتصالی توسط راکتانس نشتی سیم پیچ اتصال کوتاه شده ترانسفورماتور، کنترل می شود. مقدار این جریان خطا به نحو پیچیده ای بستگی به موقعیت مکانی اتصالی روی سیم پیچ تغییر می کند. شکل (۳-۲) این وضعیت را نشان می دهد.



شکل (۳-۲) جریان خطا و جریان اولیه متناظر با آن در نقطه ستاره مستقیم زمین شده [۱]

### ۲-۱-۱-۱-۳- خطای اتصالی زمین در سیم پیچ مثلث

مقدار جریان اتصالی به نحوه زمین کردن بستگی دارد. به طور کلی در این نوع خطا مقدار جریان اتصال زمین کمتر از جریان نامی ترانسفورماتور خواهد بود.

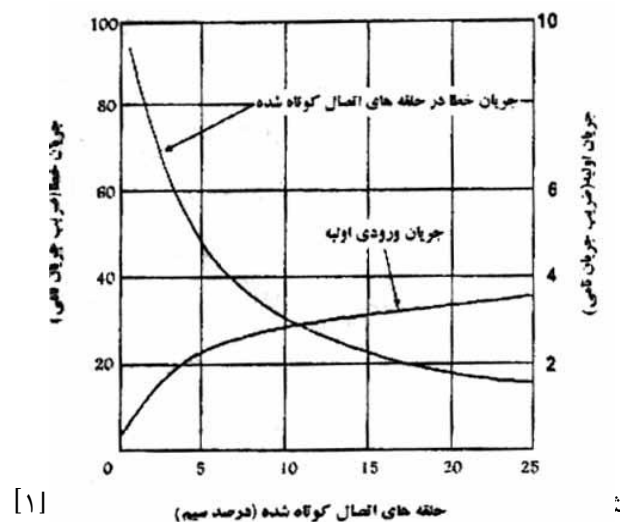
### ۲-۱-۱-۲- خطای فاز به فاز

این نوع خطا با توجه به اینکه سیم پیچ های هر فاز روی یک باز و نصب شده است و در صورت نقصان عایقی، به طور معمول به اتصال بدنه منجر می شود، به ندرت امکان وقوع آن وجود دارد.

## ۳-۱-۱-۲ خطای اتصال حلقه

در ترانسفورماتور های با ولتاژ زیاد که به خطوط هوایی متصل شده اند، احتمال وقوع اضافه ولتاژ های گذرای ناشی از صاعقه و یا کلید زنی وجود دارد.

در صورت مناسب نبودن عایق بندی بین حلقه های سیم پیچ ترانسفورماتور، اضافه ولتاژ گذرا به صورت تخلیه جزئی از سطح خارجی حلقه های متوالی عبور کرده و به اتصال کوتاه حلقه های ترانسفورماتور منجر می شود. ۷۰ تا ۸۰ درصد از خطاهای داخلی ترانسفورماتور اتصال حلقه می باشد. منحنی شکل (۲-۴) جریان اتصال حلقه و نیز جریان اولیه متناظر با آن را برای یک ترانسفورماتور با امپدانس ۳/۲۵٪ نشان می دهد.



## ۴-۱-۱-۲ خطاهای هسته

پیچ های ارتباطی و تکیه گاه هایی که صفحات هسته را به یکدیگر محکم می کنند، به ایجاد شرایط مناسب برای جریان های گردابی و در نهایت گرم شدن بیش از حد آن قسمت منجر می شود. اگر عایق بندی این اتصالات نقص داشته باشد، با گذشت زمان حرارت ایجاد شده در این نقاط داغ منجر به تخریب بیشتر عایق ها می شود.

## ۲-۱-۲- خطاهای الکتریکی خارجی

## ۲-۱-۲-۱- خطای اضافه بار

اضافه بار باعث افزایش تلفات مسی در ترانسفورماتور و افزایش درجه حرارت می شود. در نتیجه به مرور زمان، عایق سیم پیچ تخریب می شود و احتمال اتصال زمین افزایش می یابد.

## ۲-۲-۱-۲- خطای اتصال کوتاه

جریان های اتصال کوتاه شدید، تنش مکانیکی شدیدی را در ترانسفورماتور ایجاد می کند که باعث فشرده شدن سیم پیچ می شود. برای جلوگیری از چنین پدیده ای، لازم است که حلقه های متوالی سیم پیچ، توسط قطعات عایقی به یکدیگر ثابت شوند، تا در ضربه های الکترو دینامیکی امکان فشرده شدن طولی سیم پیچ وجود نداشته باشد.

## ۲-۱-۲-۳- خطای حاصل از اضافه ولتاژهای گذرا

اضافه ولتاژهای گذرا، ناشی از کلیدزنی و یا وقوع صاعقه در سیستم قدرت بوده و عواملی جدی برای ایجاد اتصال حلقه در ترانسفورماتور به حساب می آیند، که مورد بحث قرار گرفت.

اضافه ولتاژ، در فرکانس سیستم قدرت نیز به این مفهوم است که مقدار فرکانس سیستم از فرکانس قدرت ( ۵۰HZ ) بیشتر شده و ترانسفورماتور به طور موقت تحت تأثیر این نوع اضافه ولتاژ قرار می گیرد.

عوامل مهم ایجاد اضافه ولتاژها عبارتند از:

- افزایش ولتاژ فازهای سالم سیستم در اتصال کوتاه تکفاز
- افزایش ولتاژ سیستم ناشی از خاصیت خازنی شبکه، در شرایط بی باری و یا کم باری
- قطع ناگهانی بار ترانسفورماتور
- اشکال در کنترل کننده های بار راکتیو در نیروگاه و یا پست

این اضافه ولتاژها بسته به نوع آن ممکن است در زمانی حدود چند ثانیه و یا چند ساعت به ترانسفورماتور اعمال شود. این اضافه ولتاژ می تواند موجب افزایش تنش روی عایق ها و افزایش شار کار هسته شود [۱].

#### ۲-۱-۲-۴- خطای فوق تحریک یا اضافه شار

این خطا در ترانسفورماتور به معنای افزایش شار مغناطیسی هسته از سطح طراحی شده است. این خطا موجب افزایش جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور شده که خود به معنای افزایش درجه حرارت هسته است. در این صورت احتمال خسارت دیدن عایق های هسته زیاد می باشد.

#### ۲-۱-۳- خطاهای غیر الکتریکی

##### ۲-۱-۳-۱- خطای تانک روغن ترانسفورماتور

نشت روغن می تواند به کاهش قدرت عایقی سیم پیچ ها منجر شده و کمبود روغن خنک کن موجب افزایش درجه حرارت در شرایط بار شود. همچنین رسوب لجن روغن در لوله ها و مجراهای ارتباطی سیستم خنک کننده منجر به کاهش تبادل حرارتی بین هسته و روغن و همچنین سیم مسی و روغن می شود، که باعث بروز خسارت در ترانسفورماتور می شود. از طرف دیگر جذب رطوبت و کاهش قدرت عایقی روغن نیز باید مورد توجه قرار گیرد. خرابی پمپ روغن و یا فن های سیستم خنک کننده نیز می تواند، باعث افزایش دما و بروز خسارت جدی در ترانسفورماتور می شود.

##### ۲-۱-۳-۲- اشکالات سیستم تنظیم کننده ولتاژ

- اشکالات الکتریکی سیستم تنظیم کننده ولتاژ : امکان وقوع اتصال حلقه در مکانیزم سیستم تنظیم کننده ولتاژ وجود دارد.

- اشکالات مکانیکی سیستم تنظیم کننده ولتاژ : شامل معیوب بودن قسمت های مکانیکی و متحرک آن است که باعث اختلال در عملکرد آن می گردد.

## ۲-۲- حفاظت های ترانسفورماتور قدرت

در این قسمت حفاظت های معمول مورد استفاده در ترانسفورماتور بیان می گردد. همچنین حفاظت دیفرانسیل که موضوع مورد بحث در این پایان نامه است و دلایل عملکرد نادرست آن مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۲-۲-۱- رله اتصال زمین محدود

حفاظت اتصال زمین محدود در سیم پیچ مثلث با موازی کردن سه ترانسفورماتور جریان روی فازهای خط برای اندازه گیری جریان توالی صفر به کار می رود. در صورتی که ترانسفورماتور زمین، با اتصال زیگزاگ در سمت ترانسفورماتور مورد حفاظت تعبیه شده باشد، ترانسفورماتورهای جریان خط به ترانسفورماتور جریان نوترال متصل شود. در سیم پیچ ستاره ترانسفورماتور، از روش موازی کردن ترانسفورماتورهای جریان خط با ترانسفورماتور جریان نوترال استفاده می شود [۱].

### ۲-۲-۲- حفاظت اضافه جریان

#### ۲-۲-۲-۱- فیوزها

ترانسفورماتورهای توزیع کوچک، که فاقد کلید قدرت در سمت اولیه می باشند، با فیوز محافظت می شوند. این فیوزها یک حفاظت اضافه جریان هستند، که با دارا بودن مشخصه زمان معکوس در شرایط خطا به سوختن فیوز و قطع فاز معیوب منجر می شوند. جریان نامی فیوز به طور معمول نسبت به جریان اسمی ترانسفورماتور بالاتر انتخاب می شود، تا از عملکرد فیوز در زمان اضافه بارهای گذرای ناشی از راه اندازی موتورها و همچنین جریان هجومی وصل ترانسفورماتور جلوگیری شود.

#### ۲-۲-۲-۲- رله های اضافه جریان

ترانسفورماتورهای توزیع تغذیه از یکسو، که دارای کلید قدرت در سمت اولیه و ثانویه هستند را می توان با رله های جریان زیاد محافظت نمود. با استفاده از رله های جریان زیاد زمان معکوس، از تأخیر در قطع بیش از اندازه فیوزهای فشار قوی برای جریان اتصال کوتاه کم جلوگیری می شود. این رله،

حفاظت اضافه بار را برای ترانسفورماتورهای کوچک انجام می دهد. از سوی دیگر با اضافه کردن واحد آبی به رله جریان زیاد، امکان قطع سریع جریان های اتصال کوتاه زیاد فراهم می شود.

### ۲-۲-۳- حفاظت اضافه شار

شرایط اضافه شار در وضعیت بهره برداری غیر عادی بروز می کند. برای این شرایط قطع آبی ضرورتی ندارد، زیرا ممکن است عامل آن اختلالات گذرای سیستم باشد. بنابراین زمان قطع ۱ تا ۲ دقیقه ای برای این خطا مناسب است. رله اضافه شار بر مبنای سنجش ولتاژ به فرکانس عمل می کند [۱].

### ۲-۲-۴- حفاظت درجه حرارت سیم پیچ ترانسفورماتور

قدرت اسمی ترانسفورماتورهای قدرت بر مبنای حداکثر درجه حرارت مجاز محیط بیان می شود. سیم پیچ ها نباید از حد مجاز گرمتر شوند. حفاظت در برابر افزایش درجه حرارت، باید بر مبنای اندازه گیری درجه حرارت سیم پیچ در شرایط واقعی روغن ترانسفورماتور انجام شود.

### ۲-۲-۵- حفاظت اتصال زمین مخزن ترانسفورماتور

در شرایطی که اولیه یک ترانسفورماتور جریان از هادی اتصال زمین تغذیه، و ثانویه آن به یک رله جریانی متصل گردد، در واقع حفاظت اتصال زمین ترانسفورماتور فراهم شده است. از این رله به عنوان حفاظت پشتیبان رله اتصال زمین محدود، می توان استفاده کرد.

### ۲-۲-۶- حفاظت روغن ترانسفورماتور

تمام اشکالات داخلی ترانسفورماتور به تجزیه و شکست عایقی روغن منجر می شود. از تجزیه روغن گازهایی مانند هیدروژن، مونواکسید کربن و هیدروکربن های سبک آزاد می شوند. برای این حفاظت از رله بوخهلتنس استفاده می شود. رله بوخهلتنس شامل محفظه ای است که در مسیر لوله رابط مخزن اصلی، به مخزن انبساط نصب شده است. این رله دارای دو شناور است و به هر شناور یک کلید جیوه-ای متصل شده است. در خطاهای سبک روغن به آرامی تجزیه شده و گازهای حاصله به سمت مخزن انبساط حرکت می کنند و در سر راه وارد محفظه رله شده و قسمت بالایی آن پر از گاز می شود.



شناور بالایی، با جمع شدن گاز، به علت افزایش وزنی که پیدا می کند پایین آمده و با بسته شدن کلید جیوه ای فرمان آلارم صادر می شود.

هنگامی که یک اتصال کوتاه سنگین داخلی رخ دهد، در اثر قوس الکتریکی مقدار زیادی گاز تولید شده و منجر به افزایش فشار در داخل مخزن اصلی می شود. در اثر این فشار مخلوطی از روغن و گازهای تجزیه شده به سمت مخزن انبساط حرکت کرده و در مسیر خود در محفظه رله بوخهلتس با یک صفحه فلزی قابل انعطاف که به گوی شناور در پایین متصل شده است، مواجه می شود. در اثر سرعت حرکت روغن، گوی شناور به سمت پایین حرکت کرده و با بسته شدن کنتاکت جیوه ای فرمان قطع صادر می شود.

#### ۲-۲-۷- حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت

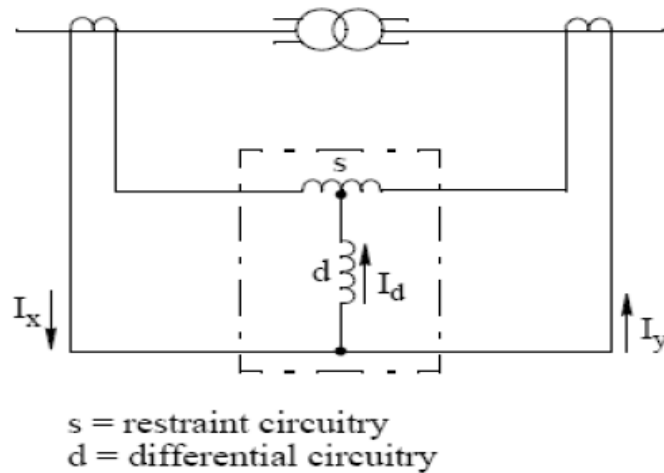
حفاظت دیفرانسیل بر این حقیقت استوار است که هر خطایی که در تجهیزات الکتریکی رخ دهد، موجب می شود تا جریانی که وارد آن شود که با جریان خارج شونده از آن متفاوت می باشد. بنابراین می توان دو جریان را از نظر اندازه، زاویه و یا هر دو مورد مقایسه قرار داده و در صورت وجود اختلاف، آن گاه در خروجی خطا صادر شود [۲].

در حالت عملکرد عادی ترانسفورماتور، جریان تفاضلی قابل توجهی وجود ندارد ولی در هنگام وقوع خطای داخلی ترانسفورماتور، جریان تفاضلی افزایش می یابد. لذا افزایش جریان تفاضلی می تواند به عنوان نشانه وقوع خطای داخلی استفاده شود. اما از آنجایی که در حالت های غیر خطا نیز امکان ایجاد جریان تفاضلی قابل توجه وجود دارد، لازم است تا پدیده های غیر خطا از خطای داخلی تمایز داده شوند.

در رله دیفرانسیل دو کمیت اندازه گیری می شود .

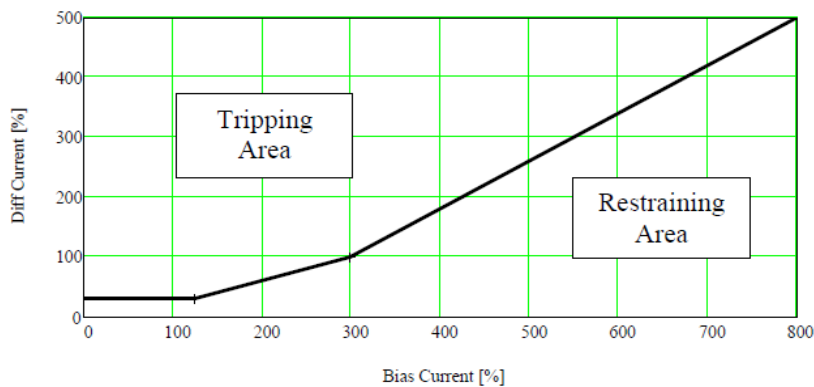
- جریان پایدار ساز<sup>۱</sup> (گاهی جریان پایه یا محدود کننده نامیده می شود): که از طریق مدار محدود کننده S نشان داده شده در شکل (۵-۲) جاری می شود.

- جریان تفاضلی<sup>۲</sup> (جریان  $I_d$  نشان داده شده در شکل (۵-۲)).



شکل (۵-۲) اتصال اصلی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت [۲]

دامنه این دو کمیت معمولاً به منظور تعیین اینکه رله باید عمل کند، و یا عملکرد آن محدود شود، به کار می رود. مشخصه تریپ یک رله تفاضلی نمونه در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.

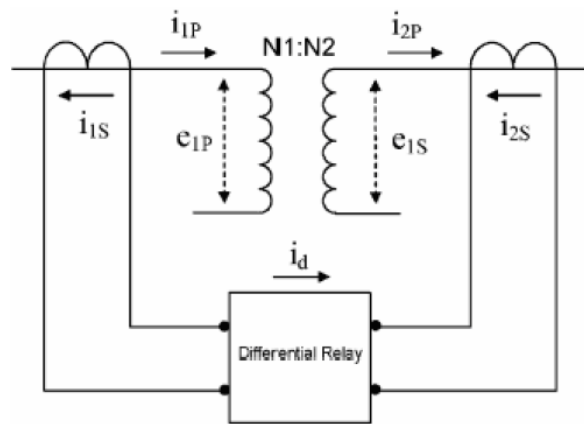


شکل (۶-۲) مشخصه تریپ یک رله دیفرانسیل نمونه [۲]

<sup>۱</sup>Stabilizing Current  
<sup>۲</sup>Differential Current

طبق شکل (۲-۶) در صورتی که ناحیه کار ترانسفورماتور، (با توجه به جریان های محدود کننده و تفاضلی) در بالای مشخصه عملکرد رله قرار بگیرد، رله عمل خواهد نمود و در صورتی که این مشخصه وارد ناحیه پایین شود از عملکرد رله جلوگیری خواهد شد.

روابط مختلفی برای محاسبه جریان های تفاضلی و محدود کننده وجود دارد که به عنوان مثال یکی از آنها با توجه به شکل (۲-۷)، به صورت زیر است.



شکل (۲-۷) حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور تکفاز [۲]

$$i_d = i_{1s} - i_{2s} \quad (۲-۵)$$

$$i_r = \frac{i_{1s} + i_{2s}}{۲} \quad (۲-۶)$$

در این روابط  $i_{1s}$  و  $i_{2s}$  جریان های اولیه و ثانویه سیم پیچ ترانسفورماتور،  $i_d$  جریان تفاضلی و  $i_r$  جریان بازدارنده (پایدارساز) است.

از آنجائیکه در عمل ترانسفورماتورهای جریان از میان ترانسفورماتورهای موجود، انتخاب می شوند، دسترسی به هر نسبت دلخواه ممکن نیست و جریان مغناطیس کنندگی نیز همواره وجود دارد. لذا برای یک ترانسفورماتور در حالت عادی جریان تفاضلی ممکن است مخالف صفر باشد. در رله های دیفرانسیل درصدی به جای مقایسه جریان تفاضلی با عدد صفر، این جریان با کسری از جریان باز دارنده مقایسه می گردد. لذا شرط عملکرد رله به صورت زیر بدست می آید.

$$i_d \geq k.i_r \quad (۲-۷)$$

که در آن  $k$  یک عدد ثابت است که با توجه به مشخصات ترانسفورماتور تعیین می گردد. معمولاً مقدار  $k$  طوری تعیین می گردد که از عملکرد رله، در حضور جریان بی باری ترانسفورماتور جلوگیری شود.

رله های دیفرانسیل اصولاً به عنوان حفاظت اولیه برای تمام المان های سیستم قدرت نظیر ژنراتورها، ترانسفورماتورها، باس ها، کابل ها، خطوط هوایی کوتاه به کار می روند. ناحیه حفاظتی ترانسفورماتور قدرت شامل نواحی بین ترانسفورماتورهای اندازه گیری جریان در دو طرف ترانسفورماتور قدرت می باشد. رله دیفرانسیل باید برای خطای مطلق داخلی فرمان قطع آنی را صادر نماید.

حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورها کاملاً ویژه است چون باید بر مدل غیر خطی ترانسفورماتور، غلبه کند که این امر معمولاً توسط ویژگی های بلوکه کردن - مهار کننده هارمونیک های دوم و پنجم بدست می آید که معمولاً در تمام رله های دیفرانسیل قدرت یافت می شود [۲].

به طور کلی عملکرد حفاظت دیجیتال رله دیفرانسیل به این صورت که ابتدا سیگنال های مناسبی از سیستم مورد بحث فراهم می گردد. این سیگنال ها که معمولاً جریان یا ولتاژ می باشند. به صورت دیجیتال درآمده و به واحد پردازش اعمال می شود و با توجه به الگوریتم بکار برده شده، خروجی رله تعیین می شود.

## ۲-۷-۱- حفاظت دیفرانسیل برای ترانسفورماتورهای قدرت معمول

حفاظت دیفرانسیل جریانی، برای ترانسفورماتورهای قدرت، برای ده ها سال است که استفاده شده است. این حفاظت بر اساس برابری آمپر دور متعادل شده تمام سیم پیچ های سوار شده روی پایه هسته مغناطیسی ترانسفورماتور است [۲، ۳].

به منظور استفاده صحیح از رله دیفرانسیل ترانسفورماتور جبران موارد زیر ضروری است.

- اختلاف دامنه جریان در دو طرف ترانسفورماتور حفاظت شده ( جبران سازی دامنه جریان)

- جبران سازی زاویه شیفت فاز ترانسفورماتور قدرت

- حذف جریان توالی صفر

## ۲-۲-۷-۲- رله های دیفرانسیل استاتیکی

با رله های دیفرانسیل استاتیکی (یا حتی الکترومکانیکی) چنین جبران سازی هایی با استفاده از وارد کردن ترانسفورماتورهای جریان<sup>۱</sup> (CT) با اتصال خاص انجام می شود ( معمولاً اتصال CT ها به صورت دلتا است) [۲، ۳].

مشخصه های معروف برای رله های دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت استاتیکی یا الکترومکانیکی که برای طراحی رله دیفرانسیل مورد استفاده قرار می گیرند، به صورت زیر هستند :

- انتخاب صحیح مقدار نامی<sup>۲</sup> CT های وارد شده، امکان جبران سازی اختلاف دامنه های جریان روی دو طرف ترانسفورماتور حفاظت شده را ایجاد می کند.

- انتخاب صحیح اتصالات سیم پیچی CT های وارد شده امکان جبران سازی زوایه شیفت فاز ترانسفورماتور قدرت را فراهم می کند.

- استفاده از اتصالات خاص CT های وارد شده، امکان خارج کردن جریان توالی صفر را از هر دو طرف ترانسفورماتور قدرت فراهم می سازد.

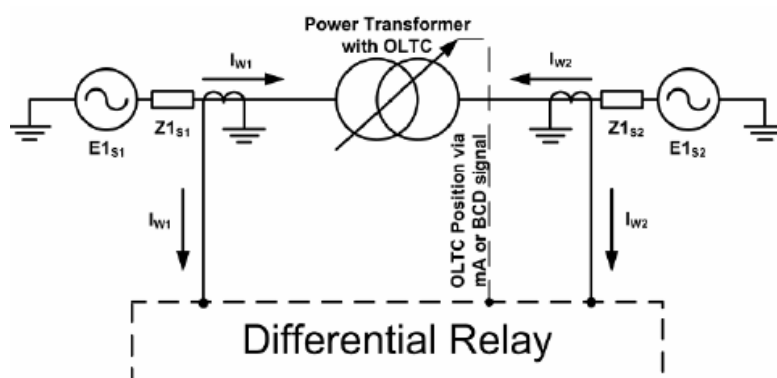
ماکزیمم توان نامی ظاهری ترانسفورماتور قدرت برای محاسبه مقادیر نامی CT ها استفاده می شود. اگرچه استفاده از CT های با اتصالات خاص، فقط می تواند برای موقعیت میانی تپ چنجر زیر بار انجام گیرد. بنابراین به محض اینکه تپ چنجر از موقعیت میانی خارج شود، جریان های تفاضلی اشتباه وارد می شوند. به علاوه باید توجه شود که محاسبه نسبت تبدیل CT ها، بنا به کاربرد خاص و بر اساس توان نامی تمام سیم پیچ های ترانسفورماتور قدرت، صورت می گیرد.

<sup>۱</sup>Current Transformer  
<sup>۲</sup>Rating

## ۲-۷-۳- رله های دیفرانسیل عددی

اولین مقالات درباره حفاظت دیفرانسیل بر اساس میکروپروسسور در اوایل دهه ۸۰ منتشر شد. با این رله های دیفرانسیل مدرن، نیازی به استفاده از CT هایی با اتصالات خاص نیست، چون نرم افزار رله قادر است موارد زیر را فراهم کند [۲].

- جبران سازی اختلاف دامنه جریان روی دو طرف ترانسفورماتور حفاظت شده
  - جبران سازی زاویه شیفت فاز استاندارد ترانسفورماتور قدرت (به صورت مضربی از ۳۰ درجه)
  - استفاده از تمام CT های اولیه متصل شده به صورت ستاره و خروج جریان های توالی صفر از هر طرف ترانسفورماتور محافظت شده با تنظیم پارامترها
- علاوه بر آن در محاسبه جریان های تفاضلی امکان نظارت در حین کار<sup>۱</sup> ترانسفورماتور، برای تعیین موقعیت تپ چنجر و جبران اتوماتیک برای آن وجود دارد. بنابراین رله دیفرانسیل عددی می تواند به طور ایده آل و بدون در نظر گرفتن موقعیت واقعی تپ چنجر متعادل شود. یک طرح حفاظت دیفرانسیل عددی نمونه در شکل (۲-۸) نشان داده شده است.



شکل (۲-۸) اتصال رله دیفرانسیل عددی [۲]

### ۲-۷-۴- عوامل تأثیر گذار در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت

سیستم حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور باید خطای داخلی را سریعاً تشخیص داده و فرمان قطع ترانسفورماتور خطادار را صادر نماید. ولی در حالت خطای خارج از ناحیه، جریان های هجومی و حالت فوق تحریک باید پایدار مانده و مانع قطع ترانسفورماتور گردد. بنابراین بررسی خطاهای ایجاد شده توسط ترانسفورماتور از نقطه نظر کاربرد رله دیفرانسیل ضرورت دارد و برای پایدار کردن رله دیفرانسیل در برابر اینگونه خطاها باید تمهیدات لازم در نظر گرفته شود. این خطاها به صورت موارد زیر است.

### ۲-۷-۴-۱- خطای جریان هجومی وصل ترانسفورماتور

پایدار کردن رله دیفرانسیل در برابر این جریان ضروری است. به نحوی که از عملکرد غلط رله در هنگام کلیدزنی ترانسفورماتور جلوگیری شود. از سوی دیگر دامنه زیاد جریان هجومی وصل، مشابه شرایط اتصال کوتاه داخلی سنگین است. پس تفکیک و شناخت جریان هجومی وصل، نسبت به جریان اتصال کوتاه داخلی ضروری می باشد.

طبق بررسی های انجام شده، در جدول (۲-۱) تجزیه و تفکیک هارمونیک های موج اصلی و مؤلفه DC در شرایط جریان هجومی وصل و جریان اتصال کوتاه داخلی آورده شده است [۱].

جدول (۲-۱) مقدار نسبی هارمونیک ها در حالت جریان هجومی و جریان خطای داخلی [۱]

جریان اتصال کوتاه داخلی		جریان هجومی وصل			اجزا
CT اشباع نشده	CT اشباع شده	سیکل سوم	سیکل دوم	سیکل اول	
۰	۳۸	۵۳	۵۸	۵۸	مؤلفه DC
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	موج اصلی
۴	۹	۶۵	۶۳	۶۲	هارمونیک دوم
۳۲	۴	۳۰	۲۸	۲۵	هارمونیک سوم
۹	۷	۷	۵	۴	هارمونیک چهارم
۲	۴	۲	۳	۲	هارمونیک پنجم

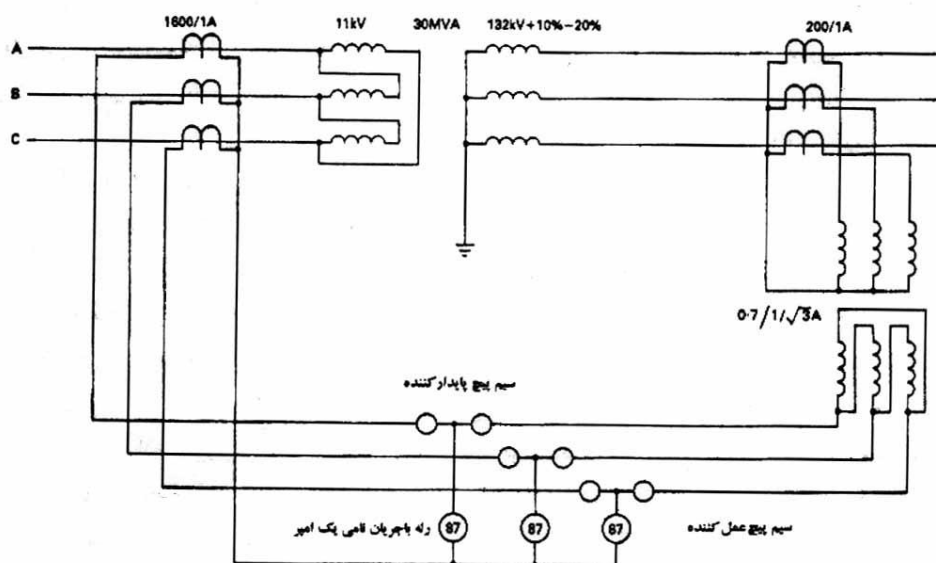
همانگونه که در این جدول دیده می شود، مقدار مؤلفه هارمونیک دوم در سیکل اول تا سوم جریان هجومی دارای بیشترین دامنه، نسبت به سایر هارمونیک های آن می باشد. از طرف دیگر مقدار

هارمونیک دوم جریان اتصال کوتاه داخلی در شرایط اشباع و یا عدم اشباع CT دارای اختلاف زیادی با مقدار متناظر آن در جریان هجومی است. از آنجائیکه این اختلاف دامنه برای هارمونیک دوم بیشتر از سایر مؤلفه های هارمونیک می باشد، بنابراین این مؤلفه نسبت به مؤلفه DC و یا هارمونیک های سوم به بالا، برای پایدار کردن رله دیفرانسیل در شرایط جریان هجومی وصل ترجیح داده می شود. بنابراین با استفاده از یک فیلتر هارمونیک دوم می توان رله دیفرانسیل را در شرایط جریان هجومی وصل پایدار کرد.

#### ۲-۲-۷-۴-۲- خطای نسبت تبدیل و خطای گروه برداری

در ترانسفورماتور قدرت سه فاز، به دلیل عملکرد تپ چنجر امکان بروز خطای نسبت تبدیل و گروه برداری وجود دارد. بنابراین برای جبران خطای گروه برداری و نسبت تبدیل، باید از یک ترانسفورماتور جریان کمکی استفاده کرد. همانگونه که در شکل (۲-۹) نشان داده شده است، گروه برداری این ترانسفورماتور مشابه گروه برداری ترانسفورماتور قدرت بوده که خطای زاویه را از بین می برد و با انتخاب تعداد مناسب حلقه های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور جریان کمکی، نیز خطای نسبت تبدیل را می توان جبران کرد [۲]. در مثال زیر نحوه انتخاب مناسب تعداد حلقه های اولیه و ثانویه برای ترانسفورماتور جریان کمکی توضیح داده می شود.





شکل (۹-۲) حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت با استفاده از CT های وارد شده [۱]

در این شکل ترانسفورماتور قدرت  $132/11KV$  و  $30MVA$  و با اتصال مثلث-ستاره در نظر گرفته شده است.

$$I_1 = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 11 \times 10^3} = 1575 A \quad (8-2)$$

$$I_r = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 132 \times 10^3} = 164 A \quad (9-2)$$

$I_1$  و  $I_2$  جریان های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور هستند. برای سیم پیچ  $11KV$ ، جریان نامی  $1575A$  است، ولی در سیم پیچ  $132KV$  در صورتی که مقدار تنظیمی ولتاژ توسط دستگاه تنظیم کننده، روی مقدرای  $0.5\%$  قرار گیرد، جریان آن برابر خواهد بود با:

$$I_r = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 0.95 \times 132 \times 10^3} = 138 A \quad (10-2)$$

اگر ترانسفورماتور جریان سمت  $11KV$  را  $1600/1A$  و سمت  $132KV$  را  $200/1A$  انتخاب کنیم، جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان سمت  $11KV$  برابر است با:

$$I_r = \frac{1575}{1600} \times 1 = 0.984 A \quad (11-2)$$

جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان سمت  $132KV$ ، با مقدار تنظیم  $0.5\%$ ، برابر است با:

$$I_T = \frac{138}{160} \times 1 = 0.69 A \quad (12-2)$$

بنابراین نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان کمکی با گروه اتصال ستاره- مثلث برابر مقدار زیر خواهد بود.

$$\frac{0.69}{\frac{0.984}{\sqrt{3}}} = \frac{0.7}{\frac{1}{\sqrt{3}}} = 0.7 / 0.577 \quad (13-2)$$

### ۲-۲-۷-۴-۳- خطای اضافه تحریک در ترانسفورماتورهای قدرت

ترانسفورماتورهای قدرت معمولاً در نقطه زانویی منحنی مغناطیس شونده هستند، کار می کنند و در هنگام بی باری جریان تحریکی در اولیه آنها جاری می شود که در حدود ۱ تا ۵ درصد جریان نامی آنها است. وقتی که قسمت بزرگی از بار سیستم قدرت ناگهان برداشته شود، ولتاژ در ترمینال های ورودی ترانسفورماتور ممکن است از ۱۰ تا ۲۰ درصد مقدار نامی تجاوز کند. افزایش ولتاژ تحریک باعث جابجایی نقطه کار از نقطه زانویی منحنی شده و نقطه کار را به طرف ناحیه اشباع جابه جا می کند، که در این حالت جریان تحریک با افزایش خطی ولتاژ اولیه، به طور غیر خطی افزایش یافته و سبب ایجاد جریان تفاضلی در رله دیفرانسیل می شود که دامنه آن می تواند در حد تحریک شدن رله باشد [۱].

البته اضافه تحریک ترانسفورماتور می تواند عامل دیگری داشته باشد و آن کاهش فرکانس سیستم

قدرت است. طبق رابطه  $\phi = \frac{K.E}{F}$  ( $\phi$  شار مغناطیسی،  $E$  ولتاژ،  $F$  فرکانس سیستم و  $K$  عدد

ثابت است)، دیده می شود که شار تولیدی در ترانسفورماتور علاوه بر وابستگی به ولتاژ، به فرکانس

سیستم نیز وابسته است و کاهش فرکانس باعث افزایش شار شده و به دنبال آن جریان مغناطیس

کنندگی افزایش می یابد. که این امر اضافه تحریک ترانسفورماتور را به دنبال دارد [۲].

جریان مغناطیس کنندگی دارای هارمونیک پنجم زیادی نسبت به مؤلفه اصلی جریان و متناسب با میزان اضافه ولتاژ است. بنابراین در حفاظت های مدرن دیفرانسیل ترانسفورماتور، از مؤلفه هارمونیک پنجم برای پایدار کردن رله در شرایط اضافه شار استفاده می کنند [۲].

#### ۲-۲-۷-۴-۴- خطای جریان بی باری ترانسفورماتور

خطای جریان بی باری ترانسفورماتور، به دلیل عبور جریان مغناطیس کننده می باشد. این جریان که در ترانسفورماتورهای جدید کمتر از نیم درصد است، در صورت حساسیت زیاد رله دیفرانسیل می تواند به تحریک آن منجر شود. بنابراین در تنظیم رله این مقدار باید در نظر گرفته شود.

#### ۲-۲-۷-۴-۵- خطای اشباع ترانسفورماتورهای جریان

سیستم های قدرت الکتریکی تحت اغتشاشات زیادی هستند که از حالات گذرای ناشی از صاعقه، خطاها یا عملکردهای عادی سیستم از قبیل برقرار کردن یا بی برق کردن، باز و بسته شدن یک کلید و ... نتیجه می شوند. وقتی که تغییر ناگهانی در ولتاژ سیستم اتفاق می افتد، از قبیل یک خطا در سیستم، توزیع مجددی از انرژی الکترومغناطیسی ذخیره شده در المان های خازنی یا سلفی شبکه اتفاق می افتد که به خاطر دینامیک سیستم قدرت این توزیع مجدد انرژی نمی تواند به طور آنی انجام شود و لذا سیستم قدرت قبل از آنکه وارد حالت ماندگار جدید شود، یک دوره حالت گذرا را طی خواهد کرد.

در طی چند سیکل اولیه از شروع خطای سیستم قدرت، از رله های حفاظتی با سرعت بالا انتظار می رود که با تصمیم گیری سریع، وجود و مکان خطا را تشخیص داده تا از ناپایداری سیستم قدرت و آسیب به تجهیزات جلوگیری شود. اکثر رله های حفاظتی مبنای تصمیم گیری شان بر پایه فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز است. در این مورد واضح است که سیگنال های جریان و ولتاژ به شدت توسط حالت گذرای القا شده مخدوش می شوند، که ناشی از مؤلفه DC میرا شونده نمایی و فرکانس های بالا یا پایین سیستم قدرت است. رفتار دینامیکی رله های حفاظتی با سرعت بالا به طور وسیعی به

سیگنال های تولید شده توسط ترانسفورماتورهای اندازه گیری وابسته است و این سیگنال ها وابسته به پاسخ گذرای کلی ترانسفورماتورهای اندازه گیری و نوع حالت گذرای تولید شده توسط سیستم قدرت هستند.

رفتار گذرای یک CT توسط عوامل مختلفی تحت تاثیر قرار می گیرد، که قابل توجه ترین آنها، مؤلفه نمایی DC میرا شونده جریان اولیه است که وجود آن، شار هسته را افزایش داده و امکان دارد باعث اشباع و در نتیجه خطاهای اساسی از نظر اندازه و زاویه فاز در سیگنال های تولید شده شود. شار هسته شامل یک مؤلفه متناوب و یک مؤلفه DC است که ناشی از مؤلفه های AC و DC جریان خطای اولیه است. نوسان شار گذرای تولید شده توسط مؤلفه DC جریان خطای اولیه، می تواند در مقایسه با آنچه که توسط مؤلفه AC تولید شده است، کاملاً بزرگتر باشد. همچنین CT می تواند به واسطه داشتن پس ماند به افزایش شار هسته کمک یا با آن مخالفت کند.

از آنجائیکه CT های به کار رفته در حفاظت دیفرانسیل ممکن است دارای منحنی کاملاً یکسانی نباشند، ممکن است یکی از CT ها به اشباع رفته و دیگری در ناحیه خطی عمل نماید. با توجه به اینکه در خروجی CT اشباع شده جریان ناچیزی عبور می کند، لذا جریان تفاضلی افزایش یافته و باعث عملکرد نادرست رله دیفرانسیل می گردد.

جهت مطالعه تاثیر اشباع CT ها در عملکرد رله های دیفرانسیل بررسی دقیق شکل موج جریان تفاضلی و هارمونیک های آن در هنگام اشباع CT مورد نیاز است.

## ۲-۲-۷-۴-۶- خطای دستگاه تنظیم کننده ولتاژ

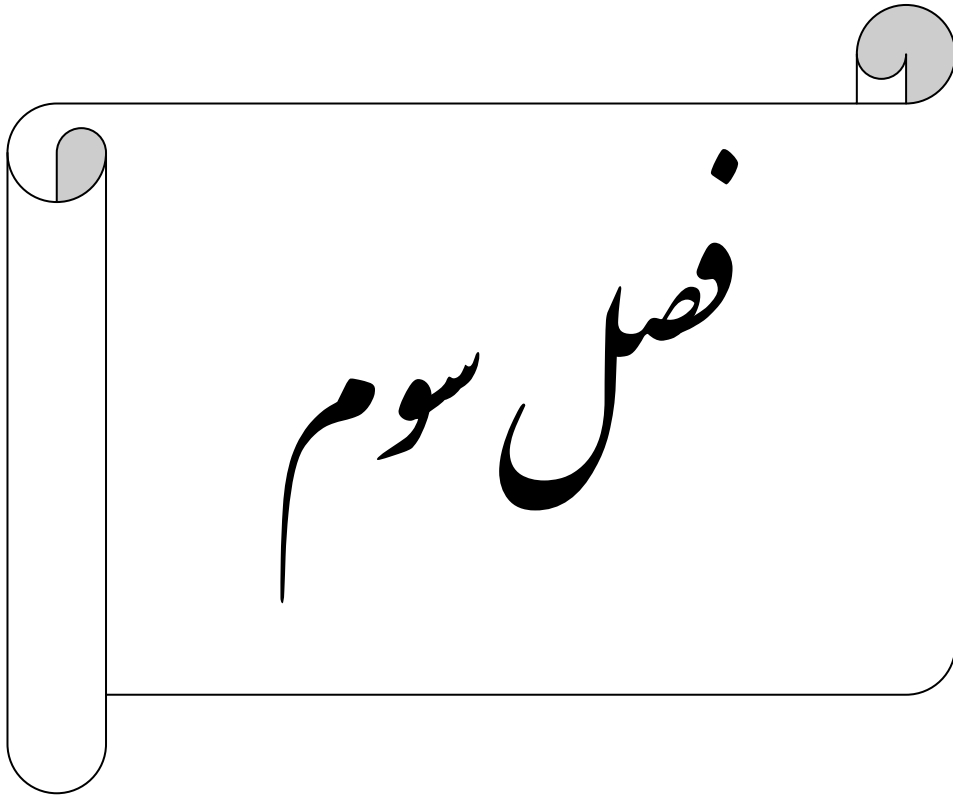
دستگاه های تنظیم ولتاژ، با تغییر تعداد حلقه های سیم پیچ سمت فشارقوی ترانسفورماتور نسبت تبدیل را تغییر می دهند. بنابراین نسبت جریان های اولیه و ثانویه نیز به هم می خورد. برای کاهش اثر دستگاه تنظیم کننده ولتاژ از ترانسفورماتورهای جریان کمکی استفاده می شود. همچنین برای تعیین نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان کمکی، از حد میانی دستگاه تنظیم کننده ولتاژ استفاده می

---

شود. بنابراین ضروری است که در مقدار تنظیمی رله دیفرانسیل ترانسفورماتور، خطای دستگاه تنظیم ولتاژ در نظر گرفته شود.

### ۲-۳- جمع بندی

در این فصل خطاهای ترانسفورماتور قدرت و حفاظت‌های مورد استفاده برای آن به طور مختصر بیان شد. همچنین حفاظت دیفرانسیل و عوامل عملکرد نادرست آن مورد بررسی قرار گرفت. از آنجائیکه این پایان نامه در رابطه با روش تشخیص جریان هجومی در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور است، نحوه ایجاد جریان هجومی و روابط حاکم بر آن در فصل بعد مطرح می‌گردد.



جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت

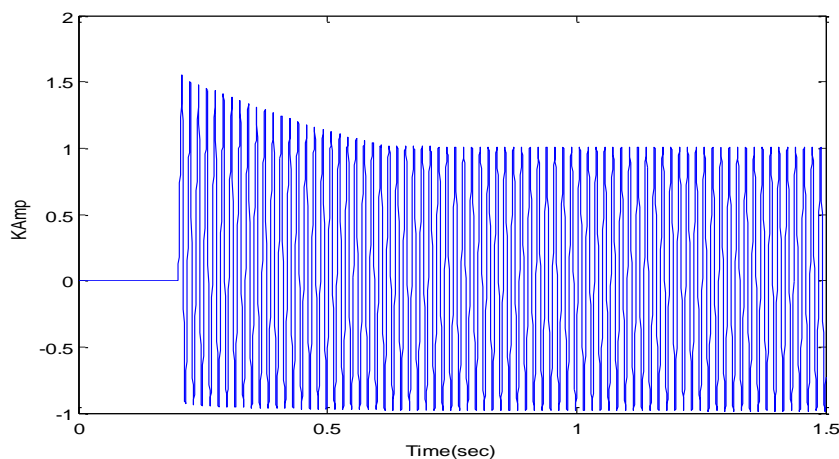
## ۳-۱- مقدمه

وقتی که سلفی توسط ولتاژ متناوب برقرار شود، شار در برگیرنده مدار القائی از حداکثر مقدار منفی تا حداکثر مقدار مثبت آن، در طی یک نیم سیکل موج ولتاژ، تغییر می کند. تغییرات شار به میزان دو برابر حداکثر مقدار شار، متناسب با انتگرال زمانی موج ولتاژ بین نقاط صفر متوالی است. در هر لحظه کلید زنی در نقطه صفر موج ولتاژ چنانچه شار باقیمانده ای در درون هسته نباشد، شار به وجود آمده تقریباً تا دو برابر مقدار نرمال افزایش می یابد.

چنانچه رفتار سلف در برابر افزایش شار خطی باشد، مثل یک سلف هسته هوایی، جریان حاصله تقریباً دو برابر مقدار نرمال خواهد بود.

سیم پیچ اولیه یک ترانسفورماتور یک سلف با هسته آهنی است که حداکثر شار عادی آن نزدیک مقدار اشباع است. افزایش شار تا دو برابر مقدار نامی، مقدار زیادی خواهد بود و لذا جریان مغناطیس کنندگی به مقدار زیادی افزایش یافته که می تواند از مقدار آن در بار کامل نامی تجاوز کند، که به آن جریان هجومی<sup>۱</sup> گفته می شود [۴].

شکل (۳-۱) یک نمونه جریان هجومی سه فاز را برای یک ترانسفورماتور سه فاز  $500/230\text{KV}$  و  $450\text{MVA}$  نشان می دهد.



شکل (۳-۱) جریان هجومی سه فاز

<sup>۱</sup>Inrush Current

شار پس ماند در ترانسفورماتور می تواند جریان را بیشتر افزایش دهد. چنانچه شار پس ماند به جای آنکه صفر باشد، دارای یک مقدار مثبت اولیه باشد جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور به شدت افزایش می یابد. ثابت زمانی این حالت گذرا به طور نسبی بزرگ است و از  $0/1$  ثانیه برای یک ترانسفورماتور  $100\text{KVA}$  تا مقادیر بالاتر از  $1$  ثانیه برای ترانسفورماتورهای با قدرت بیشتر متغیر است (  $5$  تا  $50$  سیکل ).

مقدار مقاومت بین منبع تا ترانسفورماتور نیز نقش عمده ای در میرایی جریان هجومی دارد. بنابراین ترانسفورماتورهای نزدیک ژنراتور دارای جریان های هجومی طولانی تری هستند، در حالی که در ترانسفورماتورهای دور از ژنراتور به علت زیاد بودن مقاومت بین آنها، جریان هجومی چندانی وجود ندارد.

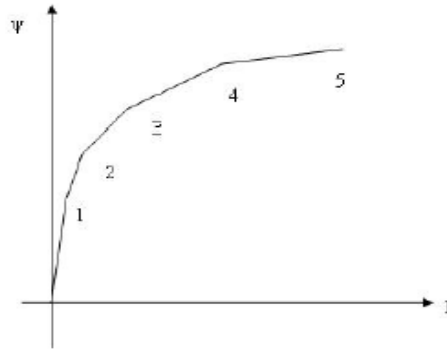
### ۳-۲- روابط حاکم بر جریان هجومی ترانسفورماتور

در این قسمت مدل جریان هجومی ترانسفورماتور تک فاز را مورد بررسی قرار می دهیم [۵، ۶، ۷]. اگر موج ولتاژ سینوسی  $V = V_m \cdot \sin(\omega t + \theta_0)$  در لحظه  $t=0$  به ترانسفورماتور اعمال شود، می توان نوشت [۸] :

$$V = V_m \cdot \sin(\omega t + \theta_0) = R \cdot i + N \cdot \left( \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (1-3)$$

در رابطه فوق  $i$  جریان عبوری از مدار،  $\phi$  فلوی مغناطیسی تولید شده،  $N$  تعداد دور سیم پیچ اولیه،  $R$  مقاومت اهمی مدار سیم پیچ اولیه و  $\theta_0$  زاویه فاز اولیه موج ولتاژ می باشد. شکل (۳-۲) مدل منحنی مغناطیسی یک ترانسفورماتور را نشان می دهد.





شکل (۲-۳) مدل منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور

شیب هر قطعه  $n$  از خط در شکل فوق، که با اعداد ۱ تا ۵ نشان داده شده است، عبارت است از  $(Y)$  شار در برگیرنده، یعنی مجموع شار هسته و سیم پیچ می باشد):

$$L = \frac{\Psi_{n+1} - \Psi_n}{I_{n+1} - I_n} \quad (۲-۳)$$

بنابراین رابطه بین  $\Psi$  و  $i$  در هر ناحیه از منحنی مغناطیسی به صورت زیر به دست می آید:

$$\Psi_t = L.i(t) + A \quad (۳-۳)$$

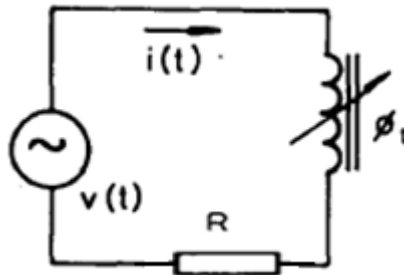
$$\phi(t) = \frac{L}{N}i(t) + B \quad (۴-۳)$$

در این روابط  $A$  و  $B$  جمله هایی هستند که بیانگر غیر خطی بودن روابط (۳-۳) و (۴-۳) هستند.

$$A = \Psi_t - L.i(t) \quad (۵-۳)$$

$$B = \frac{A}{N} \quad (۶-۳)$$

حال با نوشتن معادلات حلقه در شکل (۳-۳) می توان نوشت:



شکل (۳-۳) مدار معادل ترانسفورماتور تک فاز بدون بار

$$V(t) = R.i(t) + N \frac{d\phi}{dt} \quad (۷-۳)$$

با جایگذاری مقادیر  $V(t)$  و  $\phi(t)$  داریم :

$$V_m \cdot \sin(\omega t + \theta) = R \frac{N}{L} \phi - R \frac{N}{L} B - N \frac{d\phi}{dt} \quad (۸-۳)$$

با فرض ثابت بودن  $L$  در هر قطعه از مدل فوق، پاسخ معادله دیفرانسیلی بالا عبارت است از ( $L$ ) اندوکتانس سیم پیچ،  $\phi_m$  ماکزیمم شار و  $t$  ثابت زمانی مدار است) :

$$\phi(t) = \phi_m \cdot \sin(\omega t + \theta - \varphi) - \phi_m \cdot \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + B \quad (۹-۳)$$

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \\ \phi_m = \frac{V_m \cdot L}{N \sqrt{R^2 - (\omega L)^2}} \\ \tau = \frac{L}{R} \end{cases} \quad (۱۰-۳)$$

با توجه به رابطه (۱۰-۳) و مقدار مشخص  $\phi_r$  (شار پس ماند) ، می توان از رابطه شیب مشخصه مقدار  $L$  و سپس جریان هجومی را بدست آورد.

اگر رابطه  $\omega L \gg R$  برقرار باشد، یعنی از مقاومت سیم پیچی صرف نظر کنیم ( $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ).

$$V(t) = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (۱۱-۳)$$

$$V_m \cdot \sin(\omega t + \theta) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (۱۲-۳)$$

$$\phi(t) = \frac{V_m}{N\omega} \cos(\theta) - \frac{V_m}{N\omega} \cos(\omega t + \theta) \quad (۱۳-۳)$$

$$\phi(t) = \phi_s + \phi_t \quad (۱۴-۳)$$

در این رابطه  $\phi_s$  فلوی پایدار و  $\phi_t$  فلوی گذرا است.

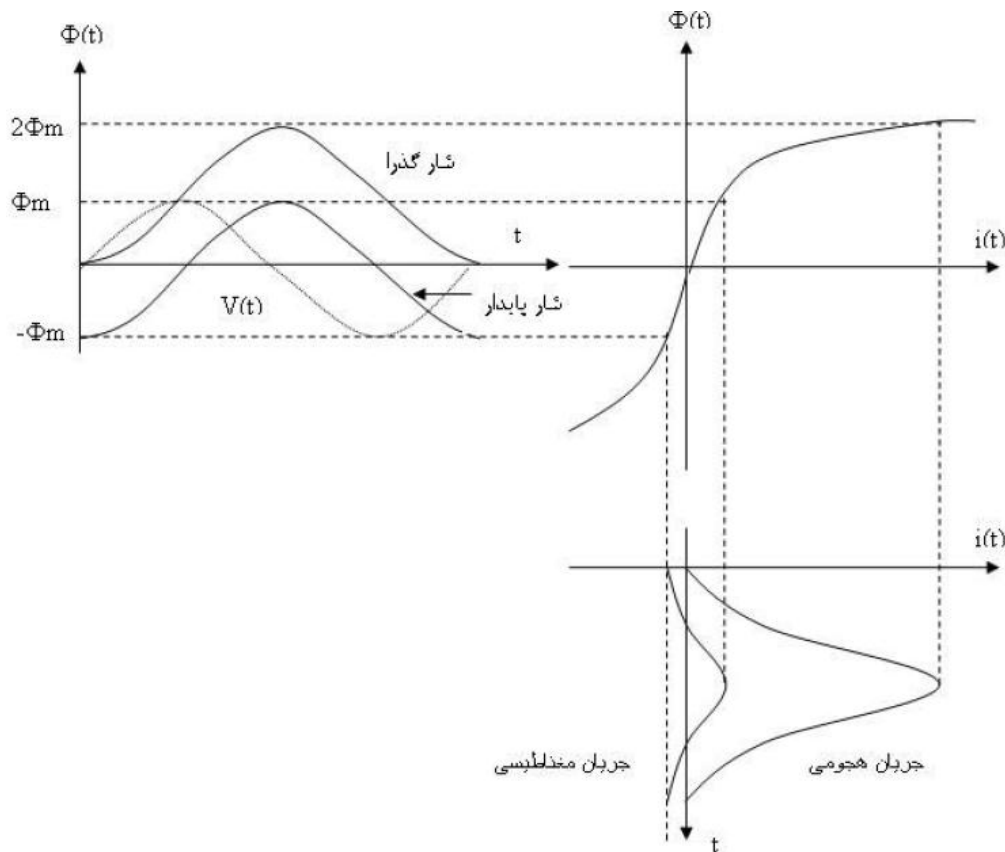
اگر در لحظه  $t = 0$  مقدار فلوی پس ماند  $\phi_r$  را نیز داشته باشیم و  $\phi_m = \frac{V_m}{N\omega}$  ، با اعمال آن به

رابطه (۱۳-۳) داریم :

$$\phi_t = -\phi_m \cdot \cos(\omega t + \theta) + \phi_m \cdot \cos(\theta) + \phi_r \quad (3-15)$$

اگر  $\theta = 0$  باشد، فلوی مغناطیسی در اولین ماکزیمم خود در  $\omega t = p$  می تواند به حدود  $\phi_r + 2\phi_m$  برسد، که این حالت بدترین شرایط است و جریان هجومی به میزان زیادی افزایش می یابد. اگر  $\theta = \frac{\pi}{2}$  باشد، دامنه جریان هجومی به حداقل خود می رسد، در این حالت اگر فلوی پس ماند صفر باشد، باید انتظار داشت که هیچ گونه جریان هجومی به وجود نیاید. در روابط فوق می توان حالات مختلفی را برای فلوی پس ماند و ولتاژ در لحظه کلیدزنی در نظر گرفت.

شکل (۳-۴) نمودارهای این پدیده را نشان می دهد.



شکل (۳-۴) توصیف گرافیکی جریان هجومی [۵]

برای ترانسفورماتور سه فاز نیز می توان روابط مشابهی برای هر کدام از فازها در نظر گرفت. به دلیل ارتباط سه فاز اگر ترانسفورماتور در لحظه ای که یکی از فازها، مثلاً فاز A در ولتاژ صفر است وصل

شود، دو فاز دیگر B و C در لحظه کلیدزنی هر کدام دارای ولتاژی برابر  $0/866$  برابر ولتاژ ماکزیمم، که یکی مثبت و دیگری منفی است، خواهند بود. به طور مشابه اگر ترانسفورماتور قبلاً برقرار شده باشد و دارای فلوی پس ماند در فاز A هسته باشد، آنگاه فلوی پس ماند در دو فاز B و C دارای مقداری به اندازه نصف چگالی فلو در هر فاز و با پلاریته مخالف با فلوی پس ماند در فاز A خواهد بود. بنابراین جریان هجومی در سه فاز برابر نخواهد بود و توسط شرایط فلوها تعیین می گردد.

### ۳-۳-۳- شکل، دامنه و مدت عبور جریان هجومی

حداکثر دامنه جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت بستگی به ساختمان ترانسفورماتور و موقعیت آن در شبکه و شرایط کلید زنی دارد. این مقدار معمولاً حدود ده برابر جریان نامی ظاهر شده است.

حداکثر مدت عبور جریان هجومی تا میرا شدن کامل در ترانسفورماتورهای قدرت مختلف متفاوت می باشند و از حدود ۱۰ پریود تا چند دقیقه طول می کشد. مدت میرایی بستگی به زاویه موج ولتاژ در لحظه وصل ترانسفورماتور، مقدار و پلاریته شار پس ماند، خواص مغناطیسی ترانسفورماتور، فرکانس سیستم، مقاومت الکتریکی و تلفات مدار دارد [۹].

### ۳-۳-۱- اندازه ترانسفورماتور

مقدار پیک جریان هجومی در ترانسفورماتورهای کوچک بیشتر از مقدار متناظر آن در ترانسفورماتورهای بزرگ است [۹].

### ۳-۳-۲- امپدانس شبکه متصل به ترانسفورماتور

اگر ترانسفورماتور به سیستمی وصل شود که امپدانس آن کوچک باشد، آنگاه جریان هجومی بزرگتر خواهد بود. همچنین کل مقاومت دیده شده از منبع معادل تا محل شاخه مغناطیسی شونده در مدار معادل ترانسفورماتور در میرایی جریان هجومی مؤثر است.

## ۳-۳-۳- خواص مغناطیسی ماده هسته ترانسفورماتور

هر قدر که چگالی شار اشباع هسته بیشتر باشد، جریان هجومی ترانسفورماتور بیشتر خواهد بود [۴].

## ۳-۳-۴- مقدار شار پس ماند در هسته

هر چه شار پس ماند در هسته بیشتر باشد، جریان هجومی بیشتر خواهد بود.

## ۳-۳-۵- لحظه برقدار شدن ترانسفورماتور

بیشترین مقدار جریان هجومی زمانی اتفاق می افتد که لحظه عبور از صفر ولتاژ، ترانسفورماتور برقرار شود و علاوه بر آن شار جدید اضافه شده در جهت همان شار قبلی باشد.

## ۳-۳-۶- روش برقدار شدن ترانسفورماتور

مقدار حداکثر جریان هجومی به سطح مقطع بین هسته و سیم پیچ برقرار شونده بستگی دارد. اگر سیم پیچ داخلی که دارای قطر کوچکتری است، ابتدا برقرار شود، جریان هجومی ترانسفورماتور بزرگتر خواهد شد [۲].

## ۳-۴- انواع جریان هجومی ترانسفورماتور

جریان هجومی مغناطیسی شونده در یک ترانسفورماتور می تواند بر اثر هر گونه تغییر ناگهانی در ولتاژ مغناطیس کننده آن به وجود آید که می توان از آن جمله، موارد زیر را نام برد [۲، ۱۰].

- جریان هجومی ناشی از تحریک اولیه<sup>۱</sup> ترانسفورماتور قدرت

- جریان هجومی بازبایی<sup>۲</sup>

- جریان هجومی القایی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> Initial Inrush Current

<sup>۲</sup> Recovery Inrush Current

<sup>۳</sup> Sympathetic Inrush Current

## ۳-۴-۱- جریان هجومی ناشی از تحریک اولیه ترانسفورماتور قدرت

معمولاً بیشترین جریان هجومی به هنگام برقرار شدن ترانسفورماتور پدید می آید. هنگامی که یک ترانسفورماتور بی برق شود ولتاژ مغناطیس کننده از روی آن بر داشته می شود و جریان مغناطیس کننده به صفر می رسد، ولی شار مغناطیسی از حلقه هیستریزیس پیروی می کند. در نتیجه مقداری شار پس ماند در هسته باقی می ماند. وقتی که مجدداً ترانسفورماتور به وسیله یک ولتاژ سینوسی برقرار می شود، شار سینوسی مجدداً در هسته پدید می آید، ولی در این حالت این شار مغناطیسی به شار پس ماند قبلی اضافه می شود.

از آنجا که شار پس ماند می تواند ۸۰ تا ۹۰ درصد شار نامی باشد، ممکن است که پس از برقرار کردن ترانسفورماتور نقطه کار آن به قسمت غیر خطی منحنی مغناطیسی شونده منتقل شود و منجر به ایجاد جریان های مغناطیس شونده با دامنه بزرگ و اعوجاج زیاد گردد [۱۱].

## ۳-۴-۲- جریان هجومی بازیابی

این جریان وقتی به وجود می آید که ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور به علت وقوع خطایی خارج از ترانسفورماتور سقوط می کند. سپس با عملکرد رله و قطع کلید قسمتی که دارای خطا بوده از مدار خارج می شود و یا خطا برطرف می گردد. به دلیل بازگشت ولتاژ نامی به ترمینال های ترانسفورماتور، جریان هجومی بازیابی ایجاد می گردد. در این حالت میزان افزایش ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور درصدی از ولتاژ نامی است. لذا جریان هجومی بازیابی همیشه کمتر از جریان هجومی تحریک اولیه است [۹].

## ۳-۴-۳- جریان هجومی القایی

این جریان هنگامی ایجاد می شود که یک ترانسفورماتور بی برق، با یک ترانسفورماتور برقرار موازی گردد. در این حالت ممکن است ترانسفورماتوری که قبلاً برقرار بوده است دوباره یک جریان هجومی تجربه کند. علت ایجاد این جریان هجومی القایی پیدایش مؤلفه DC جریان هجومی ترانسفورماتوری

که به تازگی برقرار شده است می باشد. زیرا این مولفه DC باعث اشباع ترانسفورماتور برقرار قبلی می گردد. دامنه این جریان هجومی به نسبت امپدانس ترانسفورماتور به امپدانس باقیمانده سیستم وابسته است، که یک مدار موازی اضافی را تشکیل می دهد. این نوع جریان هجومی نیز از مقدار جریان هجومی هنگام برقرار شدن ترانسفورماتور کمتر است [۱۰].

### ۳-۵- کاهش جریان هجومی و عوامل مؤثر بر آن

جریان گذرای که در طی برقرار شدن ترانسفورماتور جاری می شود، ناشی از اشباع هسته ترانسفورماتور در لحظه کلیدزنی است. از مشخصه های آن این است که در طی نیم سیکل اول بعد از کلیدزنی به حداکثر مقدار خود می رسد و پس از آن شروع به کاهش می کند تا به شرایط مغناطیس شوندگی پایدار برسد [۱۲].

مکانیسمی که باعث کاهش جریان هجومی می شود به این صورت است که وقتی جریان هجومی در سیستم جاری می شود، ولتاژ اعمال شده به ترانسفورماتور برابر تفاضل ولتاژ منبع و افت ولتاژ در طول امپدانس سیستم قدرت است. بررسی ها نشان می دهند که اثر مقاومت، کاهش دادن سطح (انتگرال) قسمت مثبت موج ولتاژ و افزایش دادن قسمت منفی موج ولتاژ است و در نهایت باعث عدم تقارن ولتاژ بر روی ترمینال های ترانسفورماتور می گردد [۱۲].

از آنجاکه شار در ترانسفورماتور، متناسب با سطح موج ولتاژ است، واضح است که تحت این شرایط مقدار شار مثبت تولید شده در هر سیکل کمتر از مقدار منفی تولید شده می باشد که مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید :

$$\Delta\varphi = \int_t^{t+\tau} (R.i)dt \quad (3-16)$$

که در آن  $\Delta\varphi$  تغییرات شار در هر سیکل،  $R$  کل مقاومت سری در مدار معادل ترانسفورماتور (همچنین شامل مقاومت سیم پیچی ترانسفورماتور) و  $\tau$  پریود موج منبع ولتاژ است.

از آنجائیکه تغییر شار، اندازه جریان مغناطیس کنندگی را کنترل می کند، لذا شار منتهی و جریان مغناطیس کنندگی ناشی از آن شروع به کاهش می کند و میزان این کاهش به طور عمده تابعی از مقاومت مدار است. این کاهش تا زمانی که جریان مغناطیس کننده در ترانسفورماتور به مقدار ماندگار خود برسد، ادامه پیدا خواهد کرد.

بنابراین می توان در لحظات اولیه راه اندازی مقاومتی را وارد مدار کرد و پس از مدتی با یک رله تأخیر زمانی (حدود یک ثانیه) کلید قدرت موازی بسته شده و مقاومت از مدار خارج شود. از طرف دیگر می دانیم که شار با ولتاژ، ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد. وقتی که ولتاژ ماکزیمم است، شار صفر است. پس اگر کلید زنی در لحظه ماکزیمم ولتاژ صورت گیرد، شار و نهایتاً جریان هجومی حداقل است. این روش در عمل نیاز به لوازم اضافی دارد و در سیستم های قدرت کاربرد ندارد.

### ۳-۶- محتوای هارمونیک جریان هجومی

شکل موج جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور حاوی مقادیری از هارمونیک است و در صورتی که پیک شار به شرایط اشباع برسد این مقادیر افزایش می یابد. تا زمانی که شکل موج نسبت به محور افقی متقارن باشد فقط هارمونیک های فرد موجود خواهند بود. جریان مغناطیس کنندگی در حالت نرمال شامل هارمونیک دوم، سوم و مقادیر کوچکی هارمونیک های بالاتر است [۲].

چنانچه میزان اشباع به طور قابل ملاحظه ای افزایش یابد، نه تنها میزان هارمونیک ها به طور کلی افزایش می یابند، بلکه نسبت هارمونیک پنجم افزایش یافته و حتی از هارمونیک سوم بیشتر می شود. در درجات بالاتر اشباع، هارمونیک هفتم از هارمونیک پنجم بیشتر می شود ولی در این حالت اشباع به حدی است که معمولاً این حالت توسط ترانسفورماتور تجربه نمی شود. برقرار شدن ترانسفورماتور قدرت تولید موج نامتقارنی حول محور افقی می کند. چنین شکل موجی حاوی هارمونیک های زوج و فرد است که هارمونیک های دوم و سوم غالب هستند. در مقایسه با موج حالت ماندگار، نسبت هارمونیک ها بستگی به میزان اشباع دارد.



## ۳-۶-۱- هارمونیک دوم

این مؤلفه در همه شکل موج های جریان هجومی وجود دارد و میزان آن با درجه اشباع هسته تغییر می کند. معمولاً جریان خطای داخلی ترانسفورماتور حاوی هارمونیک دوم و سایر هارمونیک های زوج نمی باشد. لذا در رله های متداول از هارمونیک دوم به عنوان معیاری جهت شناسایی جریان هجومی و تمایز آن از خطای داخلی ترانسفورماتور بهره می برند.

## ۳-۶-۲- هارمونیک سوم

هر چند در شکل موج جریان هجومی، هارمونیک سوم نیز وجود دارد ولی معیار خوبی جهت تشخیص نمی باشند. چون در طی خطاهای داخلی شدید، احتمال تولید هارمونیک سوم در CT خیلی زیاد است. همچنین در ترانسفورماتور سه فاز هارمونیک سوم در جریان خط حذف شده و نمی تواند به عنوان معیار تشخیص مطمئنی به شمار آید.

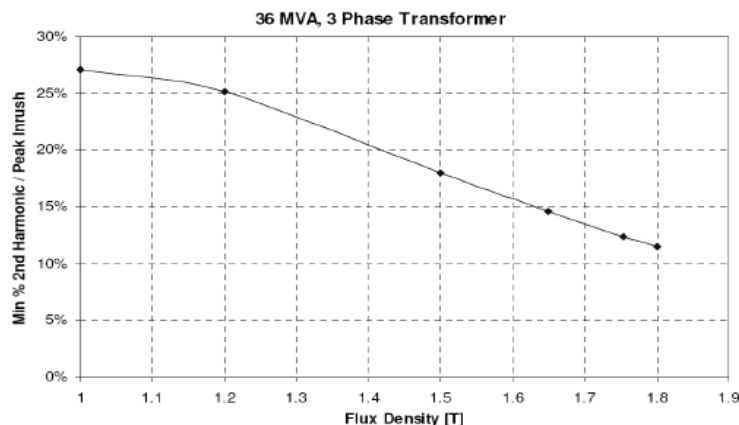
## ۳-۷- اثر پارامترهای طراحی ترانسفورماتور روی مؤلفه دوم هارمونیک جریان هجومی

امروزه طراحی ترانسفورماتور کمی تغییر کرده است و از مواد مدرن بیشتری در هسته استفاده شده است. این فاکتورها جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت و در نتیجه، طراحی حفاظت دیفرانسیل را تحت تأثیر قرار می دهند [۲].

## ۳-۷-۱- اثر چگالی شار هسته

پیک جریان هجومی با افزایش القا، زیاد می شود. این امر بدلیل اشباع هسته برای قسمت بزرگتر از سیکل ولتاژ ایجاد می شود. بنابراین در حالیکه دامنه هارمونیک دوم بدون تغییر می ماند، مینیمم درصد نسبت هارمونیک دوم به پیک جریان هجومی با این القا کاهش می یابد. ترانسفورماتورهای مدرن با به کارگیری فولادهایی دارای بافت منظم، در مقادیر چگالی شار بالاتری عمل می کنند. در نتیجه ترانسفورماتورهای مدرن در جریان هجومی بالاتر، ولی هارمونیک دوم کمتر عمل می کنند. این

مسئله برای یک ترانسفورماتور سه فاز ۳۶ MVA در شکل (۵-۳) نشان داده شده است. طبق شکل با افزایش مقدار چگالی شار هسته، درصد هارمونیک دوم کاهش می یابد.



شکل (۵-۳) نرخ هارمونیک دوم به پیک جریان هجومی نمونه

### ۳-۷-۲- اثر نوع اتصال سیم پیچی

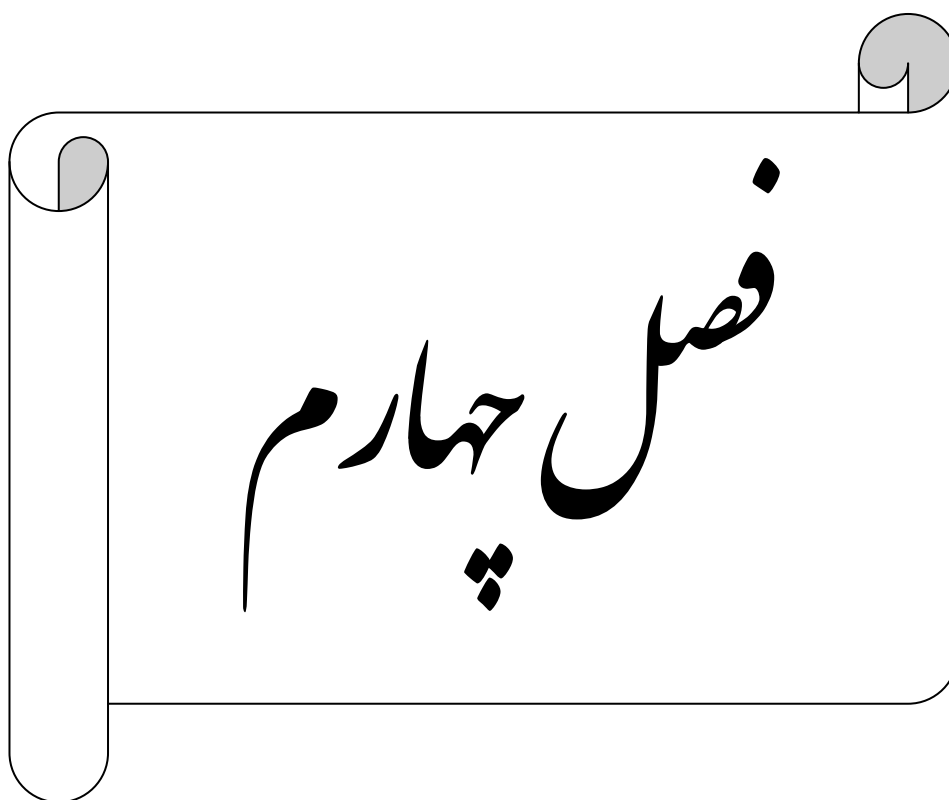
در ترانسفورماتور قدرت سه فاز اتصال سیم پیچ های اولیه و ثانویه و نوع زمین کردن هر سیم پیچ متصل شده به صورت ستاره، توزیع جریان هجومی تولید شده در یک سیم پیچ را به دیگر فازها و جریان های خط تحمیل می کند.

به عنوان نمونه جریان خط سیم پیچ اولیه با اتصال ستاره، جریان هجومی سیم پیچ را به طور کامل خواهد دید. در حالیکه جریان خط برای سیم پیچ اولیه با اتصال مثلث، زمانیکه جریان هجومی بتواند وارد دیگر فازها شود، کاهش خواهد یافت.

درصد هارمونیک دوم تحت تاثیر اتصال سیم پیچ، یا تعداد فازها نخواهد بود. آن فقط تابعی از شار نامی، پارامترهای مواد هسته ( چگالی شار اشباع، چگالی شار پس ماند ) و اتصالات پوششی است.

## ۳-۸- جمع بندی

در این فصل انواع مختلف جریان های هجومی و نحوه ایجاد آن ها بیان شد. همچنین روابط حاکم بر جریان هجومی، عوامل مؤثر بر ماکزیمم دامنه و مؤلفه هارمونیک دوم آن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به موارد بیان شده در فصل آینده به طور خلاصه تعدادی از روش های ارائه شده برای تشخیص جریان هجومی در رله دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت، مطرح می گردد.



روش‌های تشخیص جریان هجومی در ترانسفورماتور قدرت

## ۴-۱- مقدمه

در سیستم حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور، اساس عملکرد بر مبنای محاسبه جریان تفاضلی ناشی از دو طرف ترانسفورماتور و عملکرد رله به هنگام عبور از یک مقدار آستانه تعیین شده است. پدیده جریان هجومی مغناطیس کننده که در فصل قبل توضیح داده شد، باعث به وجود آمدن جریان ورودی در سیم پیچ مغناطیس کننده ترانسفورماتور می شود که در سمت دیگر آن وجود ندارد. بنابراین جریان هجومی به صورت عدم توازن جریان های ورودی و خروجی در رله دیفرانسیل دیده می شود و امکان تمایز آن از جریان خطای داخلی با یک روش بایاس معمولی ممکن نیست.

همچنین به دلیل مؤلفه DC بزرگی که می تواند در جریان هجومی وجود داشته باشد و با توجه به اندوکتانس ترانسفورماتور، قطع آن توسط عملکرد غلط رله دیفرانسیل می تواند ولتاژ  $L \frac{di}{dt}$ ، (  $L$  ) اندوکتانس سیم پیچ ترانسفورماتور و  $i$  جریان سیم پیچ است) بزرگی را القا کند که در طی آن احتمال وقوع اتصال کوتاه در حلقه ها و یا اتصال زمین بسیار زیاد است. برای تشخیص جریان هجومی مغناطیس کننده از جریان خطا، روش های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. در این فصل برخی از روش های مورد استفاده به اختصار توضیح داده می شوند.

## ۴-۲- استفاده از مؤلفه های هارمونیک جریان

جریان هجومی ترانسفورماتور دارای تمام مؤلفه های هارمونیک می باشد. ولی در این میان مقدار هارمونیک دوم درصد قابل توجهی از آن را شامل شده که میزان آن از جریان خطای داخلی بسیار بیشتر است [۱۳، ۱۴]. جریان اضافه تحریک نیز نسبت قابل توجهی هارمونیک پنجم دارد. لذا استفاده از هارمونیک ها در رله های دیجیتال نیز جهت وقوع جریان هجومی و اضافه تحریک مورد توجه قرار گرفته است. در این روش ها فراتر رفتن مؤلفه هارمونیک دوم در جریان تفاضلی از یک آستانه تعیین شده، وقوع جریان هجومی را تأیید می کند.

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری هارمونیک‌های جریان تفاضلی ارائه شده است. روش‌های تبدیل فوریه گسسته بازگشتی<sup>۱</sup>، مینیمم مربعات<sup>۲</sup>، پاسخ ضربه محدود<sup>۳</sup> و توابع والش<sup>۴</sup> بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته است. در همگی این روشها اطلاعات یک سیکل گذشته جریان تفاضلی مورد نیاز است و محاسبه هارمونیک‌ها به یک سیکل زمان نیاز دارد. علاوه بر مشکل محاسبه هارمونیک‌های مورد نیاز در روش هارمونیک نگه دارنده، این روش دارای نقاط ضعف دیگر نیز می‌باشد. با تغییرات ایجاد شده در مواد تشکیل دهنده هسته ترانسفورماتور قدرت و نیز استفاده زیاد از خازن‌های جبران سازی در خطوط طولانی، سطح هارمونیک دوم جریان هجومی نسبت به جریان خط کاهش یافته که این امر اشتباه عملکرد رله را به دنبال دارد [۱۵]. از طرف دیگر وقوع خطاهای داخلی با مقاومت کم ممکن است باعث اشباع ترانسفورماتورهای جریان گردد و از آنجائیکه این مسئله موجب ایجاد هارمونیک‌های زوج می‌گردد، هارمونیک محدودکننده می‌تواند مانع عملکرد رله در این مواقع گردد و از حساسیت رله کاسته گردد.

#### ۴-۳- استفاده از ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور به عنوان عامل بازدارنده

از عوامل دیگری که می‌تواند جهت تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی به کار رود ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور است [۱۶]. در هنگام وقوع خطای داخلی، ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. در حالیکه در هنگام وقوع جریان هجومی ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور برابر ولتاژ نامی خواهد بود. از آنجائیکه محاسبه ولتاژ به یک چهارم سیکل زمان نیاز دارد، لذا این روش نسبت به روش‌های هارمونیکی سریعتر است.

<sup>۱</sup>Recessive Discrete Fourier Transform

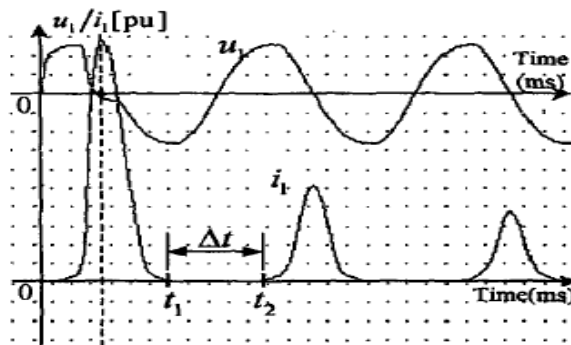
<sup>۲</sup>Least- Square

<sup>۳</sup>Finite Impulse Response

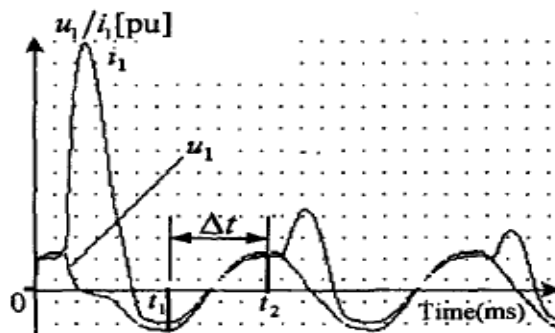
<sup>۴</sup>Walsh Function

۴-۴- استفاده از میزان تشابه بین شکل موج ولتاژ و جریان<sup>۱</sup>

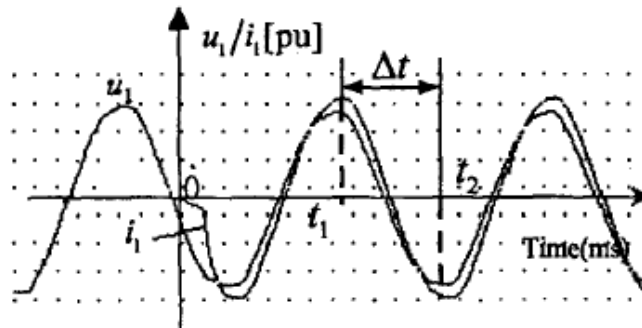
در این روش با مقایسه ولتاژ طرف منبع و جریان تفاضلی در یک فاصله زمانی مشخص، خطای داخلی در ترانسفورماتور می‌تواند تشخیص داده شود [۱۷]. در شکل‌های زیر جریان‌ها و ولتاژهای سمت منبع در شرایط مختلف نشان داده شده است. در شکل‌های زیر  $u$  بیانگر ولتاژ و  $i$  نشان دهنده جریان است.



شکل (۱-۴) کلیدزنی بدون خطای ترانسفورماتور [۱۷]



شکل (۲-۴) کلیدزنی ترانسفورماتور همراه با خطای داخلی [۱۷]



شکل (۳-۴) خطای داخلی ترانسفورماتور [۱۷]

<sup>۱</sup>Similarity Degree Between Voltage and Current

شکل موج های جریان و ولتاژ در یک رنج وسیع ( $t_1 - t_2$ ) در زمانیکه ترانسفورماتور بدون خطا است. با هم اختلاف دارند و در طی خطای داخلی بسیار شبیه به هم هستند. بنابراین یک ایده تشخیص جدید بر اساس درجه تشابه بین شکل موج های جریان و ولتاژ طرف منبع در یک زمان مشخص، پیشنهاد شده است و یک حفاظت دیفرانسیل بر اساس آن ساخته شده است.

#### ۴-۵- روش توان تفاضلی<sup>۱</sup>

در این روش تشخیص از جمع توان های اکتیو جاری شده به سمت ترانسفورماتور استفاده می شود [۱۸]. در حالت عملکرد عادی ترانسفورماتورهای قدرت، مجموع توان هایی که به ترانسفورماتور وارد می شود بسیار کم است. به علت اینکه تلفات مسی و تلفات هسته مقداری کمتر از ظرفیت ترانسفورماتورها را تشکیل می دهند. در اینجا منظور از توان، توان حقیقی یا متوسط است. در حالت عبور جریان هجومی نیز، هر چند که به علت عبور جریان زیاد، توان لحظه ای بزرگ می باشد، ولی چون تلفات مسی و هسته و گردابی به میزان کمی افزایش می یابند، مجموع توان های متوسطی که به ترانسفورماتور وارد می شود باز هم کم است. ولی اگر یک خطای داخلی رخ دهد، به علت ایجاد جرقه الکتریکی، توان زیادی مصرف خواهد شد. بنابراین با انتخاب یک سطح آستانه و مقایسه مجموع توان های وارده به ترانسفورماتور می توان حالت خطا را از دیگر حالت ها تشخیص داد. در این روش توان مصرف شده در ترانسفورماتور توسط رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$w(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t (v_1 I_1 + v_2 I_2 - R_1 I_1^2 - R_2 I_2^2) \quad (1-4)$$

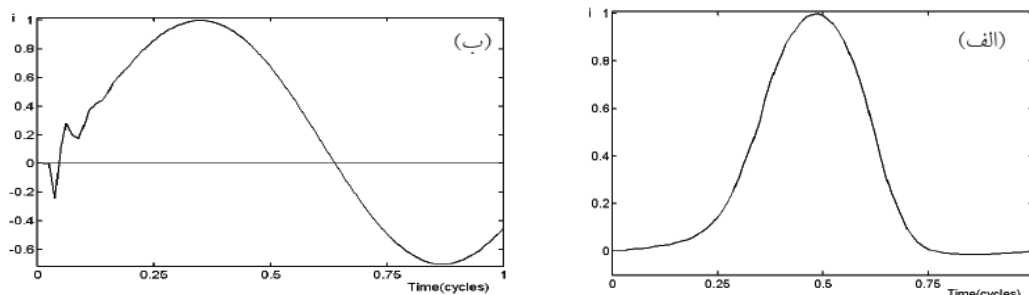
در این رابطه  $v_1$  و  $v_2$  ولتاژهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور،  $I_1$  و  $I_2$  جریان های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و  $R_1$  و  $R_2$  مقاومت های سیم پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور هستند. در این الگوریتم، با مقایسه  $w(t)$  با یک مقدار آستانه، می توان حالت خطا را از غیر خطا تشخیص داد.

<sup>۱</sup>Power Differential Method



## ۴-۶- روش تابع مشتق دوم جریان های تفاضلی

در این روش، تشخیص جریان هجومی از خطاهای داخلی مبتنی بر رفتار متفاوت شکل موج جریان در طی نیم سیکل اول پس از وقوع اختلال است [۱۹]. شکل (۴-۴) نمونه هایی از سیکل اول یک جریان هجومی و یک جریان خطای داخلی که نسبت به اولین پیک خود، نرمالیزه شده اند را نشان می دهد. با توجه به اینکه جریان هجومی مغناطیسی کندگی با اشباع هسته ترانسفورماتور متناظر می باشد، شکل موجی به صورت مخروطی شکل ( غیر سینوسی) دارد. به عبارتی تقعر نیم سیکل اول شکل موج جریان هجومی به سمت بالا است. از طرف دیگر با توجه به ماهیت متفاوت جریان خطا، شکل موج آن رفتاری مشابه با شکل موج سینوسی دارد. به طوری که تقعر نیم سیکل اول شکل موج جریان خطا به سمت پایین است.

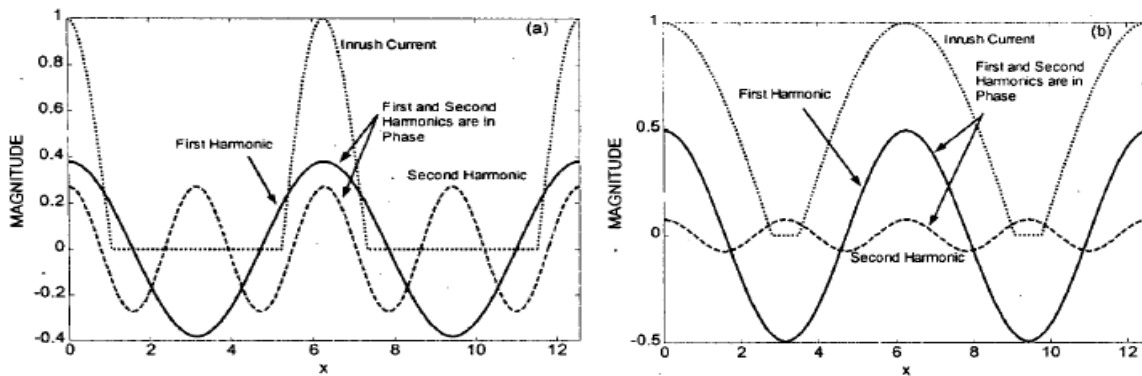


شکل (۴-۴) الف) جریان هجومی، ب) جریان خطای داخلی [۱۹]

با استفاده از علامت مشتق دوم یک منحنی می توان سمت تقعر آن منحنی را تعیین نمود. در صورت مثبت بودن مشتق دوم یک منحنی تقعر آن به سمت بالا بوده و در صورت منفی بودن این مشتق تقعر منحنی به سمت پایین است. بنابراین علامت متناظر با تابع مشتق دوم جریان های تفاضلی در مورد جریان هجومی مثبت و برای حالت خطا، منفی است.

۷-۴- استفاده از یک معیار جدید بر اساس هارمونیک دوم

در روش‌های کلاسیک تشخیص جریان هجومی بر اساس هارمونیک دوم، معیار تشخیص میزان دامنه مؤلفه هارمونیک دوم نسبت به مؤلفه اصلی جریان است. در یک روش جدیدتر از زاویه بین مؤلفه دوم و مؤلفه اصلی جریان به جای نسبت این دو مؤلفه استفاده می‌شود [۲۰]. شکل‌های زیر دو نمونه از جریان‌های هجومی را همراه با مؤلفه اصلی و هارمونیک دوم آن نشان می‌دهند.



شکل (۴-۵) جریان هجومی، (a) هارمونیک دوم بزرگ، (b) هارمونیک دوم کوچک [۲۰]

چون شکل موج‌ها متقارن هستند، هارمونیک‌های اول و دوم همفاز هستند و سیگنال‌های آنها مدل زاویه اولیه یکسانی دارند. در عبارت‌های فازهای چرخشی، اگرچه در تعریف زاویه فاز بین مؤلفه اصلی و هارمونیک دوم مشکلاتی وجود دارد. هارمونیک دوم، دو برابر از فازور اصلی سریعتر می‌چرخد و زاویه فاز بین هارمونیک اول و دوم به طور گردشی تغییر می‌کند. این مشکل با معرفی نرخ زیر رفع می‌شود [۲۰].

$$I_{r1} = \frac{I_{Diff}^{2nd}}{I_{Diff}^{1st}} \angle \text{angle}(I_{Diff}^{2nd}) - 2 \cdot \text{angle}(I_{Diff}^{1st}) \quad (2-4)$$

در این رابطه  $I_{Diff}^{1st}$  مؤلفه اصلی جریان تفاضلی،  $I_{Diff}^{2nd}$  مؤلفه هارمونیک دوم آن و  $I_{r1}$  اختلاف زاویه بین سیگنال اصلی و هارمونیک دوم است.

مشخصه مؤلفه فرکانس اصلی و هارمونیک دوم در طی شرایط جریان هجومی هم فاز می شوند که باید موارد زیر در آن در نظر گرفته شود .

- اگر تابع  $\cos$  مبنای قسمت حقیقی فازور است، زاویه بین هارمونیک اول و دوم در طی شرایط جریان هجومی صفر یا  $180^\circ$  درجه است.

- اگر تابع  $\sin$  مبنای قسمت حقیقی فازور است، زاویه بین هارمونیک اول و دوم در طی شرایط جریان هجومی  $90^\circ$  یا  $-90^\circ$  درجه است.

#### ۴-۸- روش زاویه مرده<sup>۱</sup>

با توجه به شکل موج جریان هجومی نسبت به خطای داخلی ترانسفورماتور مشخص است که در سیکلی از زمان دامنه جریان هجومی دارای مقدار صفر است. در این روش از همین خاصیت برای تشخیص جریان هجومی استفاده شده است [۲۱]. حداقل زمان صفر بودن جریان یک چهارم سیکل می باشد که با استفاده از یک تایمر می توان روش تشخیص را اجرا نمود. این روش نیاز به یک سیکل زمانی دارد و در نتیجه عملکرد رله در آن کند است. اشباع ترانسفورماتور جریان در طول شرایط جریان هجومی باعث کاهش زاویه مرده شده و عملکرد رله دچار اشتباه می گردد. همچنین در حالت خطای داخلی اشباع CT باعث افزایش زاویه مرده شده و عملکرد رله را دچار تأخیر می کند.

#### ۴-۹- روش مبنی بر تحلیل مؤلفه اصلی<sup>۲</sup>

الگوریتم ارائه شده در این روش در جستجوی احتمال مشخصه سازی رفتار شکل موج جریان تفاضلی برای تشخیص بین خطاهای داخلی از جریان هجومی و شرایط فوق تحریک است. تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) ویژگی هایی را از جریان تفاضلی به منظور به کارگیری در روند تشخیص، در یک فضای دوبعدی استخراج می کند که فضای حالت نامیده می شود. بیان سیگنال های رله در فضای حالت

<sup>۱</sup>Dead Angle Method

<sup>۲</sup>Principal Component Analysis

یک ساختار تفکیک پذیر خطی را نشان می دهد که نیاز به استفاده از تکنیک دسته بندی برای حل آن نیست.

به طور کلی PCA یک روش عمومی آماری برای تحلیل داده ها است. هدف آن تشخیص ساختار وابسته پشت یک مشاهده آماری چند متغیر ی به منظور بدست آوردن یک توصیف فشرده از آن است. شکل (۴-۶) PCA را تشریح می کند [۲۲]. در این شکل OA اولین مسیر مؤلفه اصلی توزیع است که انبوهی از نقاط را که تولید می کند و OB دومین مسیر مؤلفه اصلی است . آشکار است که تمرکز روی OA ساختار بیشتری نسبت به تمرکز روی OB را نشان می دهد. بنابراین می توان گفت دسته بندی روی مسیر با واریانس بالا نسبت به واریانس کم بیشتر قابل تشخیص است.



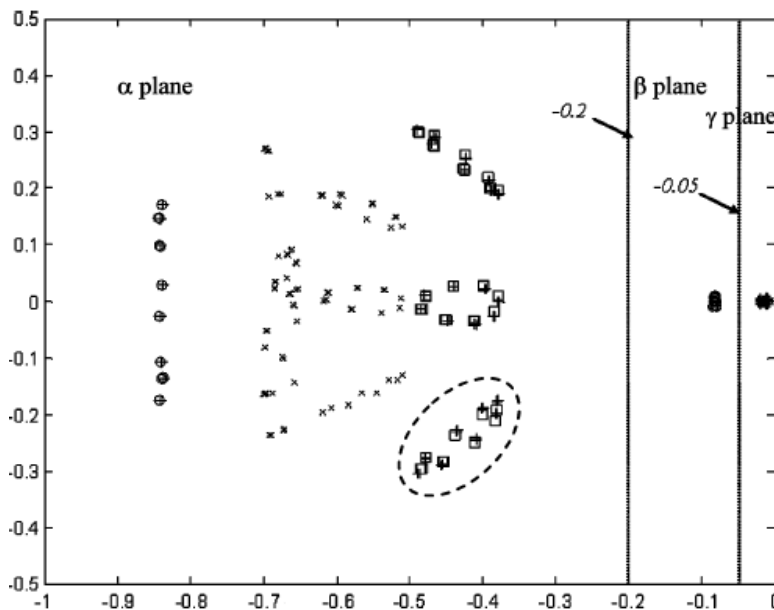
شکل (۴-۶) تشریح PCA [۲۲]

بیشترین ویژگی مؤلفه های اصلی در ارتباط با بردارهای ویژه غالب است که مرتبط با بزرگترین مقادیر ویژه در ماتریس کوواریانس است. ماتریس کوواریانس در این روش از جریان های تفاضلی سه فاز (برای ترانسفورماتور سه فاز) و به صورت پنجره هایی شامل تعداد نمونه های معین تشکیل می گردد. اجرای تحلیل PCA برای یک ترانسفورماتور با مشخصات  $230/115KV$ ،  $500MVA$ ،  $\Delta/Y$ ،  $60Hz$ ، به ازای جریان های هجومی خطا و اضافه تحریک انجام شده که به صورت شکل (۴-۷) است. نتایج نشان می دهند که خطاها یک رفتار بسته بندی شده را دنبال می کنند. گروه مشخص شده در شکل بیانگر ۴۸ مورد از خطای فاز به زمین است. در نتیجه این روند، زیر فضای دو بعدی از دو مؤلفه

اصلی در سه سطح تقسیم بندی می شود. ناحیه  $\alpha$  متناظر با خطاها، ناحیه  $\gamma$  متناظر با جریان هجومی و ناحیه  $\beta$  متناظر با شرایط اضافه تحریک است [۲۲].

$$\begin{cases} |pc_1| < 0.05 & Inrush \\ 0.05 < |pc_1| < 0.2 & Over\ excitation \\ 0.2 < |pc_1| & Fault \end{cases} \quad (3-4)$$

در این روش مرز بین سه ناحیه به روش اکتسابی به دست آمده است.

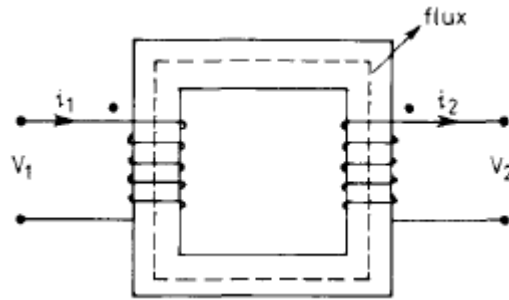


شکل (۴-۷) اجرای تحلیل PCA برای یک ترانسفورماتور نمونه [۲۲]

#### ۴-۱۰- استفاده از تکنیک بازدارنده شاری<sup>۱</sup>

اگر بتوان با استفاده از روشی شار داخل سیم پیچ ترانسفورماتور را تخمین زد، از این روش می توان به عنوان یک الگوریتم تشخیصی استفاده نمود. چنانچه ولتاژ ترمینال یک سیم پیچی ترانسفورماتور  $v(t)$ ، جریان ورودی به سیم پیچ  $i(t)$  و شار دربرگیرنده ترانسفورماتور باشد، طبق شکل (۴-۸) داریم  $(i_1, i_2)$  جریان های اولیه و ثانویه،  $(l_1, l_2)$  ولتاژهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور هستند [۲۳]:

<sup>۱</sup>Flux Restrain



شکل (۴-۸) مدار معادل ترانسفورماتور

$$v(t) - L \frac{di}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (4-4)$$

که  $L$  اندوکتانس دربرگیرنده سیم پیچ است. با انتگرال گیری از رابطه بالا در فاصله زمانی  $t_1$  و  $t_2$  خواهیم داشت:

$$\lambda(t_2) - \lambda(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt - L[i(t_2) - i(t_1)] \quad (5-4)$$

با اعمال قاعده دوزنقه ای به رابطه (۵-۴) خواهیم داشت:

$$\lambda(t_2) = \lambda(t_1) + \frac{t_2 - t_1}{\tau} [v(t_2) - v(t_1)] - L[i(t_2) - i(t_1)] \quad (6-4)$$

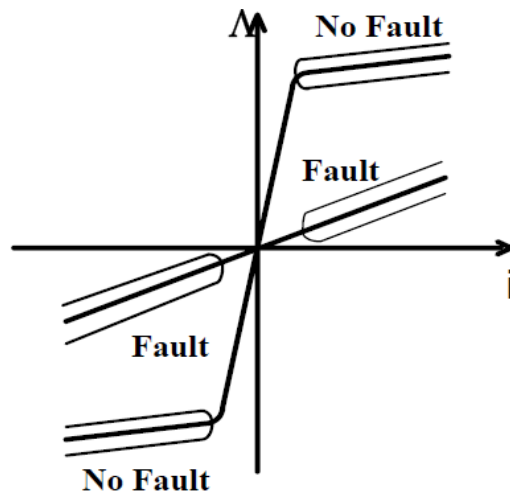
چنانچه ولتاژ و جریان در لحظات جداگانه نمونه برداری شوند. بین نمونه های به دست آمده در لحظات  $k$  و  $k+1$  رابطه زیر برقرار است:

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} + \frac{t_k - t_{k-1}}{\tau} [v_k - v_{k-1}] - L[i_k - i_{k-1}] \quad (7-4)$$

رابطه (۷-۴) بیانگر نحوه محاسبه شار دربرگیرنده یک ترانسفورماتور با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده ولتاژ و جریان در لحظات مختلف می باشد.

در شرایط عادی عملکرد ترانسفورماتور قدرت جریان تفاضلی با جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور برابر است. بنابراین نمونه های جریان دیفرانسیل و شار دربرگیرنده در لحظات  $k$ ، یعنی نقاط  $(i_k, \lambda_k)$  بر روی منحنی مغناطیسی مدار باز ترانسفورماتور قرار می گیرند. بنابراین از این نکته می توان برای طراحی یک حفاظت دیفرانسیل استفاده نمود. در این روش حفاظت مکان قرارگیری نقاط  $(i_k, \lambda_k)$  نسبت به منحنی مدار باز ترانسفورماتور کنترل می گردد و چنانچه این نقاط روی

منحنی مغناطیس‌کنندگی قرار نداشته باشند، فرمان خطا صادر می‌گردد. شکل (۴-۹) مشخصه مغناطیسی مدار باز ترانسفورماتور را در حالت وقوع خطا و عدم خطا نشان می‌دهد که طبق شکل این نواحی کاملاً از هم جدا و مشخص هستند [۲۳، ۲۴].



شکل (۴-۹) محدوده خطا و غیر خطا در منحنی مغناطیس‌کنندگی [۲۴]

اما مشکل این است که جهت محاسبه شار از این رابطه، شار پس ماند هسته مورد نیاز است که قابل تعیین نمی‌باشد. همچنین در صورتیکه نقطه شار پس ماند زیاد باشد می‌تواند سبب گردد که حتی در هنگام وقوع خطای داخلی نیز نقطه کار ترانسفورماتور وارد ناحیه اشباع شود و لذا امکان تشخیص وقوع خطا از بین می‌رود.

راه حل دیگر این است که به جای استفاده از مقادیر شار، از شیب منحنی  $\lambda - i$  استفاده شود.

$$\frac{d\lambda}{di} = \frac{\lambda_k - \lambda_{k+1}}{i_k - i_{k+1}} = \frac{\Delta t}{\tau} \left[ \frac{v_k + v_{k-1}}{i_k + i_{k-1}} \right] - L \quad (۸-۴)$$

در صورتیکه ناحیه کار ترانسفورماتور در ناحیه خطی باشد، دارای مقداری بزرگ و اگر در ناحیه اشباع باشد، دارای مقدار کوچک خواهد بود. البته ترانسفورماتور در دو حالت خطای داخلی و جریان

هجومی می‌تواند وارد ناحیه اشباع شود و با استفاده از مقدار  $\frac{d\lambda}{di}$  امکان تشخیص این دو حالت از

هم وجود ندارد. تفاوت این دو حالت در این است که در طول زمان خطای داخلی تقریباً ترانسفورماتور

همواره دارای مقادیر  $\frac{d\lambda}{di}$  کوچک می باشد، در حالیکه در هنگام وقوع جریان هجومی  $\frac{d\lambda}{di}$  بین

مقادیر بزرگ و کوچک نوسان می کند.

#### ۴-۱۱- روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی

روش‌هایی که اخیراً روی آنها مطالعه صورت گرفته دارای ساختاری متفاوت در مقایسه با روشهای

دیگر می باشند. در این روش‌ها حساسیت و سرعت عملکرد به نحو مطلوبی بهبود می یابد. روش‌های

تشخیص خطا در این حالت به دو دسته منطق فازی<sup>۱</sup> [۲۵، ۲۶] و شبکه عصبی<sup>۲</sup> [۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰،

۳۱، ۳۲] تقسیم می شوند.

#### ۴-۱۱-۱- شبکه عصبی

در شبکه عصبی روش کار بر اساس تشخیص الگو می باشد که در زمینه حفاظت ترانسفورماتور

فعالیت‌های زیادی روی آن صورت گرفته است. در استفاده از شبکه عصبی فرضیات زیر در نظر گرفته

می شوند:

الف) شبکه عصبی باید توسط جریان‌های هر فاز به همراه جریان تفاضلی و جریان باز دارنده تغذیه شود.

ب) خروجی شبکه عصبی به عنوان دستور نهایی برای رله می باشد.

ج) الگوهای آموزش شبکه شامل خطاهای داخلی و پدیده‌های غیر خطا می باشد.

با مقایسه شکل موج جریان تفاضلی در هنگام وقوع خطای داخلی و پدیده‌های غیر خطا، مشاهده می

شود که تفاوت چشمگیری بین این شکل موج‌ها وجود دارد و لذا استفاده از شبکه عصبی در

تشخیص آنها مورد استفاده قرار گرفته است.

<sup>۱</sup>Fuzzy Logic  
<sup>۲</sup>Neural Network



شبکه عصبی در حالت اول جهت جداسازی حالت خطا از حالات دیگر آموزش داده می‌شود و در حالت دوم با انتخاب الگوهای آموزشی پدیده‌های خاص، جریان خطا از پدیده‌های دیگر غیر خطا تمایز داده می‌شود. جهت آموزش شبکه عصبی نمونه‌های زیادی نیاز است. هر قدر تعداد لایه‌ها و نیز تعداد گره‌های هر لایه بیشتر باشد دقت شبکه در تشخیص بیشتر است و در مقابل از سرعت پاسخ آن کاسته می‌شود. تعداد الگوهای آموزش از دیگر عوامل مؤثر در دقت پاسخ است. که باید در طراحی شبکه عصبی مورد توجه قرار گیرد. گرچه شبکه عصبی طراحی شده از دقت خوبی در تشخیص برخوردار است، ولی سرعت پاسخگویی شبکه بیش از یک سیکل است که نسبت به روش‌های موجود چندان مناسب نمی‌باشد.

#### ۴-۱۱-۲- منطق فازی

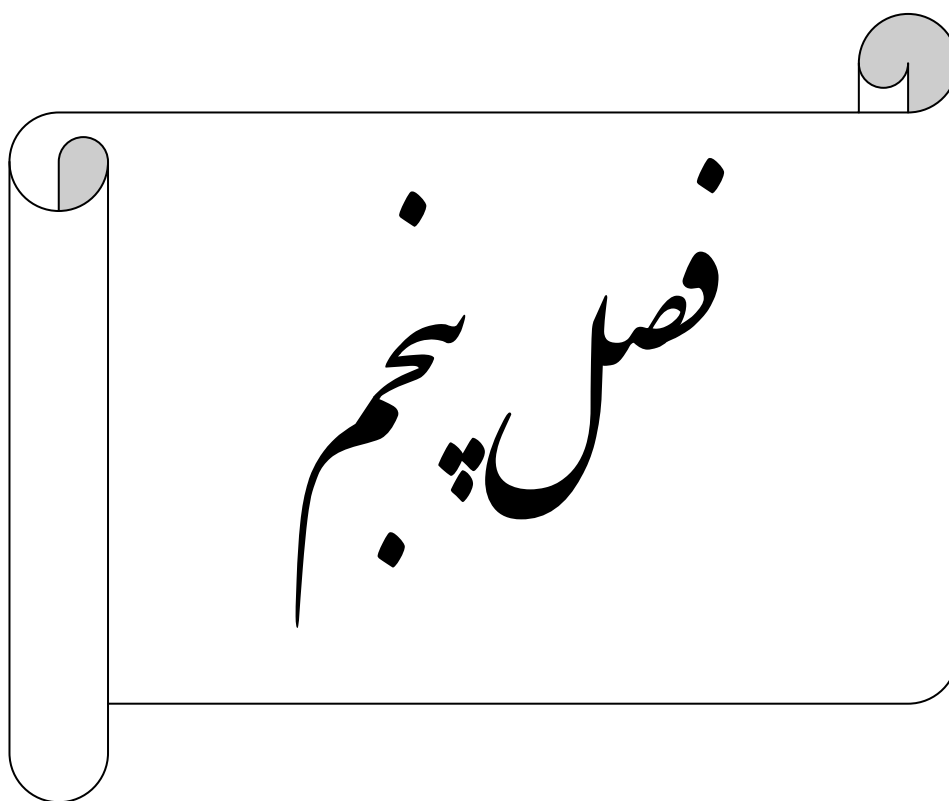
می‌توان از منطق فازی به عنوان یک ابزار ریاضی قدرتمند در حفاظت دیفرانسیل دیجیتال ترانسفورماتور استفاده نمود. در حالت عملکرد عادی سیستم قدرت و ترانسفورماتور، جریان تفاضلی قابل توجهی وجود ندارد، ولی در هنگام وقوع خطای داخلی جریان تفاضلی افزایش می‌یابد. اما از آنجائیکه افزایش جریان تفاضلی توسط عواملی غیر از خطای داخلی نیز رخ می‌دهد، لذا وجود جریان تفاضلی به تنهایی به عنوان نشانه وقوع خطای داخلی کافی نخواهد بود. پدیده‌هایی نظیر جریان هجومی ترانسفورماتور، اضافه تحریک، اشباع ترانسفورماتورهای جریان ناشی از اتصال کوتاه‌های خارجی شدید و عدم تناسب ترانسفورماتورهای جریان نیز باعث ایجاد جریان تفاضلی می‌گردند. لذا رله دیفرانسیل باید بتواند پس از مشاهده جریان تفاضلی بزرگتر از سطح آستانه، عوامل غیر خطا را رد کرده و در آن صورت دستور عملکرد صادر نماید.

الگوریتم حفاظت در این روش بر مبنای تشخیص خطا بر اساس رد معیارهای پدیدهای غیر خطا می‌باشد. لذا برای هر پدیده غیر خطا، با توجه به ویژگی‌های آن معیارهایی تدوین می‌شود. سپس با فازی سازی معیارها و بدست آوردن توابع عضویت مناسب با آنها و ترکیب مناسب آنها با ضرایب وزنی،

خروجی نهایی رله مشخص می‌شود. در این روش ابتدا سیگنال‌های معیارهای وروی که همان دامنه‌ها و هارمونیک‌های سیگنال‌های ولتاژ و جریان هستند، محاسبه می‌شوند. سپس این معیارها وارد قسمت فازی‌کننده می‌گردند. ورودی‌ها به توابع عضویت اعمال می‌شوند و سپس خروجی آن وارد قسمت ایجاد تصمیم‌گیری برای رله می‌گردد. از آنجائیکه معیارهای مختلف دارای درجه اهمیت مختلف برای هر پدیده هستند لازم است تا هر معیار در درجه اهمیت مربوط به آن ضرب شده و حاصل آنها با هم ترکیب شوند. پس از اعمال معیارهای اضافی برای کمک به عملکرد صحیح رله، خروجی محاسبه می‌گردد و مقایسه خروجی با مقدار آستانه عملکرد نهایی را بدنبال دارد. در این روش سرعت عملکرد به نحو مطلوبی نسبت به روش‌های گذشته بهبود می‌یابد. همچنین به کار بردن معیارهای مختلف برای تشخیص یک پدیده، قابلیت اطمینان مورد نیاز برای رله را برآورده می‌سازد.

#### ۴-۱۲- جمع بندی

در این فصل تعدادی از روش‌های ارائه شده برای تشخیص جریان هجومی بیان گردید. در فصل آینده خلاصه‌ای از روش‌های پردازش سیگنال بیان می‌گردد. سپس تبدیل موجک و روابط حاکم بر آن که اساس روش پیشنهادی در این پایان‌نامه است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.



تبدیل مویک و کاربردهای آن در سیستم قدرت

## ۵-۱- مقدمه

در سال های اخیر استفاده از ابزارهای پردازش سیگنال در زمینه مسائل سیستم قدرت توسعه یافته است. یکی از این ابزارها که مخصوصاً در حفاظت سیستم های قدرت مورد توجه قرار گرفته است، تبدیل موجک می باشد که در این فصل به توضیح آن و کاربردهای مختلف آن در زمینه سیستم قدرت پرداخته می شود.

## ۵-۲- چرا تجزیه سیگنال؟

توزیع غیر یکنواخت انرژی سیگنال در حوزه فرکانس باعث شده است تا تجزیه سیگنال یک امر مهم در مسائل عملی باشد. مسئله اساسی در اینجا تقسیم طیفی سیگنال به زیر باندها و بررسی جداگانه آن ها به منظور رسیدن به هدف است. از نقطه نظر کد گذاری سیگنال، زیر باندهایی با محتوای انرژی بالاتر ارزش و اولویت بیشتری برای تحلیل و پردازش دارند. به عنوان مثال، یک سیگنال با تغییرات آهسته، به طور قابل توجهی دارای مؤلفه های فرکانس پایین است. بنابراین باندهای پایین گذر آن شامل میزان بیشتری از انرژی کل سیگنال می باشد. بنابراین اگر قسمت باندهای بالاگذر حاصل از تجزیه سیگنال کنار گذاشته شود و بقیه سیگنال بازسازی شود، انتظار می رود که خطای بسیار کم و قابل صرف نظر کردنی در این عملیات تحلیلی رخ دهد.

تجزیه طیفی سیگنال پایه ریاضی دو ویژگی مهم و مورد نظر در تجزیه سیگنال را فراهم می کند. اول اینکه بررسی مؤلفه های سیگنال در زیر باندها و طیف های زیرین فراهم می شود. سپس این زیر باندها می توانند به طور جداگانه تجزیه و پردازش شوند. دوم اینکه تجزیه طیفی سیگنال منجر به تجزیه چند سطحی سیگنال از طریق پردازش چند نرخی، بر طبق تئوری نمونه برداری نایکوئیست می شود [۳۳].

## ۵-۳- گذارهای سیستم قدرت

سیگنال های گذرا سیگنال هایی هستند که در یک زمان محدود به سمت صفر نزول می کنند. به عبارت دیگر سیگنال هایی که مشخصه های اصلی آن ها با زمان تغییر می کند. چنین سیگنال هایی در سیستم قدرت دارای اهمیت ویژه ای هستند [۳۳].

روش تحلیل فرکانسی، از زمان حضور تبدیل فوریه<sup>۱</sup> معمول شده است. اگر چه تحلیل فرکانسی برای تحلیل سیگنال های گذرا، کاملاً مناسب نیست، چون این تحلیل ها که بر مبنای تبدیل فوریه هستند، بر اساس توابع سینوس<sup>۲</sup> و کسینوس<sup>۳</sup> هستند که این توابع گذرا نیستند. این امر منجر به یک طیف فرکانسی وسیع در تحلیل گذارها می شود و قادر به بررسی دقیق در طیف های فرکانسی مربوط به زمان های کوچک و گذار نیست، که مطلوب نمی باشد.

گذارهای الکترومغناطیسی در سیستم قدرت، در نتیجه اغتشاشات مختلف بر روی خطوط انتقال و یا تجهیزات سیستم قدرت هستند. مواردی مانند کلید زنی، ضربه های صاعقه، خطاهای سیستم قدرت و یا ترانسفورماتور قدرت و دیگر وقایع که خواسته و یا ناخواسته در سیستم قدرت رخ می دهند. چنین گذارهایی مخصوصاً در زمانی که مؤلفه های سیستم قدرت در معرض تنش های شدید ناشی از جریان های بالا و ولتاژهای بزرگ هستند، بسیار با اهمیت است.

از میان این سیگنال های گذرا، جریان های هجومی ناشی از کلیدزنی ترانسفورماتور قدرت و جریان های خطای ناشی از خطاهای داخلی ترانسفورماتور (به ویژه خطای اتصال کوتاه حلقه های سیم پیچ های ترانسفورماتور) نیز دارای اهمیت خاصی بوده و از سیگنال های مورد بحث در این پایان نامه هستند، که دارای همان خواص سیگنال های گذرا هستند. بنابراین استفاده از تحلیل طیفی که بتواند خواص این سیگنال ها را به خوبی بیان کند، دارای اهمیت بوده و در این فصل بررسی می شود.

<sup>۱</sup>Fourier Transform  
<sup>۲</sup>Sine Function  
<sup>۳</sup>Cocine Function

۵-۴- تبدیل فوریه

در ابتدا مقدمه ای بر تحلیل فوریه که اساس اولیه تمام روش های آنالیز سیگنال است در اینجا بیان می شود.

در واقع تبدیل فوریه برای تحلیل سیگنال های ایستادن<sup>۱</sup> (نامتغیر با زمان) و خطی است، چون موج های سینوسی  $e^{j\omega t}$  بردارهای ویژه اپراتورهای خطی تغییر ناپذیر با زمان هستند. تبدیل فوریه استاندارد به صورت زیر بیان می شود.

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\Omega t} dt \leftrightarrow f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\Omega)e^{j\Omega t} d\Omega \quad (1-5)$$

که در آن  $F(\Omega)$  تبدیل فوریه و  $f(t)$  تبدیل فوریه معکوس سیگنال اصلی  $f(t)$  هستند. در شکل زیر نمایش تبدیل فوریه به صورت شماتیک نشان داده شده است [۳۴].



شکل (۱-۵) نمایش تحلیل فوریه [۳۴]

تبدیل فوریه استاندارد سیگنال را به مؤلفه های فرکانسی آن تبدیل می کند و شدت و دامنه آن سیگنال را در آن طیف فرکانسی بیان می کند. از آنجائیکه شالوده اصلی تبدیل فوریه بر اساس  $e^{j\omega t}$  است، این تبدیل نمی تواند بیان کند که یک مشخصه فرکانسی خاصی از سیگنال در چه زمانی واقع شده است. به عبارت دیگر این تبدیل بیان کننده مشخصه زمانی سیگنال نیست. این تبدیل مشخصه های حوزه زمانی سیگنال را از دست می دهد. البته این مسئله برای سیگنال های ایستادن با مشخصه

<sup>۱</sup>Stationary Signal

ثابت آماری با زمان مهم نیست، ولی مشخص است که برای سیگنال های گذرا با مشخصه زمانی متغیر، مورد نیاز است.

### ۵-۵- تبدیل فوریه زمان کوتاه<sup>۱</sup>

برای حل مشکل ناشی از تبدیل فوریه، گا بور<sup>۲</sup> تبدیل فوریه را بر اساس تکنیک پنجره بندی انجام داد. این روش یک پنجره با طول ثابت را روی تابع زمان حرکت می دهد و محتوای فرکانسی آن سیگنال را در آن فاصله زمانی استخراج می کند. این تکنیک تبدیل فوریه زمان کوتاه نامیده می شود. به عنوان مثال این تبدیل برای سیگنال های صحبت، که به طور کلی دارای پایداری محلی و ناپایداری سراسری هستند، مفید است. تبدیل فوریه زمان کوتاه یک پنجره مانند  $g(t)$  را در تعدادی نقاط مانند  $t$ ، روی زمان حرکت می دهد و تبدیل فوریه سیگنال محدود شده در آن فاصله زمانی را محاسبه می کند. تبدیل فوریه زمان کوتاه به صورت زیر بیان می شود.

$$F(\Omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t).g^*(t - \tau).e^{-j\Omega t}.dt \quad (۲-۵)$$

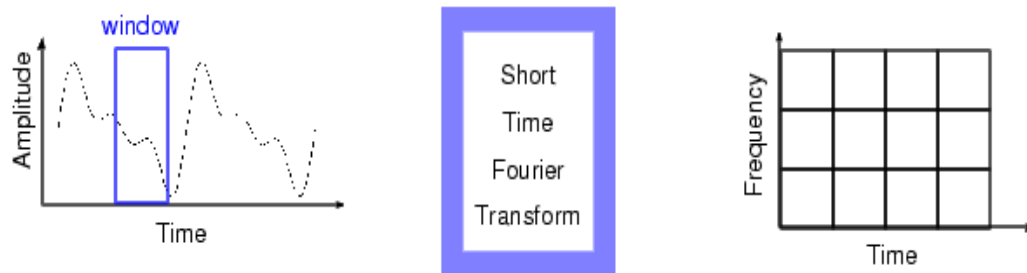
$g^*(t)$  مزدوج تابع پنجره است.

زمانی که پنجره  $g(t)$ ، یک پنجره گوسی<sup>۳</sup> است، تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل گابور نیز نامیده می شود.

<sup>۱</sup> Short-Time Fourier Transform (STFT)

<sup>۲</sup> Gabor

<sup>۳</sup> Gaussian



شکل (۵-۲) نمایش تبدیل فوریه زمان کوتاه [۳۴]

تابع پنجره (تابع مادر) با افزایش  $t$  در زمان انتقال می یابد، در حالیکه گسترده زمانی ثابت آن حفظ می شود. به طور مشابه با افزایش پارامتر مدولاسیون  $W$  تابع پنجره در فرکانس انتقال می یابد، در حالیکه یک عرض باند ثابت را حفظ می کند. این تبدیل یک نمایش زمان-فرکانسی از سیگنال ارائه می دهد. مشکل تبدیل فوریه زمان کوتاه آن است که پنجره ثابت آن، با یک باند فرکانسی ثابت همراه است و بنابراین فقط اجازه یک تجزیه زمان-فرکانسی ثابت را می دهد. در حالیکه بسیاری از سیگنال ها نیاز به تقریب های قابل انعطاف تری دارند. به طوریکه گاهی تغییر اندازه پنجره زمانی بسیار کوچک برای بدست آوردن مشخصه های زمان-فرکانسی دقیق تر لازم می باشد [۳۳].

### ۵-۶- تبدیل موجک<sup>۱</sup>

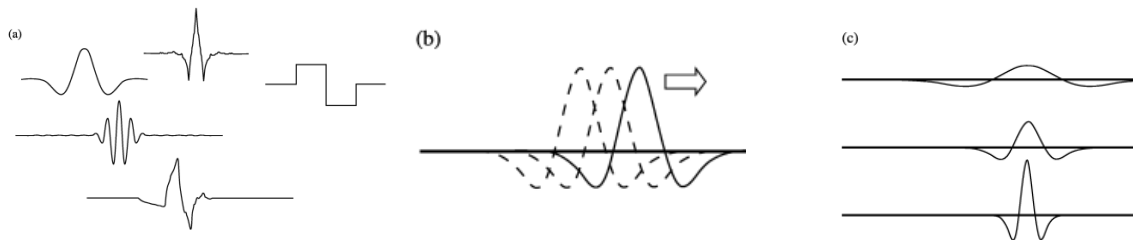
تحلیل موجک، سیگنال را در حوزه زمان-فرکانسی، ولی با استفاده از طول پنجره بندی مختلف نشان می دهد. تحلیل موجک از توابع کوچکی که موجک نامیده می شوند استفاده می کند. در واقع تابع موج محلی تعریف دقیق تری از موجک است.





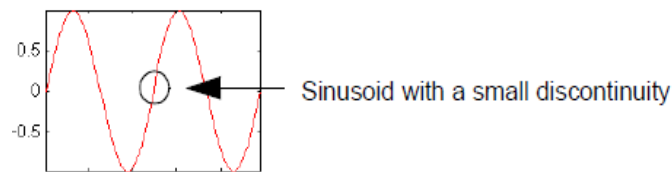
شکل (۳-۵) آنالیز تبدیل موجک [۳۴]

شکل (۳-۵) اختلاف تبدیل موجک را با روش هایی بر پایه فرکانس و STFT نشان می دهد [۳۴]. تبدیل موجک با استفاده از انتقال تابع موجک روی مکان های مختلف سیگنال و همچنین گستردگی (یا فشردگی) آن حاصل می شود. شکل (۴-۵) تعدادی از توابع موج محلی را به همراه خاصیت انتقال و فشردگی (یا گستردگی) سیگنال را نشان می دهد.

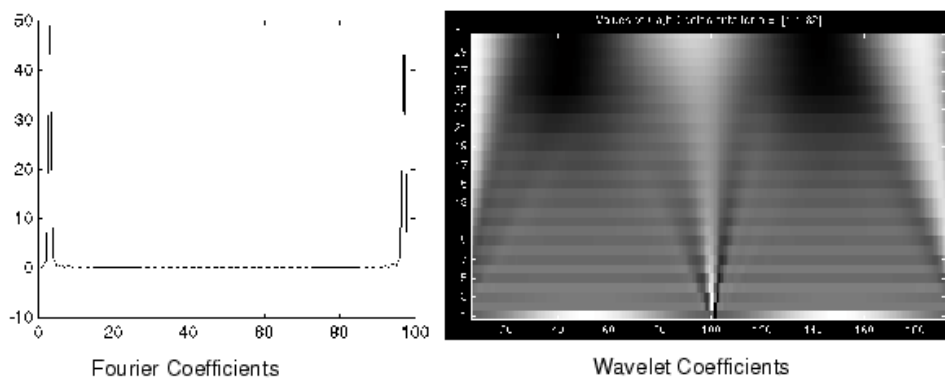


شکل (۴-۵) (a) توابع موج محلی موجک، (b) انتقال، (c) فشردگی یا گستردگی در واحد مقیاس [۳۶]

قابلیت تحلیل محلی موجک این امکان را فراهم می سازد که تحلیل یک ناحیه کوچک از زمان در سیگنال به طور وسیعی صورت گیرد. یک سیگنال سینوسی را با یک اعوجاج کوچک در نظر بگیرید (شکل (۵-۵)). ضرایب فوریه این سیگنال یک طیف فرکانسی یکنواخت با دو پیک را نشان می دهد و اثری از اغتشاش در آن وجود ندارد، در حالیکه رسم ضرایب موجک به طور دقیق نشان می دهد که محل اغتشاش بر حسب زمان در چه نقطه ای بوده است. شکل (۶-۵) این موضوع را نشان می دهد.



شکل (۵-۵) موج سینوسی با یک اغتشاش کوچک [۳۴]



شکل (۵-۶) ضرایب تبدیل فوریه و تبدیل موجک [۳۴]

تبدیل موجک قابلیت آشکارسازی مفاهیمی همچون تمایل، نقاط شکست، نشانه، نقاط انفصال و منشأ آن‌ها را در سیگنال دارا می‌باشد. تبدیل موجک امکان استفاده از پنجره‌های زمانی بزرگ را در هنگام نیاز به اطلاعات دقیق در فرکانس‌های پایین و پنجره‌های زمانی کوچک‌تر را هنگام نیاز به اطلاعات فرکانسی بالاتر را فراهم می‌کند. به این معنی که با افزایش فرکانس، دقت زمانی نیز افزایش می‌یابد، چون مدت وقوع پدیده‌های فرکانس بالاتر کمتر است.

تبدیل موجک، سیگنال را روی موجک‌های مقیاس شده و انتقال یافته تجزیه می‌کند. یک موجک تابعی به صورت  $\psi$  است که دارای مقدار متوسط صفر است، که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۵].

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3-5)$$

تابع موجک نرمالیزه شده به صورت زیر بیان می‌شود [۳۶].

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4-5)$$

که در آن مقیاس دهی تابع موجک با پارامتر  $a$  و انتقال آن توسط  $b$  ایجاد می شود.

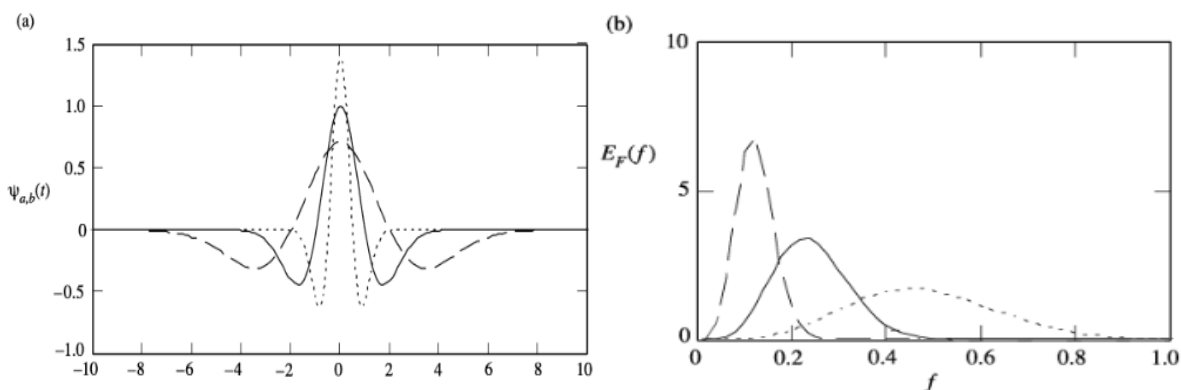
بنابراین تبدیل موجک به صورت زیر بیان می شود (ضرایب موجک):

$$T(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5-5)$$

باید توجه شود همانطور که تابع موجک گسترده می شود، طیف انرژی متناظر با آن فشرده می شود.

به عنوان مثالی از آن اثری را که مقیاس دهی کلاه مکزیکی (یک نوع از موجک مادر) روی طیف

انرژی متناظر با آن دارد، در شکل (5-7) نشان داده شده است.



شکل (5-7) طیف انرژی فوریه موجک های گسترده شده، (a) توابع موجک گسترده شده، (b) طیف انرژی متناظر با آن [36]

این یک نتیجه آشکار است که طولانی شدن در حوزه زمان، به کوچکتر شدن پهنای باند فرکانس های

مربوطه منجر می شود. در نتیجه مقیاس موجک به طور معکوس، متناسب با تمام مشخصه های

فرکانسی آن است، که شامل فرکانس مرکزی، باند عبور، فرکانس پیک و غیره است.

۵-۷- تبدیل موجک گسسته<sup>۱</sup>

محاسبه ضرایب تبدیل موجک در همه مقیاس های ممکن کاری بیهوده است و تعداد زیادی داده تولید می کند. در تبدیل موجک گسسته تعداد ضرایب حاصل از تبدیل موجک محدودتر می شوند. یک راه مؤثر برای کاربرد تبدیل موجک گسسته استفاده از فیلترهایی است که توسط مالات<sup>۲</sup> توسعه یافت. این الگوریتم فیلتر کردن در واقع یک تبدیل موجک سریع می باشد.

در این قسمت تبدیل موجک سیگنال پیوسته  $x(t)$  در جاییکه پارامترهای مقیاس و انتقال  $a$  و  $b$  گسسته هستند بیان می شود.

یک روش معمول برای نمونه برداری از این پارامترها، گسسته سازی لگاریتمی مقیاس  $b$  و ارتباط دادن آن به صورت گردشی، با اندازه پله های داده شده بین مکان های  $b$  است. برای ارتباط دادن  $b$  به  $a$ ، در پله های گسسته حرکت می کنیم (برای هر مکان  $b$  که متناسب با مقیاس  $a$  است). این نوع گسسته سازی موجک به صورت زیر است [۳۶].

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (۵-۶)$$

اعداد صحیح  $m$  و  $n$  به ترتیب مقیاس و انتقال تابع موجک را کنترل می کنند. پارامترهای  $m$  و  $n$  شامل تمام مقادیر صحیح مثبت و منفی هستند.  $a_0$  یک مقیاس ثابت تعیین شده است، که در مقداری بالاتر از یک تنظیم می شود.  $b_0$  پارامتر مکان است که باید بزرگتر از صفر باشد.

بنابراین تبدیل موجک سیگنال پیوسته  $x(t)$  به صورت زیر بیان می شود.

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt \quad (۵-۷)$$

<sup>۱</sup>Discrete Wavelet Transform<sup>۲</sup>Mallat

برای تبدیل موجک گسسته ضرایب  $T_{m,n}$  به عنوان ضرایب موجک یا ضرایب جزئیات شناخته می شوند.

مقادیر معمول برای پارامترهای گسسته  $a_0$  و  $b_0$  به ترتیب ۲ و ۱ است. این مقیاس دهی لگاریتمی پله های انتقال و مقیاس به نام آرایش دیادیک<sup>۱</sup> شناخته می شوند. این آرایش باعث می شود تا تحلیل انجام شده توسط موجک مؤثرتر و دقیق تر باشد. بنابراین موجک دیادیک به صورت زیر نوشته می شود.

$$\psi_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi\left(\frac{t - n2^m}{2^m}\right) \leftrightarrow \psi_{m,n} = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}t - n) \quad (8-5)$$

این موجک ها طوری انتخاب می شوند که متعامد باشند و برای داشتن مقدار انرژی واحد نرمالیزه می شوند که به صورت زیر بیان می شود.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_{m,n}(t) \cdot \psi_{m',n'}(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{if } m = m', n = n' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9-5)$$

به این ترتیب دیده می شود که حاصلضرب داخلی هر موجک با دیگری در یک سیستم دیادیک یکسان، صفر است. این بدان معنی است که اطلاعات ذخیره شده در ضرایب  $T_{m,n}$  درجایی دیگر تکرار نمی شود و اجازه بازسازی سیگنال را بدون تکرار می دهد.

توابع موجک گسسته با توابع مقیاس دهی و معادلات مقیاس همراه هستند. تابع مقیاس دهی با هموارسازی سیگنال همراه است و شکلی مشابه با تابع موجک دارد که به صورت زیر بیان می شود.

$$\phi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \phi(2^{-m}t - n) \quad (10-5)$$

حاصل کانولوشن سیگنال با تابع مقیاس، ضرایب تقریب را به صورت زیر به دست می دهد.

$$S_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \phi_{m,n}(t) dt \quad (11-5)$$

<sup>۱</sup>Dyadic

ضرایب تقریب در یک مقیاس مشخص  $m$  به نام ضرایب گسسته سیگنال در آن مقیاس شناخته می شوند. راجع به کاربرد ضرایب تقریب و جزئیات در ادامه توضیح داده می شود [۳۶].

### ۵-۸- تبدیل موجک سیگنال های ورودی گسسته با طول محدود

برای تطبیق با قالب تجزیه چند سطحی، سیگنال ورودی گسسته برای بیان الگوریتم تجزیه چند سطحی باید به صورت ضرایب تقریب سیگنال در مقیاس  $m = 0$  باشد، که به صورت زیر تعریف می شود.

$$S_{0,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\phi(t-n)dt \quad (5-12)$$

سیگنال ورودی  $S_{0,n}$  دارای طول محدود  $N$  است که به صورت توان صحیحی از ۲ بیان می شود ( $n = 2^M$ ). بنابراین تعداد سطوح تجزیه ای را که می توانیم بررسی کنیم،  $0 < m < M$  است. تقریب سیگنال در مقیاس  $m = 0$ ، (سیگنال اصلی) به صورت سیگنال هموار شده در مقیاس  $M$  به اضافه ترکیبی از سیگنال های باقیمانده به صورت زیر بیان می شود.

$$\sum_{n=0}^{2^{M-m-1}} S_{0,n} \phi_{0,n}(t) = S_{m,n} \phi_{m,n}(t) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{2^{M-m-1}} T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (5-13)$$

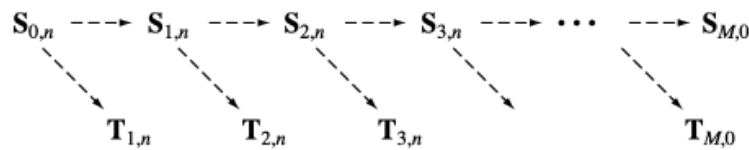
$T_{m,n}$  ضرایب جزئیات<sup>۱</sup>،  $S_{m,n}$  ضرایب تقریب<sup>۲</sup>،  $\psi_{m,n}(t)$  تابع موجک پایه و  $\phi_{m,n}(t)$  تابع مقیاس می باشند.

### ۵-۹- الگوریتم تجزیه چند سطحی

اگر سیگنال ورودی گسسته  $S_{0,n}$  را داشته باشیم، می توانیم ضرایب تقریب و جزئیات را مانند شماتیک شکل زیر در سطوح متوالی به دست آوریم.

<sup>۱</sup> Approximation Coefficient

<sup>۲</sup> Detail Coefficient



شکل (۵-۸) شماتیک تجزیه چند سطحی تبدیل موجک [۳۶]

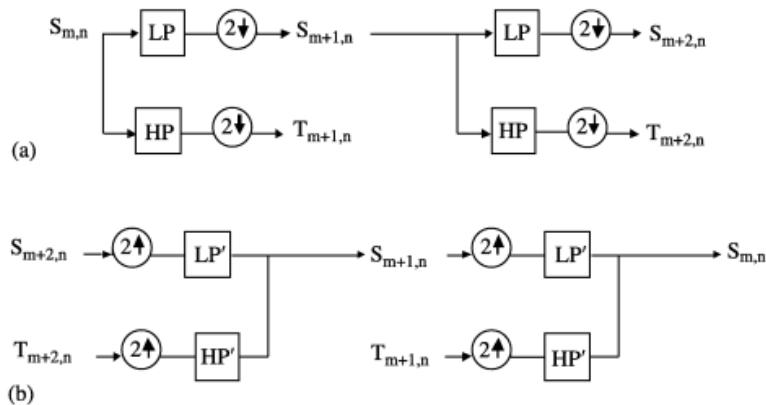
روند تبدیل با تجزیه شدن ضریب تقریب در هر سطح ادامه پیدا می کند، تا اینکه سیگنال به بسیاری مؤلفه های پایین تر شکسته می شود. این روند را درخت تجزیه موجک می نامند. از لحاظ تئوری روند تحلیل می تواند تا بی نهایت ادامه یابد، ولی در عمل تازمانیکه فقط یک مؤلفه در ضرایب جزئیات وجود داشته باشد ادامه پیدا می کند. همچنین تعداد سطوح تجزیه بر اساس طبیعت سیگنال و بعضی معیارهای دیگر انجام می شود.

## ۵-۱۰- فیلترسازی

در پردازش سیگنال ضرایب تقریب در سطح  $m$ ، یعنی  $S_{m,n}$  با یک فیلتر پایین گذر<sup>۱</sup>، کانولوشن می شوند. این کار با حرکت فیلتر در طول سیگنال در هر پله زمانی انجام می شود. ضرایب تقریب سپس کاهش نرخ نمونه برداری می شوند و بردار ضرایب تقریب را در سطح  $m+1$  می دهند. ضرایب تقریب در سطح  $m$  همچنین با یک فیلتر بالا گذر<sup>۲</sup> کانولوشن شده و سپس کاهش نرخ نمونه برداری می شوند، که این عمل ضرایب جزئیات، در سطح  $m+1$  را می دهد. ضرایب جزئیات  $T_{m+1,n}$  نگه داشته می شوند و ضرایب تقریب  $S_{m+1,n}$  دوباره از فیلترهای پایین گذر و بالاگذر برای ایجاد ضرایب تقریب و جزئیات  $T_{m+2,n}$  و  $S_{m+2,n}$  عبور می کنند. این روند تا تجزیه کامل سیگنال ادامه می یابد. برای بازسازی سیگنال روند فیلتر کردن معکوس می شود، که به موجب آن مؤلفه های مقیاس بالاتر، از طریق فیلترها تغذیه می شوند. شماتیک این پردازش در شکل (۵-۹) نشان داده شده است (LP و HP به ترتیب فیلترهای پایین گذر و بالا گذر،  $\downarrow 2$  به معنای گرفتن هر دو مقدار از سیگنال فیلتر

<sup>۱</sup>Low-Pass  
<sup>۲</sup>High-Pass

شده، یعنی کاهش نرخ نمونه برداری و  $2 \uparrow$  به معنی اضافه کردن صفر بین هر دو مقدار از بردار ورودی، یعنی افزایش نرخ نمونه برداری است. همچنین ضرایب  $LP'$  و  $HP'$  معکوس ضرایب فیلترهای متناظر با خود، برای تجزیه سیگنال هستند).



شکل (۵-۹) (a) روند فیلترینگ برای تجزیه سیگنال، (b) روند فیلترینگ برای بازسازی سیگنال [۳۶]

## ۵-۱۱- انواع توابع موجک

از لحاظ تاریخی تبدیل موجک روش جدیدی است که مفهوم ریاضی آن به تلاش های ژوزف فوریه<sup>۱</sup> در قرن نوزدهم بر می گردد. فوریه اساس تحلیل خود را روی تحلیل فرکانسی قرار داد و ثابت کرد که می تواند بسیار مهم و مفید باشد. توجه محققان بتدریج از تحلیل های فرکانسی به تحلیل های مقیاسی جلب شد، و این مطلب زمانی شروع شد که مشخص شد، روش هایی که نوسانات متوسط را اندازه گیری می کنند، نسبت به نویز کمتر حساس هستند. اولین توجه به موجک در سال ۱۹۰۹ توسط آلفرد هار<sup>۲</sup> در پایان نامه اش بود. مفهوم موجک در تئوری کنونی اولین بار توسط جین مورلت<sup>۳</sup> و تیم او بیان شد. روش های تحلیل موجک تا حد زیادی توسط میر<sup>۴</sup> و همکارانش توسعه پیدا کرد.

<sup>۱</sup>Joseph Fourier

<sup>۲</sup>Alfred haar

<sup>۳</sup>Jean Morlet

<sup>۴</sup>Y. Meyer



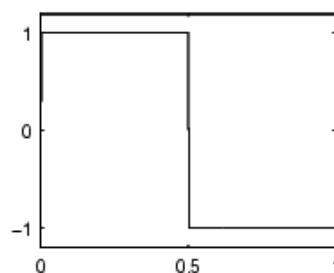
الگوریتم اصلی این تحلیل به کار استفان مالت در سال ۱۹۸۸ بر می گردد. از آن پس تحقیقات روی موجک ها به صورت جهانی درآمد و به خصوص در ایالات متحده رشد پیدا کرد. به طوریکه تلاش های زیادی توسط اینگرید دابیچز<sup>۱</sup>، رونالد کوافمن<sup>۲</sup> و ویکتور ویکرهایزر<sup>۳</sup> انجام شد. به طور کلی در تبدیل های موجک از توابع موجک (تابع موجک مادر) مختلفی استفاده می شود. در این بخش تعدادی از توابع پر کاربرد، به طور مختصر توضیح داده می شود.

### ۵-۱۱-۱- موجک Haar

موجک Haar ساده ترین نوع موجک متعامد نرمال است. موجک Haar به صورت زیر تعریف می شود [۳۴].

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (5-14)$$

موجک Haar ناپیوسته است و شبیه یک تابع پله است. شکل (۵-۱۰) موجک Haar را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۰) تابع موجک Haar

<sup>۱</sup>Ingrid Daubechies

<sup>۲</sup>Ronald Coifman

<sup>۳</sup>Victor Wickerhauser

## ۵-۱۱-۲- موجک Daubechies

در میان موجک های Daubechies، موجک Haar ساده ترین عضو آن است. این موجک ها شرایط موجک متعامد را ارضا می کنند.

برای اعداد صحیح  $1 - \frac{N_k}{2}, 0, 1, \dots, \frac{N_k}{2}$ ، این موجک ها  $\frac{N_k}{2}$  نقطه تضعیف شده دارند. به این

معنی که قسمت هایی از سیگنال را که چند جمله ای هایی بالاتر از  $1 - \frac{N_k}{2}$  دارند را حذف کنند.

این موجک ها در بیان مفهوم چند جمله ای ها در طول سیگنال مفید هستند. موجک ها به صورت

$D_{N_k}$  نشان داده می شوند. در این صورت D بیان کننده خانواده خاص از موجک های Daubechies

و  $N_k$  بیان کننده تعداد ضرایب مقیاس غیر صفر است. البته گاهی این موجک ها بر اساس تعداد

نقاط صفر بیان می شوند که برابر  $\frac{N_k}{2}$  است و به صورت  $D_1, D_2, D_3, \dots$  بیان می شوند.

موجک  $D_2$  طول حفاظت شده ۱، موجک  $D_4$  طول حفاظت شده ۳ و ... دارند. توابع مقیاس این

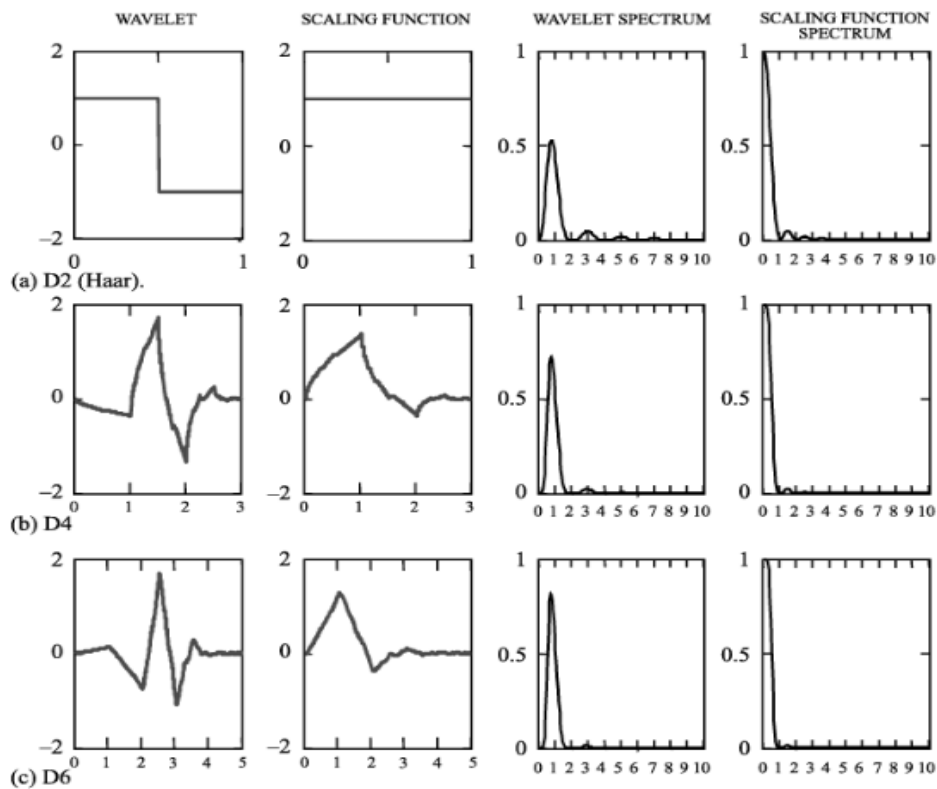
موجک ها در فرکانس های بالاتر قرار داده شده اند و از این جهت مانند فیلتر پایین گذر عمل می

کنند و موجک مربوط به آن ها در فرکانس های پایین تر قرار داده شده اند و مانند فیلتر پایین گذر

عمل می کنند.

در شکل (۵-۱۱) نمونه هایی از موجک Daubechies، توابع مقیاس آن ها و طیف انرژی مربوط به

آن ها نشان داده شده است [۳۶].

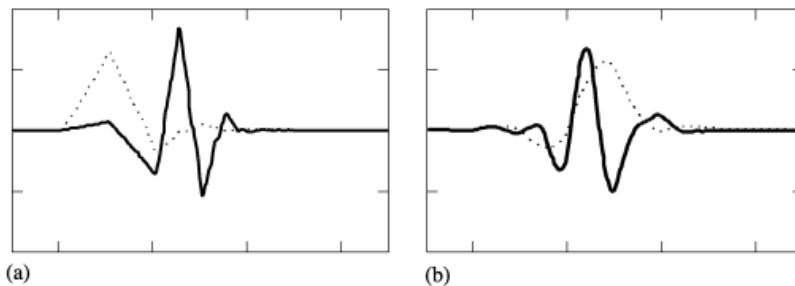


شکل (۵-۱۱) موجک های Daubechies [۳۶]

در این شکل ها، طیف ها دارای طبیعت نوسانی و با ضربه های کاهشی در دامنه، از فرکانس های پایین تا فرکانس های بالاتر هستند. برآمدگی های ثانویه در دامنه طیف به صورت تعدادی از ضرایب مقیاس کاهش می یابند و از این جهت تعداد نقاط حذف شده در موجک افزایش می یابد. از میان موجک های این خانواده موجک های با طول کمتر برای فرآیندهای سریع و موجک های با طول بیشتر برای فرآیندهای آهسته مناسب است. در سیگنال های سیستم قدرت که دارای خاصیت نوسانی، غیر پریودیک و دوره کوتاه مدت هستند، استفاده از این موجک ها مطلوب است. به این ترتیب که با استفاده از این موجک ها امکان تمرکز بیشتر روی سیگنال های گذرای فرکانس بالا و با زمان میرایی کوتاه وجود دارد.

## ۵-۱۱-۳- موجک Symlet

موجک های دابیچز کاملاً نامتقارن هستند. برای بهبود تقارن، در حالیکه سادگی آن حفظ شود، دابیچز موجک های Symlet را به عنوان موجک های اصلاح شده معرفی کرد. تقارن فیلترهای موجک در بعضی کاربردها، مانند کددهی اطلاعات مفید است. در شکل (۵-۱۲) دو نمونه از موجک های Symlet به همراه توابع مقیاس آن آورده شده است (توابع مقیاس با خط چین نشان داده شده است). این موجک ها دارای  $1 - \frac{N_k}{2}$  نقطه حذف شده، طول حفاظت شده  $1 - N_k$  و طول فیلتر  $N_k$  هستند [۳۶].



شکل (۵-۱۲) دو نمونه موجک symlet و توابع مقیاس آن (a) S6 ، (b) S10 [۳۶]

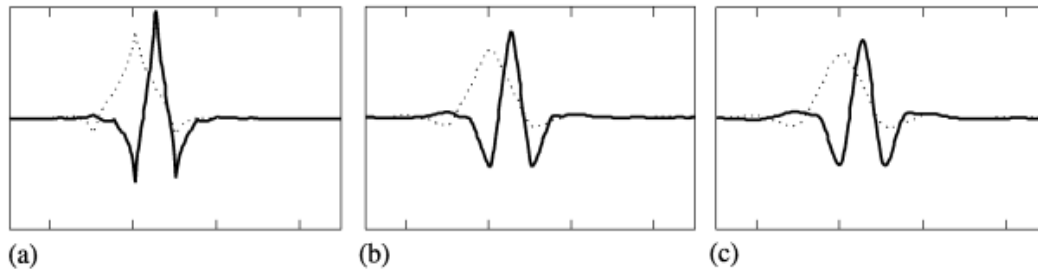
## ۵-۱۱-۴- موجک Coiflets

موجک های Coiflets نوع دیگری از موجک های ایجاد شده توسط Daubechies هستند. این موجک ها تقریباً متقارن هستند. تعداد نقاط صفر برای تابع موجک آن ها  $\frac{N_k}{3}$  و برای تابع مقیاس

است.  $1 - \frac{N_k}{3}$  همچنین این موجک ها دارای طول حفاظت شده  $1 - N_k$  و طول فیلتر  $N_k$  هستند.

سه نمونه از موجک های Coiflets در شکل زیر نشان داده شده است (توابع مقیاس با خط چین

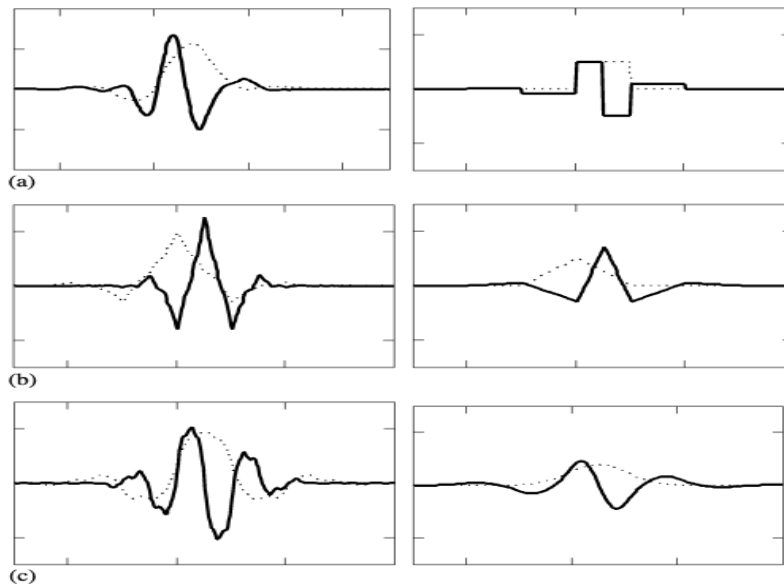
نشان داده شده است). تعداد ضرایب  $N_k$  استفاده شده برای Coiflet به صورت ضربی از ۶ افزایش داده شده است.



شکل (۵-۱۳) تابع موجک و مقیاس Coiflet (a) C6، (b) C12، (c) C18 [۳۶]

#### ۵-۱۱-۵- موجک Biorthogonal

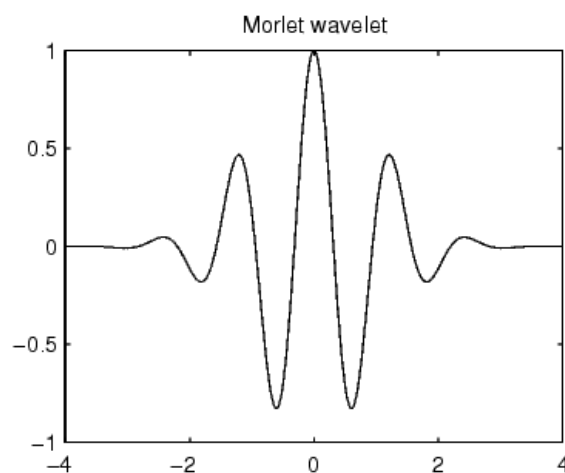
برای بعضی از کاربردهای خاص، موجک های حقیقی و متقارن مورد نیاز است. یک راه برای بدست آوردن موجک های متقارن، ساخت دو سری موجک های Biorthogonal است ( $\psi_{m,n}$  و دوگان آن  $\tilde{\psi}_{m,n}$ ). یکی از آنها برای تجزیه سیگنال و دیگری برای بازسازی آن است. این دو موجک دارای نقاط صفر متفاوت هستند و برای بعضی کاربردها مانند پردازش تصویر مفید هستند. شکل (۵-۱۴) تعدادی از موجک های Biorthogonal به همراه دوگان آن ها را نشان می دهد. موجک و تابع مقیاس (خط چین) در ستون سمت چپ و دوگان موجک و تابع مقیاس آن در ستون سمت راست نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۴) موجک Biorthogonal [۳۶]

### ۵-۱۱-۶- موجک Morlet

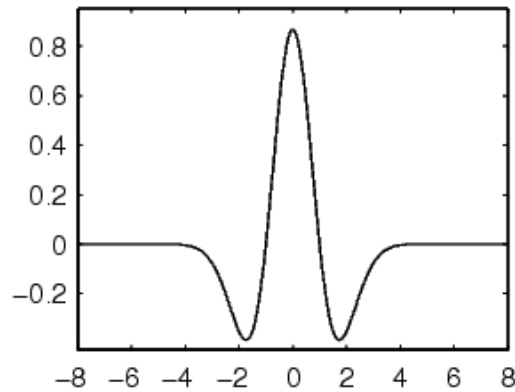
این موجک دارای تابع مقیاس نمی باشد. موجک Morlet یک موجک مختلط است و توسط آن می توان اطلاعات دامنه و فاز فرآیند مورد بررسی را استخراج نمود. از موارد کاربرد این موجک می توان به تجزیه سیگنال های ژئوفیزیکی و یا بررسی حالت گذرای سیستم قدرت اشاره کرد. شکل (۵-۱۵) این موجک را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۵) موجک Morlet [۳۴]

## ۵-۱۱-۷- موجک Mexican Hat

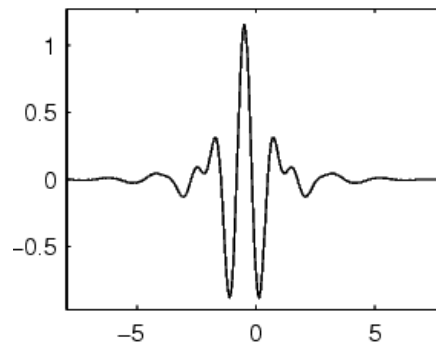
این موجک دارای تابع مقیاس نمی باشد و از یک تابع که متناظر با مشتق دوم تابع چگالی احتمال گوسی است، تشکیل شده است.



شکل (۵-۱۶) تابع موجک Mexican Hat [۳۴]

## ۵-۱۱-۸- موجک Meyer

موجک Meyer و تابع مقیاس آن در حوزه فرکانس تعریف شده است.



شکل (۵-۱۷) تابع موجک Meyer [۳۴]

## ۵-۱۲- کاربردهای تبدیل موجک در سیستم قدرت

ایده اصلی کاربرد موجک ها در سیستم قدرت در سال ۱۹۹۴ توسط روبرسون<sup>۱</sup> و ریبرو<sup>۲</sup> بیان شد. از آن پس تعداد کارهای منتشر شده در این زمینه گسترش پیدا کرد. تمرکز اصلی در این زمینه، روی

<sup>۱</sup>Roberston  
<sup>۲</sup>Ribeiro

روش های تشخیص و تقسیم بندی، با استفاده از سیگنال های اندازه گیری شده است. بیشترین کاربرد تبدیل موجک در سیستم قدرت به صورت زیر است.

۱- مسائل کیفیت توان [۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳]

۲- تشخیص و مکان یابی تخلیه جزئی [۴۴، ۴۵]

۳- پیش بینی بار [۴۶]

۴- اندازه گیری های سیستم قدرت [۴۷]

۵- حفاظت سیستم قدرت [۴۸، ۴۹، ۵۰]

۶- گذار های سیستم قدرت [۵۱، ۵۲]

#### ۵-۱۲-۱- مسائل کیفیت توان

کیفیت توان یک مسئله اساسی در سیستم قدرت امروزی است. به طوریکه تقاضای توان سالم به دلیل استفاده گسترده از میکروپروسورها و میکروالکترونیک ها در تجهیزاتی مانند کامپیوترها، کنترل کننده های منطق فازی و سیستم های تشخیص افزایش یافته است. کارهای زیادی در زمینه کیفیت توان انجام شده است که اکثر آن ها بر اساس جمع آوری دیتاها و تحلیل آن ها است، که این کار انبوهی از داده ها را ایجاد کرده که نیازمند صرف زمان زیادی برای بررسی آن ها است. در مرجع [۳۷] یک بررسی نقطه به نقطه برای پیدا کردن تفاوت های بین دو سیکل متوالی جریان بیان شد. یک شبکه عصبی که خوب آموزش داده شود، می تواند اغتشاشات را در زمان کوتاهی تشخیص دهد ولی در زمانیکه یک اغتشاش متفاوت ایجاد شود ساختار شبکه و روند آموزش باید دوباره انجام شود. در زمینه کیفیت توان کارهای زیادی در زمینه شناسایی و دسته بندی اغتشاشات با استفاده از تبدیل موجک، به عنوان ابزار مفیدی برای تحلیل تداخل ها، بریدگی ها، توقف ها، هارمونیک ها، فلیکرها و غیره، به عنوان قسمتی از سیگنال های غیر ایستاد انجام شده است. به عنوان مثال اگر یک اغتشاش پالس لحظه ای وجود داشته باشد، که در یک فاصله زمانی خاص رخ می دهد، می تواند در تبدیل



فوریه شرکت داده شود ولی مکان قرارگیری آن در زمان از دست می رود. ولی در تبدیل موجک اطلاعات زمان و فرکانس با هم حاصل می شوند. به عبارت دیگر این تبدیل محلی تر است و به جای انتقال یک حوزه زمانی خاص به یک حوزه فرکانسی خاص، تبدیلات موجک در حوزه زمان-فرکانس ادغام می شوند.

دو رهیافت اساسی برای شناسایی هارمونیک ها و فلیکر ها انجام شده است. در اولین رهیافت که در سال ۱۹۹۹ بیان شد، الگوریتمی برای شناسایی هارمونیک های با مرتبه های صحیح و غیر صحیح ارائه شد. در مرحله اول این روش طیف فرکانسی شکل موج با استفاده از بسته تبدیل موجک گسسته (با استفاده از بانک های فیلتر) و تابع مرتبه بالای متعادل Daubechies به دو زیر باند تجزیه می شود. سپس تبدیل موجک پیوسته برای این زیر باندها صورت می گیرد که نتایج راضی کننده ای را از تست سیستم واقعی در اختیار قرار می دهد [۳۸]. در بررسی های [۳۹، ۴۰]، یک روش بهبود یافته برای بهتر کردن بیان ناقص فرکانسی فیلترها، با استفاده از بانک های فیلتر تبدیل موجک پیوسته<sup>۱</sup> به منظور بهتر شدن تحلیل زیر باندها بیان می شود. در [۴۱] یک تحلیل هارمونیکی با توابع موجک مختلط دوزنقه ای و تبدیل موجک دوزنقه ای متناظر با آن بیان می شود. در [۴۲]، تحلیل فلیکر با استفاده از موجک Gaussian و Morlet پیوسته انجام می شود.

در [۴۳] تبدیل موجک برای مطالعه اغتشاشات ولتاژ به دلیل اینکه تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) دارای سایز پنجره مناسب تری برای در نظر گرفتن فلیکر است، زیر سؤال قرار گرفت. به علاوه این موضوع مطرح شد که تبدیل موجک عمق پدیده فرورفتگی ولتاژ را بیان نمی کند. به طور کلی بیشتر کارهای انجام شده در زمینه آشکارسازی اغتشاشات کیفیت توان، براساس ضرایب موجک به دست آمده از تحلیل چند سطحی است.

<sup>۱</sup>Continiuos Wavelet Transform

## ۵-۱۲-۲- تشخیص و مکان یابی تخلیه جزئی

مشخص کردن تخلیه جزئی به دلیل دوره کوتاه، فرکانس بالا و دامنه کم سیگنال ها بسیار مشکل است. تبدیل موجک با تمرکز ناپیوسته در زمان سیگنال ها بر خلاف تبدیل فوریه، اجازه مشخص کردن تغییرات محلی سیگنال را می دهد. در [۴۴، ۴۵] از این قابلیت برای آشکار کردن تخلیه جزئی در سیم پیچ ترانسفورماتور، کابل ها و ایستگاه های برق ایزوله شده با گاز<sup>۱</sup> استفاده کردند.

## ۵-۱۲-۳- پیش بینی بار

نیاز به پیش بینی صحیح بار، کلید اصلی در اداره بهتر سیستم الکتریکی است. روش هایی بر اساس پیش بینی کوتاه مدت با ترکیب تبدیل موجک و شبکه عصبی انجام شد. یک بار الکتریکی در هر زمان مشخص، معمولاً به صورت یک ترکیب خطی از مؤلفه های مختلف در نظر گرفته می شود. از نقطه نظر تجزیه سیگنال، بار می تواند به صورت یک ترکیب خطی از فرکانس ها بیان شود. پردازش سیگنال، بارهای قبلی را به قسمت تقریب (که مرتبط با فرکانس پایین است) و قسمت های مختلف جزئیات (که مرتبط با فرکانس های بالا است) از طریق تبدیل موجک، تجزیه می کند. سپس پیش بینی بار آینده توسط تقریب مصنوعی و یا تطبیق بار توسط روش بازگشتی انجام می شود [۴۶].

## ۵-۱۲-۴- اندازه گیری های سیستم قدرت

توزیع توان و انرژی با در نظر گرفتن باندهای فرکانسی خاصی که مرتبط با هر سطح تجزیه موجک است، از مزیت های تبدیل موجک برای کاربردهای توان (انرژی) و اندازه گیری های مقدار مؤثر آن ها است.

کار زیادی برای اندازه گیری های توان و مقدار مؤثر ولتاژ با تبدیل موجک انجام نشده است. تبدیل موجک گسسته (DWT) اولین بار برای اندازه گیری مقدار مؤثر ولتاژ، جریان و توان با استفاده از

---

<sup>۱</sup>Gas Isolated Station

بیان سطوح مختلف فرکانسی، با استفاده از فیلترهای با پاسخ ضربه نامحدود<sup>۱</sup> بیان شد. این تبدیل باندهای فرکانسی غیر یکنواختی را ایجاد می کند که نمی تواند برای اندازه گیری مقدار مؤثر ولتاژ، جریان و توان مؤلفه های هارمونیک به کار رود. این مشکل در [۴۷] با توسعه بسته موجک که می تواند شکل موج را به باندهای فرکانسی یکنواخت تبدیل کند، رفع شد. به طوریکه تبدیل بسته موجک<sup>۲</sup> قابلیت اندازه گیری جداگانه مؤلفه های هارمونیک ولتاژ و جریان را دارد.

### ۵-۱۲-۵- حفاظت سیستم قدرت

هدف اصلی از حفاظت در سیستم قدرت، اطمینان از عملکرد صحیح سیستم، ایمنی افراد و تجهیزات است. این حفاظت ها اثر خطاهای اجتناب ناپذیر در سیستم قدرت را کاهش می دهند. از نقطه نظر الکتریکی، موقعیت های مختلف آسیب ها می تواند از اضافه ولتاژها و اضافه جریان ها حاصل شود. اغتشاشاتی که به طور معمول در سیستم قدرت رخ می دهند، می تواند در اثر کلیدزنی خطوط انتقال، بارها، خازن های ولتاژ بالا و یا ترانسفورماتورهای قدرت باشد، که می تواند باعث اضافه ولتاژهای داخلی در سیستم قدرت شود. این اضافه ولتاژها با فرکانس بالا و اثرات کم، در ایزولاتورهای سیستم ظاهر می شوند. به علاوه دامنه نوسانات و چگالی اغتشاشات داخلی نسبت به اضافه ولتاژهای خارجی زیاد بزرگ نیست. بنابراین روش های تشخیص معمولی در عمل مناسب نیستند و دقت کافی را ندارند.

کاربرد تبدیل موجک در سال های اخیر در حفاظت سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفت. در سال ۱۹۹۶ جی مومو<sup>۳</sup> یک الگوریتم برای استخراج ویژگی، به منظور آموزش شبکه عصبی برای تشخیص خطا بر اساس تبدیل موجک را ارائه داد. در ۱۹۹۸ مگنگو<sup>۴</sup> و آبور<sup>۵</sup> تحقیقاتی رادر زمینه مکان یابی

<sup>۱</sup>Infinite Impulse Response

<sup>۲</sup>Wavelet Packet Transform

<sup>۳</sup>J. Momoh

<sup>۴</sup>Magnago

<sup>۵</sup>Abur

خطا با موجک ها انجام دادند. برای این هدف خطای تولید کننده موج سیار با استفاده از تبدیل موجک برای مشخص کردن زمان سیر خطا تا محل رله مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۱۹۹۹ همان نویسنده روشی را برای تشخیص خطاها در یک سیستم شعاعی بیان کرد. روش های مشابهی برای مکان یابی خطا در [۴۸، ۴۹] بیان شده است. تشخیص خطای امپدانس بالا زمینه کاربرد دیگر تبدیل موجک است. به عنوان مثال در [۵۰] یک تحلیل مقایسه ای برای زمان قرار گیری خطای آرک، با روش های فرکانس و زمان-فرکانسی انجام شده است. در این تحلیل نویسندگان اثبات کردند که در رهیافت موجک، انتخاب تابع موجک، سطح تجزیه، نرخ نمونه برداری و رفتار خطای آرک، اثر زیادی در نتایج دارد.

یکی از مهمترین قسمت های سیستم قدرت ترانسفورماتورها هستند. قابلیت اطمینان و پایداری کل سیستم قدرت به ترانسفورماتورهای قدرت و در مدار بودن آن ها بستگی دارد. حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت برای عملکرد صحیح آن ها الزامی است. مسئله اصلی در حفاظت ترانسفورماتورها تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی می باشد. در بیشتر این موارد طیف انرژی سیگنال با تبدیل موجک آنالیز می شود و برای ایجاد یک الگوریتم آن لاین برای تشخیص تخریب ایزولاسیون، جریان هجومی، خطای داخلی و خطای خارجی به کار می رود.

#### ۵-۱۲-۶- گذارهای سیستم قدرت

در این مسیر، موجک ها ابتدا در سال ۱۹۹۴ برای گذارهای سیستم قدرت به کار رفتند. روبرسون<sup>۱</sup> تبدیل موجک را برای تحلیل گذارهای کلیدزنی خازنی به کار گرفت [۵۱]. در این روش نویسندگان یک کاربرد دیجیتال از تبدیل موجک را از طریق تحلیل یک بانک فیلتر ارائه دادند و اثر هر موجک را برای این کاربرد مشخص کردند. در [۵۲] یک روش تناوبی برای تحلیل گذارهای سیستم قدرت بیان شد. این روش بر اساس بسط سری های فوریه و بازسازی آن است. ماتریس سیستم، توسط بکارگیری

<sup>۱</sup>Robertson

بسط موجک روی معادلات انتگرال-دیفرانسیلی سیستم قدرت توسعه داده می شود که نتیجه پردازش، یک سری معادلات جبری برای شبکه است. با حل ضرایب موجک، ولتاژهای گره های شبکه، از طریق بازسازی سری های موجک به دست می آیند. بنابراین می توان شبکه را توسط موجک ها تحلیل کرد. همچنین کاربردهایی از تبدیل موجک در بیان مدل های جدید برای شبکه بیان شد. به طوریکه مدل خط انتقال را بر اساس تبدیل موجک گسسته بیان می کنند. ماتریس های تبدیل مودال در این روش دارای وابستگی فرکانسی هستند. اثر وابستگی فرکانسی شدید ماتریس های تبدیل مودال روی گذارهای خط انتقال، با شبیه سازی های حوزه زمان و با بکارگیری تبدیل موجک برای سیگنال ها، محاسبه می شوند. این روش امکان استفاده از ماتریس های مودال دقیق را که متغیر فرکانسی هستند، در شبیه سازی های زمانی می دهد.

#### ۵-۱۳- تشخیص جریان هجومی از جریان خطا در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت با استفاده از تبدیل موجک

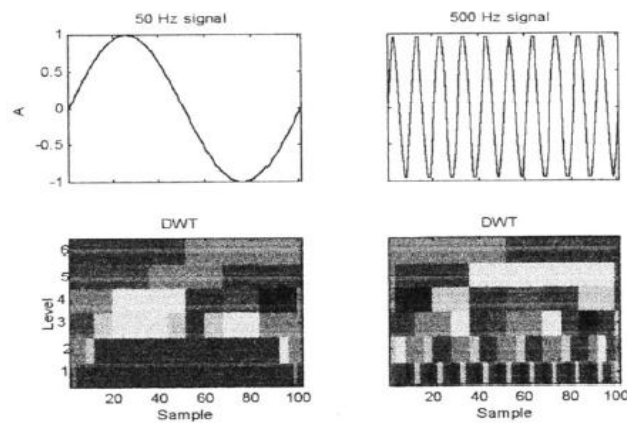
شکل موج های مرتبط با گذارهای الکترومغناطیسی معمولاً سیگنال های غیر پریودیک، با نوسانات فرکانس بالا و با خاصیت اضافه شدن پالسی روی فرکانس و هارمونیک های سیستم قدرت هستند. این مشخصه ها یک مشکل را برای تبدیل فوریه گسسته معمولی (DFT) ایجاد می کنند. چون این تبدیل برای سیگنال های پریودیک است و بیان سیگنال با استفاده از DFT بهترین روش برای سیگنال های پریودیک است. ولی برای اغتشاشات سیستم قدرت که دارای مؤلفه های گذرا و غیر پریودیک هستند، ناکافی است.

اگر سیگنال در لحظه قرارگیری در زمان تغییر کند، یعنی متغیر با زمان باشد، طیف فرکانسی آن می تواند تحت تأثیر قرار بگیرد. برای کاهش اثر سیگنال های غیر پریودیک تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) استفاده می شود. تبدیل فوریه زمان کوتاه، یک پنجره انتقال زمانی پیوسته و با تناوب محلی را در نظر می گیرد که پرود زمانی هر پنجره، رزولوشن فرکانسی را ایجاد می کند. البته این

تبدیل ویژگی های زمانی گذارها را روی یک تقسیم فرکانسی ثابت قرار می دهد. در حالیکه تبدیل موجک نه تنها سیگنال را در واحد چند جمله ای مثلثاتی قرار نمی دهد، بلکه این تبدیل یک انتقال (شیفت در زمان) و مقیاس دهی (فشرده گی یا گسترده گی) را توسط یک تابع موجک ثابت که تابع موجک مادر نامیده می شود، ایجاد می کند. تابع موجک در زمان و فرکانس قرار داده می شود و ضرایب موجک را در مقیاس های مختلف ایجاد می کند. تبدیل موجک یک حفاظت فشرده تری را برای سیگنال های با مؤلفه های گذرا ایجاد می کند. خروجی تبدیل موجک گسسته می تواند در دو بعد بیان شود ( مشابه رفتار تبدیل فوریه زمان کوتاه ولی با تقسیمات کاملاً متفاوت در زمان و فرکانس).

تابع پنجره تبدیل موجک، برای فرکانس های بالا باریک و برای فرکانس های پایین گسترده تر است. در مقایسه با تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل موجک می تواند مؤلفه های گذرا را در فرکانس های بالاتر ایزوله شده، در قسمت کوتاهی از سیکل فرکانس قدرت، جداسازی کند. در تبدیل موجک گسسته یک تصویر زمان فرکانسی از سیگنال تحلیل شده ایجاد می شود. طرح زمان فرکانس یک فضای دو بعدی است که برای بیان دو خاصیت مهم سیگنال های گذرا، یعنی قرار گیری در زمان پدیده های گذرا و بیان فرکانس های خاص موجود در آن ها مفید است. در این تبدیل سیگنال به دو قسمت زمان- فرکانس رسم شده، روی طرح تقسیم می شود. موقعیت قطعه ها زمان را نشان می دهد، در حالیکه دامنه با سایه اندازی مشخص می شود [۵۳].

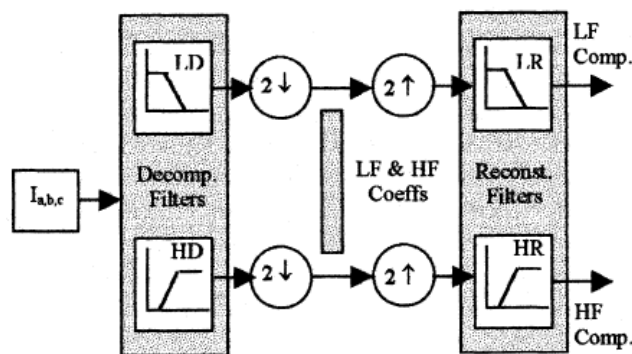
همانطور که در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است، دو موج سینوسی با فرکانس  $5 \text{ Hz}$  و  $500 \text{ Hz}$  نشان داده شده است. تبدیل موجک گسسته با تکه های زمان- فرکانسی بیان می شود و تابع موجک مادر (db4) در فرکانس های پایین (سطح ۶) گسترده و در فرکانس های بالا (سطح ۱) فشرده می شود. بنابراین برای به دست آوردن مؤلفه های فرکانس پایین سیگنال از یک پنجره بزرگ استفاده می شود، در حالیکه پنجره کوچک گسستگی را نشان می دهد [۵۳].



شکل (۵-۱۸) قرارگیری زمان-فرکانس تبدیل موجک برای دو موج سینوسی [۵۳]

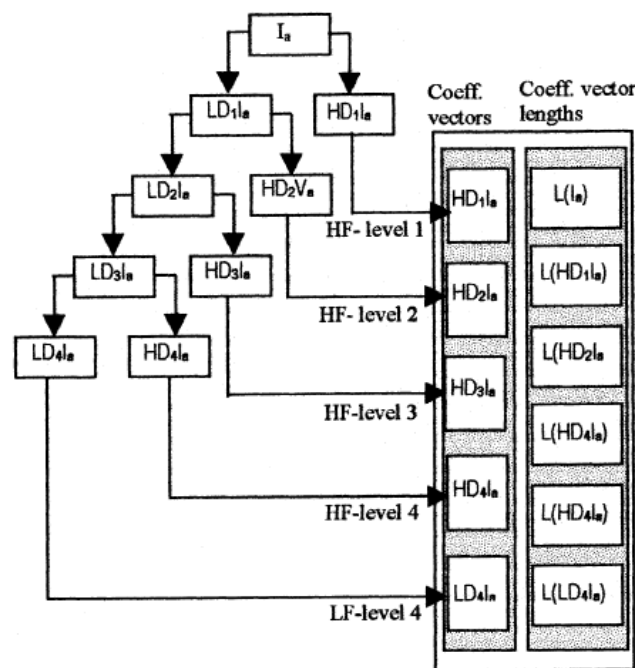
قابلیت تبدیل موجک برای تمرکز با فاصله زمانی کوتاه برای مؤلفه های فرکانسی بالا و فاصله زمانی بلند مدت برای مؤلفه های فرکانسی پایین، توانایی تحلیل آن را برای سیگنال هایی با خواص پالسی و نوسانی نشان می دهد. به همین دلیل تبدیل موجک برای سیگنال های گذرا مطلوب است و مشخصه های جریانی بهتر و با قابلیت اطمینان بیشتری را برای تشخیص، در اختیار قرار می دهد.

روند تجزیه تک سطحی سیگنال جریان ( $I_a$ ) شامل عبور سیگنال جریان از دو فیلتر مکمل (کانولوشن سیگنال با ضرایب فیلتر) است که فیلترهای تجزیه پایین گذر (LP) و بالاگذر (HP) نامیده می شوند. سپس کاهش نرخ نمونه برداری از ضرایب حاصل، منجر به آن می شود که این مؤلفه ها به صورت دو مؤلفه فرکانس بالا و فرکانس پایین پدیدار شوند. این روند تجزیه در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۹) روند تجزیه تک سطحی و بازسازی آن [۵۳]

فیلترهای تجزیه و بازسازی، فیلترهای آینه ای تریبویی<sup>۱</sup> را شکل می دهند و در ارتباط با فیلتر مقیاس گذاری هستند. در تحلیل موجک چند سطحی روند تجزیه با گردش تکراری مؤلفه های فرکانس پایین تکرار می شود، تا اینکه سیگنال به بسیاری مؤلفه های تجزیه شده در سطوح پایین تر شکسته می شود. روند تجزیه چند سطحی (در چهار سطح) در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده است. در این شکل LD و HD ضرایب تجزیه حاصل از فیلترهای بالا گذر و پایین گذر هستند و L طول ضرایب تجزیه حاصل از فیلتر بالا گذر است.



شکل (۵-۲۰) تجزیه چهار سطحی سیگنال جریان  $(I_a)$  [۵۳]

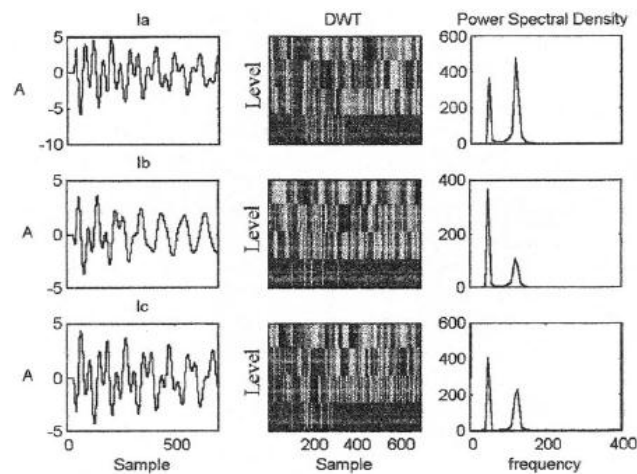
بنابراین با تجزیه سیگنال جریان به زیر سطح ها، می توان ویژگی های سیگنال را استخراج کرده و از همین خاصیت به عنوان روش تشخیصی استفاده کرد.

در روش ارائه شده در [۵۳]، یک سیستم تست به صورت یک ماشین ترانسفورماتور ساده ۱۳۲ KV / ۱۱ در نظر گرفته می شود. هر دو طرف ترانسفورماتور اتصال ستاره دارند و نقطه نوترال زمین شده است. خط انتقال شامل دو قسمت ۱۳۲KV و ۵۰Km است. در این سیستم تبدیل موجک گسسته

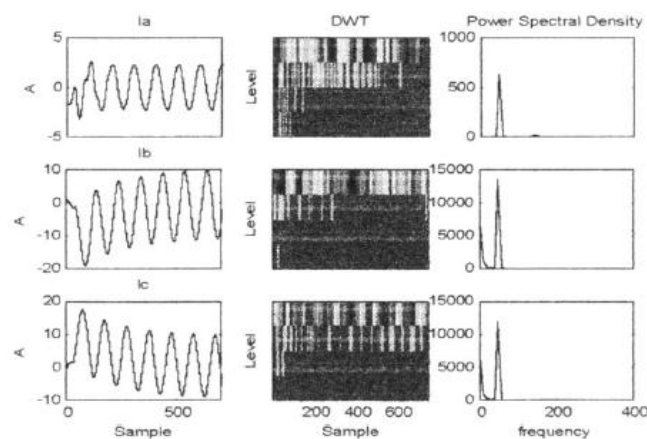
<sup>۱</sup>Quadrature Mirror Filters



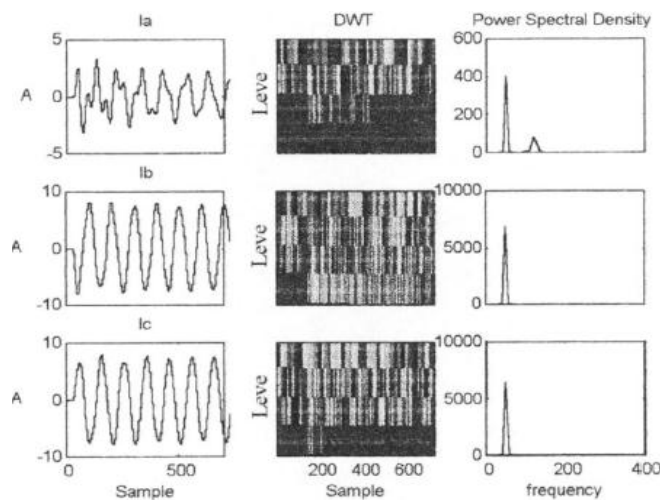
روی سیگنال های جریان ( $I_{a,b,c}$ ) در چهار سطح انجام می شود. در تمام تست ها جریان هجومی با مقدار زیادی از مؤلفه هارمونیک دوم مشخصه دهی شده است. در نمایش تبدیل موجک گسسته، مؤلفه های پالسی فرکانس بالای جریان های سه فاز خط، اگر موجود باشند، در سطح اول از تجزیه موجک گسسته ظاهر می شوند. در شکل های زیر تجزیه موجک سیگنال های جریان برای جریان هجومی، خطا و وقوع همزمان خطا و جریان هجومی نشان داده شده است. در سطوح مختلف انرژی متناظر با هر باند فرکانسی توسط دامنه و طول دوره نوسانات نشان داده شده است. تراکم انرژی در گذارها در سطح چهار مشخص می شود.



شکل (۵-۲۱) تجزیه جریان هجومی با تبدیل موجک گسسته [۵۳]

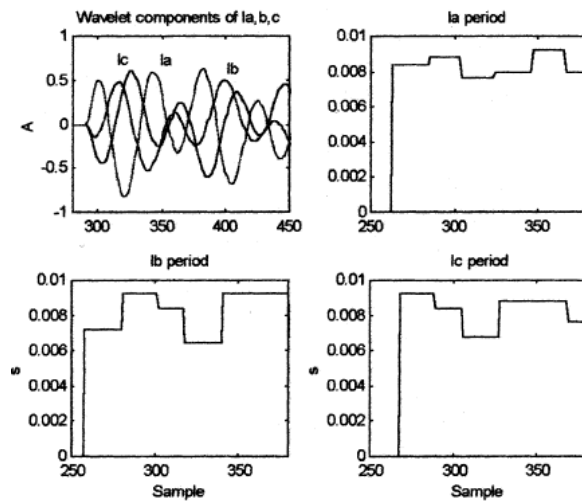


شکل (۵-۲۲) تجزیه جریان خطای دو فاز به زمین (BC-G) با تبدیل موجک گسسته [۵۳]

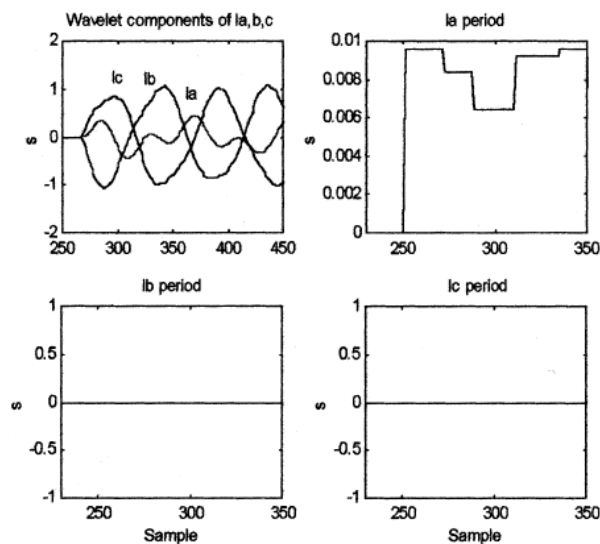


شکل (۵-۲۳) تجزیه جریان حاصل از وقوع همزمان جریان هجومی و خطای دو فاز (B-C) با تبدیل موجک گسسته [۵۳]

با آشکارسازی دو پیک یا نزول و یا دو نزول و پیک متوالی، از جریان خط  $(I_{a,b,c})$  و شمارش تعداد نمونه های بین آن ها، جریان هجومی مشخص می شود. آشکارسازی پیک با محاسبه اختلاف بین دو نمونه جریان متوالی اجرا می شود. یک تغییر علامت در نمونه جریان از مثبت به منفی یک پیک را نشان می دهد، در حالیکه یک تغییر علامت از منفی به مثبت یک نزول را نشان می دهد. در مورد جریان هجومی فقط بعد از کلیدزنی هارمونیک دوم غالب است (۲۵ نمونه در نیم سیکل). در حالیکه در حالت خطا یا شرایط بدون خطا مقدار هارمونیک دوم برای ۵۰ نمونه غالب است. الگوریتم تشخیصی به این صورت عمل می کند که اگر تعداد نمونه ها بالاتر از ۳۰ باشد، مقدار صفر را به معنی شرایط خطا صادر می کند، در حالیکه تعداد نمونه محاسبه شده کمتر از ۳۰ باشد به معنی وقوع جریان هجومی است و رله دیفرانسیل نباید عمل کند و الگوریتم به سیکل دوم انتقال داده می شود. شکل های زیر پاسخ روش پیشنهاد شده در مرجع [۵۳] را به موارد وقوع جریان هجومی و خطا و وقوع همزمان آن ها، نشان می دهند.



شکل (۵-۲۴) پاسخ الگوریتم به جریان هجومی [۵۳]



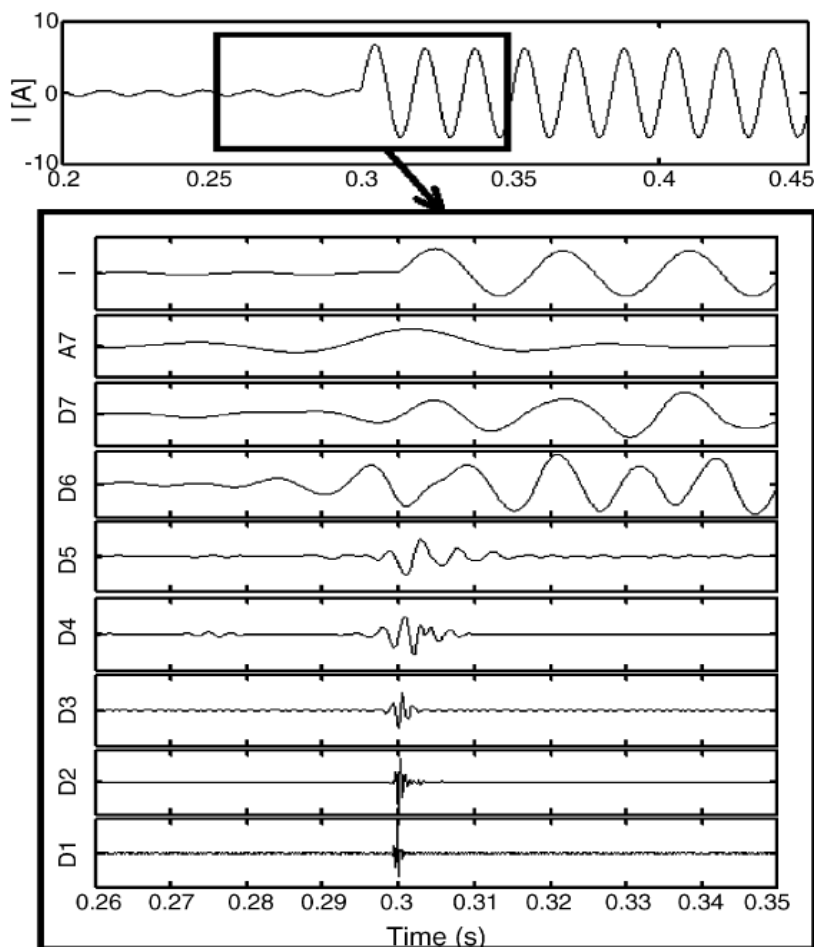
شکل (۵-۲۵) پاسخ الگوریتم به وقوع همزمان جریان هجومی و خطا (B-C) [۵۳]

به این ترتیب با استفاده از الگوریتم حاصل جریان هجومی از جریان خطای داخلی تشخیص داده می شود.

در روش استفاده شده در مرجع [۶۳] از تفاوت شکل موج های جریان هجومی و جریان خطا برای آموزش شبکه عصبی استفاده می شود. بر این اساس از دو ویژگی استفاده می شود.

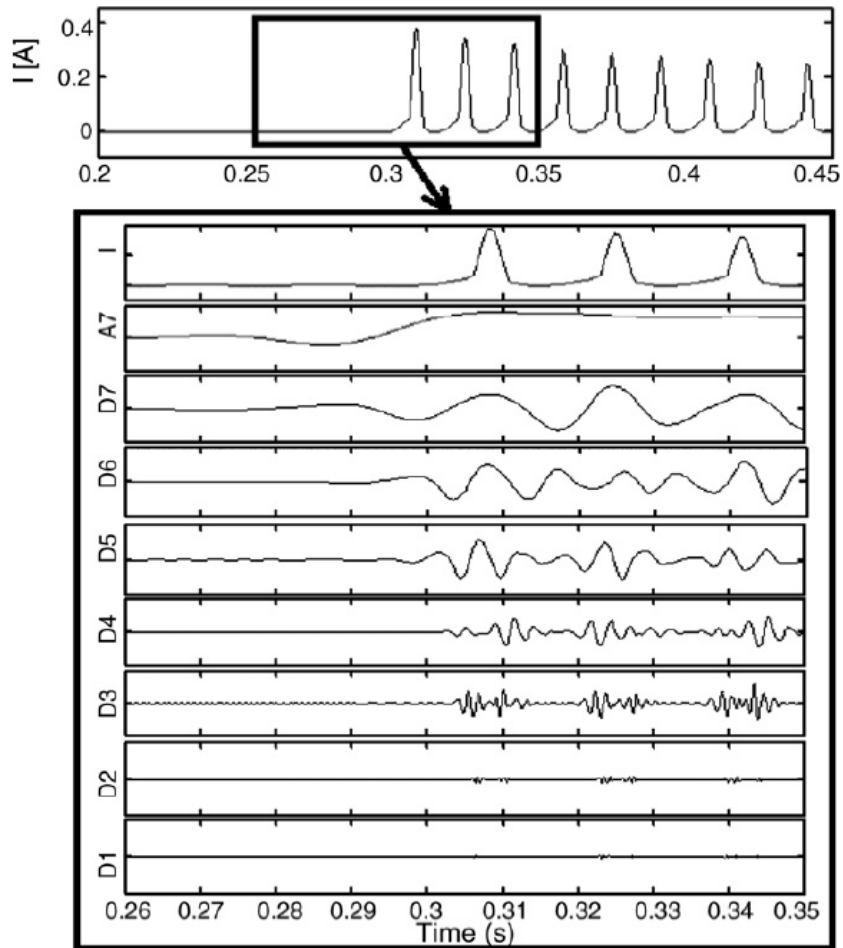
- جریان تفاضلی در مورد جریان خطا از یک شیب زیاد شروع شده و سپس شیب آن کاهش می یابد. در حالیکه در جریان هجومی، شیب جریان تفاضلی از یک مقدار کمتر به مقداری بیشتر افزایش می یابد.

- شیب بالاتر در حوزه زمان، نشان دهنده فرکانس های بالا در حوزه فرکانس سیگنال است. بر اساس موارد بیان شده انتظار می رود که دامنه فرکانس های بالا، در جریان خطای داخلی در لحظات اولیه حالت کاهشی دارد. این حالت در شکل (۵-۲۶) نشان داده شده است. شکل (۵-۲۶) ضرایب جزئیات سطوح یک تا پنج برای جریان خطای دو فاز به زمین ترانسفورماتور و سطوح فرکانسی مختلف آن را نشان می دهد. در مرجع [۶۳] از موجک مادر دابلیوز (db9) استفاده شده است. ویژگی های بیان شده در ضرایب جزئیات سطح پنجم مشخص است.

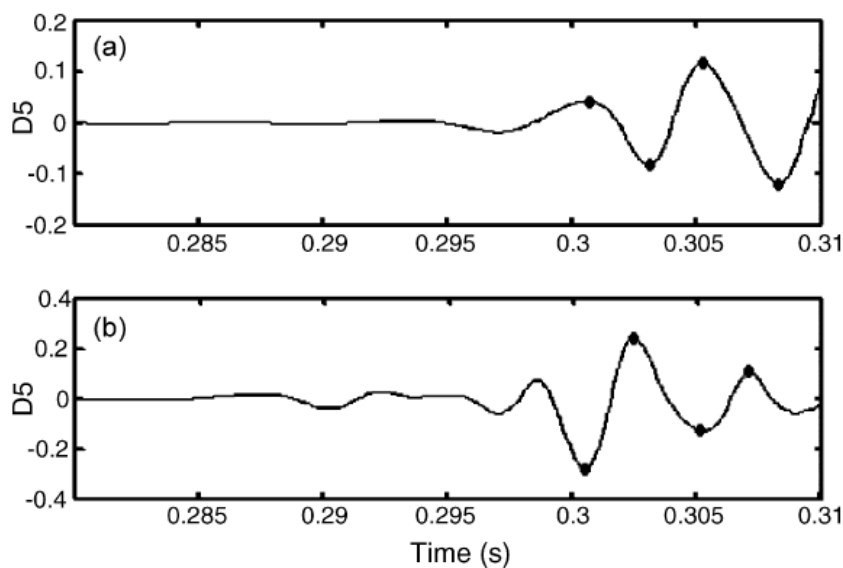


شکل (۵-۲۶) جریان خطای دو فاز به زمین و ضرایب تبدیل موجک آن [۶۳]

همچنین تجزیه جریان هجومی به پنج سطح در شکل (۵-۲۷) نشان داده شده است. در شکل (۵-۲۸) ضرایب جزئیات در سطح پنجم، در مورد جریان خطا و جریان هجومی نشان داده شده است. طبق این شکل جریان هجومی دارای حالت افزایشی و جریان خطا روند کاهشی دارد.



شکل (۵-۲۷) جریان هجومی و ضرایب تبدیل موجک آن [۶۳]

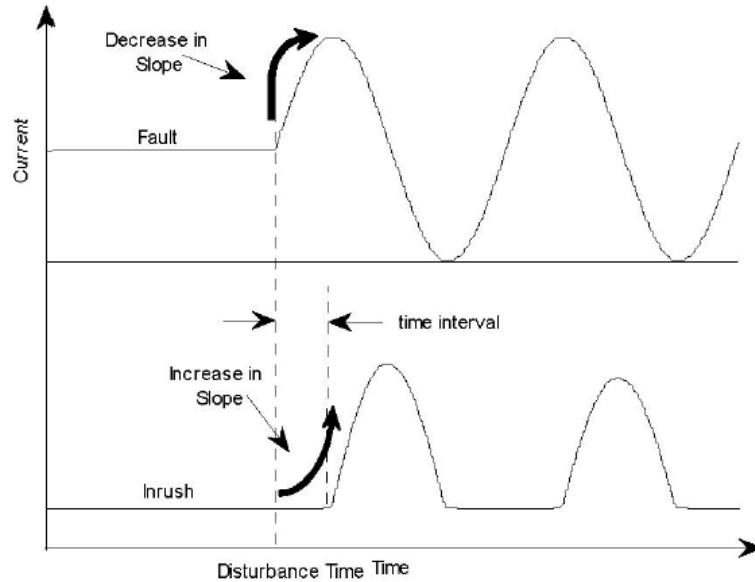


شکل (۵-۲۸) ضرایب جزئیات سطح پنجم در (a) جریان هجومی، (b) جریان خطا [۶۳]

بنابراین در روش تشخیص ارائه شده در مرجع [۶۳] ورودی های الگوریتم آموزشی، ماکزیمم مقادیر ضرایب جزئیات سطح پنجم می باشد. بر اساس شکل (۵-۲۸)، چهار مقدار اول موجود در ضرایب جزئیات سطح پنجم که دارای ماکزیمم دامنه می باشند، برای ورود به الگوریتم آموزش کافی می باشند. بر طبق این روش در صورتی که ماکزیمم این مقادیر حالت کاهشی داشته باشند، الگوریتم تشخیص، سیگنال اغتشاش را جریان خطای داخلی و در صورتی که حالت افزایشی داشته باشند، آن را جریان هجومی ترانسفورماتور در نظر می گیرد.

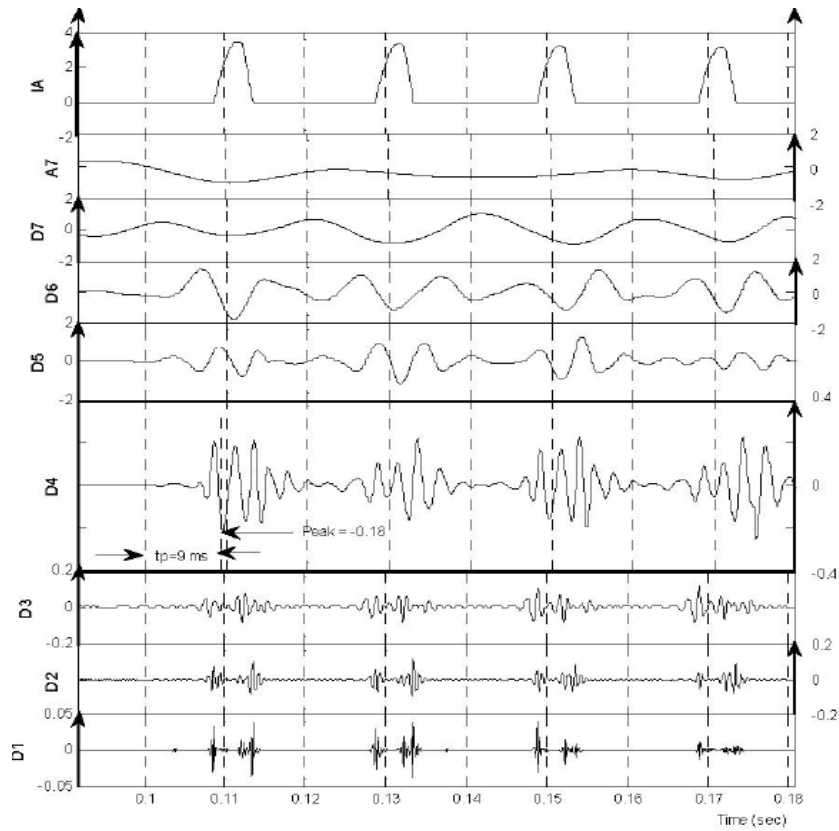
روش دیگر تشخیص جریان هجومی با استفاده از تبدیل موجک، در مرجع [۵۴] بیان شده است. اساس این روش تشخیص مانند روش بیان شده در مرجع [۶۳] می باشد. بر اساس ویژگی های شکل موج های جریان هجومی و جریان خطای داخلی ترانسفورماتور، در زمان کلیدزنی ترانسفورماتور، جریان هجومی در ابتدا به صورت آهسته افزایش می یابد. سپس شیب شکل موج جریان هجومی به تدریج افزایش یافته و بعد از گذشت چند نمونه از سیگنال جریان، سرعت افزایش شیب آن زیاد می شود. درحالیکه در هنگام وقوع جریان هجومی، شیب سیگنال جریان زیاد بوده و با گذشت زمان،

کاهش می یابد. در شکل (۵-۲۹) اختلاف بین شکل موج جریان هجومی و جریان خطا نشان داده شده است.

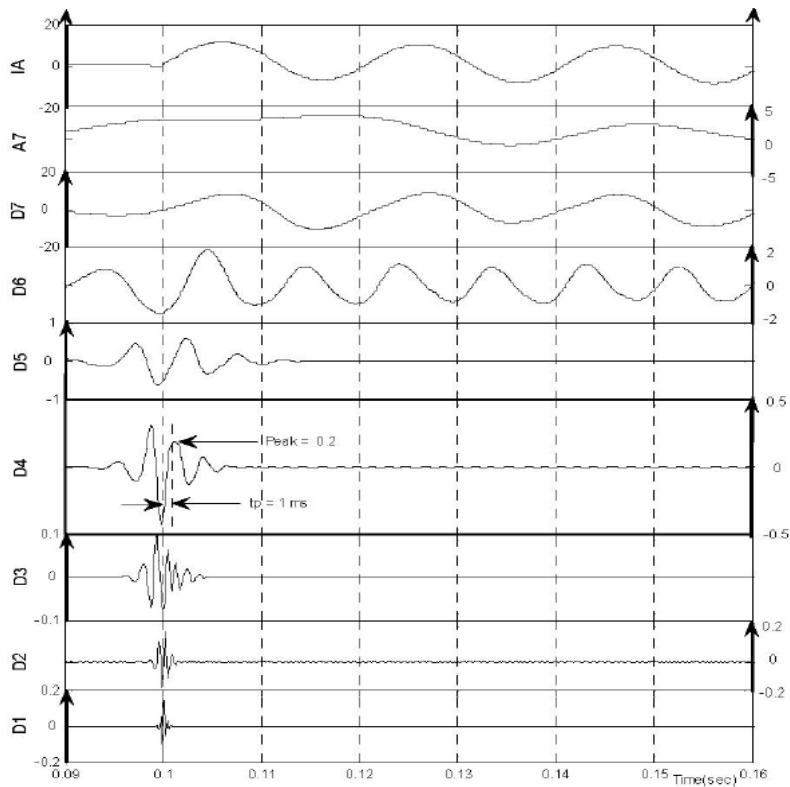


شکل (۵-۲۹) ویژگی جریان هجومی و جریان خطا [۵۴]

نتایج حاصل از شبیه سازی در این مقاله نشان می دهند که ویژگی های بیان شده، در تبدیل موجک دایبیز، در ضرایب جزئیات سطح چهارم ظاهر می شود. شکل های (۵-۳۰) و (۵-۳۱) تجزیه جریان های هجومی و خطا را با استفاده از تبدیل موجک نشان می دهد.



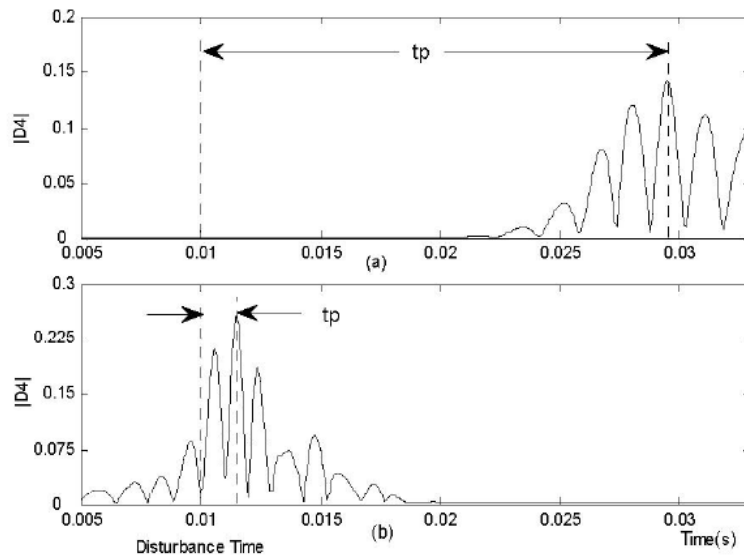
شکل (۵-۳۰) سطوح فرکانسی جریان هجومی [۵۴]



شکل (۵-۳۱) سطوح فرکانسی جریان خطای دو فاز به زمین [۵۴]



با توجه به شکل ها، فاصله زمانی بین شروع اغتشاش و ماکزیمم مقدار مؤلفه جریان در ضرایب جزئیات سطح چهارم ملاک تشخیص قرار می گیرد. شکل (۵-۳۲) فاصله زمانی بین شروع اغتشاش و ماکزیمم مؤلفه ضرایب جزئیات تبدیل موجک را به ازای سیگنال های جریان خطا و هجومی نشان می دهد.

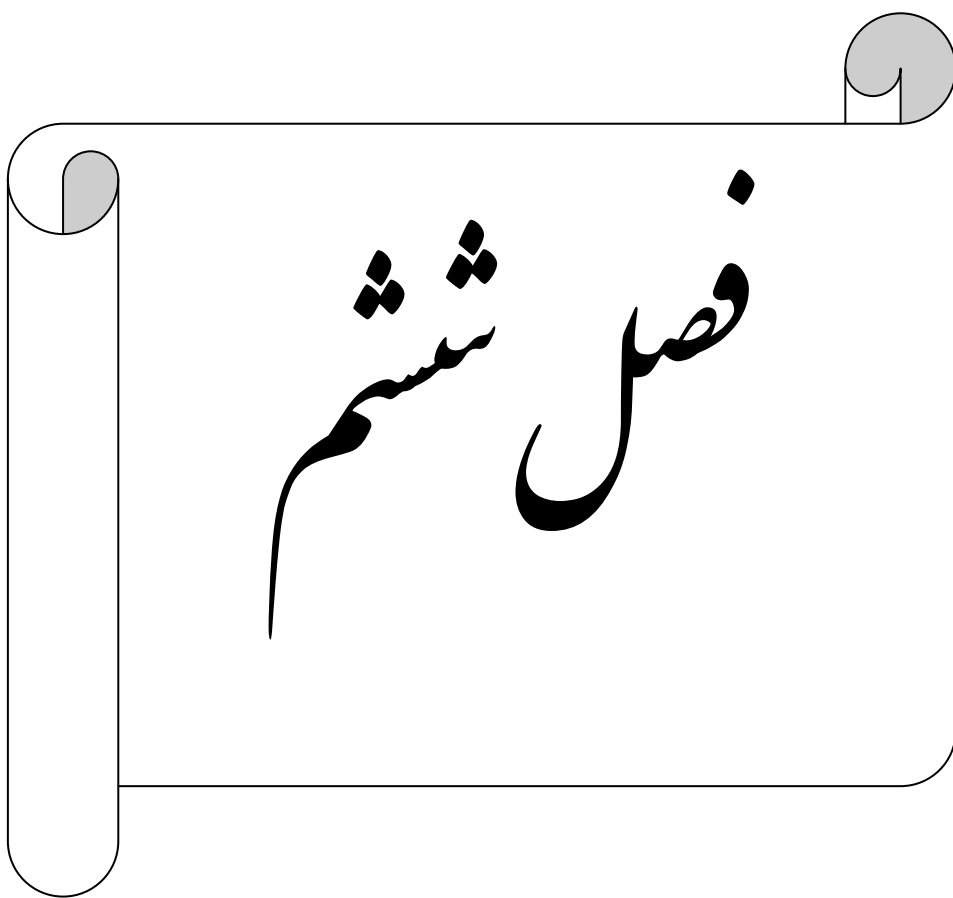


شکل (۵-۳۲) فاصله زمانی برای (a) جریان هجومی و (b) خطا [۵۴]

طبق شکل (۵-۳۲) یک مقدار آستانه برای فاصله زمانی تعریف شده تعیین می گردد. در مورد جریان هجومی فاصله زمانی تعریف شده از آستانه تعیین شده و فراتر رفته در در مورد جریان هجومی این فاصله زمانی از آستانه تعیین شده کمتر خواهد بود و این تفاوت معیار تشخیص جریان هجومی قرار می گیرد.

## ۵-۱۴- جمع بندی

در فصل بیان شده مروری بر روش های پردازش و تبدیل موجک سیگنال انجام شد. همچنین کاربرد تبدیل موجک در سیستم قدرت و به ویژه حفاظت سیستم قدرت مطرح گردید. برای داشتن یک دید کلی از کاربرد تبدیل موجک در تشخیص جریان هجومی، یک روش مورد استفاده برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور با استفاده از تبدیل موجک توضیح داده شد. در فصل بعد الگوریتم پیشنهادی در این پایان نامه برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطا در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ارائه می شود و الگوریتم حاصل بر روی یک سیستم قدرت نمونه و یک ترانسفورماتور واقعی تست می شود.



ارائه روش پیشنهادی تشخیص جریان بحومی و بیان نتایج

پس از آشنایی مختصر با روش تبدیل موجک و کاربرد حفاظت دیفرانسیل در ترانسفورماتور قدرت و خطای حاصل از جریان هجومی وصل در ترانسفورماتور، در این فصل روش تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی بیان و شبیه سازی آن ارائه می شود.

در فصل چهارم به طور مختصر تعدادی از روش های تشخیص جریان هجومی بیان و در مورد آن ها توضیح داده شد. قابل ذکر است که روش هایی مانند استفاده از هارمونیک دوم [۱۳، ۱۴]، میزان تشابه بین شکل موج ولتاژ و جریان [۱۷]، روش تشخیص بر اساس توان تفاضلی [۱۸]، تابع مشتق دوم جریان های تفاضلی [۱۹]، استفاده از یک معیار جدید بر اساس هارمونیک دوم [۲۰]، روش زاویه مرده [۲۱]، استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی [۲۲]، روش مبنی بر ولتاژ القایی [۵۵]، تبدیل مودال شکل موج های ولتاژ و جریان [۵۶]، تکنیک مبنی بر اندوکتانس نشستی [۵۷]، روش مبنی بر فاصله بین دو پیک متوالی از جریان تفاضلی [۵۸]، روش انتگرالی [۵۹]، روش مدلسازی ترانسفورماتور [۶۰]، روش هارمونیک سوم مجازی [۶۱]، دارای مزایا و معایبی می باشند. تأخیر بیش از حد در زمان تشخیص، وابستگی به هارمونیک دوم، وابسته بودن به شکل موج، نیاز داشتن به سیگنال ولتاژ علاوه بر جریان و داشتن حجم بالای محاسبات از معایب اصلی این روش ها می باشد. روش های مبنی بر هوش مصنوعی که در مراجع [۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲] اشاره شده است، بر اساس منطق فازی و شبکه عصبی می باشند. روش های مبنی بر شبکه عصبی نیاز به آموزش قوانین زیادی برای تصمیم گیری دارند که ایجاد این قوانین و آموزش شبکه نیاز به زمان زیادی دارد. علاوه بر آن این قوانین نمی توانند با تغییرات توپولوژی شبکه قدرت تطبیق یابند. از این جهت برای هر تغییر و سیستم قدرت جدید نیاز است تا قوانین جدیدی ایجاد شوند. روش های مبنی بر منطق فازی نیز به قوانین زیادی نیاز دارند که تصمیم گیری را مشکل و زمان پاسخ گویی آن را نیز آهسته می کند. روش های پردازش سیگنال که تبدیل موجک از روش های جدید آن می باشد، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است و بر اساس آن رهیافت هایی ارائه شده است [۶۲، ۶۳، ۶۴، ۶۵، ۶۶، ۶۷]. یک نمونه از روش تشخیص بر

اساس تبدیل موجک در فصل پنجم بیان شده است. وابسته بودن به مؤلفه هارمونیک دوم جریان، استفاده از سیگنال توان و نیاز داشتن به سیگنال ولتاژ برای محاسبه آن، مشکل بودن تعیین یک معیار عددی و حجم محاسبات زیاد از معایب اصلی این روش ها می باشند. بنابراین در این پایان نامه یک روش صحیح، دقیق، با قابلیت اطمینان بالا و محاسبات ساده تر بر اساس تحلیل موجک پیشنهاد می شود.

### ۲-۶- روش پیشنهادی تشخیص جریان هجومی از جریان خطا

در این قسمت روش به کار برده شده برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطا بیان می شود. ابتدا تئوری روش پیشنهادی برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطا با استفاده از توابع موجک بیان و سپس الگوریتم پیشنهادی ارائه می شود.

#### ۱-۲-۶- مبنای روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی سیگنال های جریان تفاضلی می توانند ناشی از جریان خطا یا جریان هجومی باشند. در این روش ابتدا سیگنال های جریان تفاضلی که وارد رله دیفرانسیل می شوند با یک مقدار آستانه (مقدار از پیش تعیین شده) مقایسه می شوند. این مقایسه بر اساس مشخصه عملکرد رله صورت می گیرد و برای جلوگیری از عملکرد رله در حالت نرمال و وقوع خطای خارجی شدید در ترانسفورماتور قدرت در نظر گرفته می شود. فراتر رفتن هر یک از جریان های تفاضلی از مقدار آستانه مورد نظر، نشان دهنده وقوع حالت غیر نرمال و اغتشاش در سیستم است که در این حالت باید بررسی شود که این اغتشاش ناشی از کدام نوع از موارد جریان خطای داخلی ترانسفورماتور و یا جریان هجومی ناشی از اتصال ترانسفورماتور به شبکه است. بر طبق این تشخیص الگوریتم رله فرمان عملکرد رله را صادر و یا مانع از عملکرد آن می شود.

بعد از تشخیص وقوع اغتشاش در ترانسفورماتور که به سادگی صورت می‌گیرد، از جریان‌های تفاضلی تبدیل موجک گرفته می‌شود. تبدیل موجک روی پنجره‌هایی شامل سیگنال‌های جریان با ۶۴ نمونه انجام می‌شود، یعنی در هر ۶۴ نمونه از سیگنال جریان تبدیل موجک گرفته می‌شود.

از آنجائیکه سیگنال‌های سیستم قدرت و سیگنال‌های مورد مطالعه در این پایان‌نامه که شامل جریان هجومی و جریان خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت هستند، دارای خاصیت نوسانی، دوره کوتاه مدت، زمان نشست کوتاه و فرکانس بالا هستند، از موجک مادر Daubechies (db4) که برای بررسی پدیده‌های سیستم قدرت مناسب است، استفاده می‌شود [۶۸، ۶۹].

همانطور که قبلاً نیز در مورد تبدیل موجک بیان شد، تابع یا سیگنال اولیه، که در اینجا جریان تفاضلی  $(I(t))$  می‌باشد را می‌توان در تبدیل موجک به صورت یک سری از توابع بسط داده شده بر اساس توابع موجک  $(\psi(t))$  و توابع مقیاس  $(\varphi(t))$  بیان نمود [۷۰].

$$I(t) = \sum_k S_{j_0}(k) \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (1-6)$$

در این رابطه  $j_0$  سطح مقیاس اولیه و  $S_{j_0}(k)$  ضریب تقریب و  $d_j(k)$  ضرایب جزئیات در تبدیل موجک می‌باشند و  $k$  یک عدد صحیح متناهی یا نامتناهی است.

در حالت تبدیل موجک گسسته، با سیگنال ورودی گسسته روابط زیر از رابطه (۱-۶) ایجاد می‌شوند ( $n=0,1,\dots,N-1$  سیگنال ورودی گسسته می‌باشد):

$$\sum_k \varphi_{j_0,k} = \sum_n I(n) \varphi_{j_0,k}(n) \quad (2-6)$$

$$\sum_k \psi_{j,k} = \sum_n I(n) \psi_{j,k}(n) \quad (3-6)$$

تابع مقیاس موجک شامل عبارت‌های مقیاس دهی و انتقال داده شده از موجک اصلی می‌باشد که به صورت زیر است.

$$\varphi(t) = \sum_k c_k \varphi(2t - k) \quad (4-6)$$

در این رابطه  $\varphi(2t-k)$  یک جمله فشرده سازی شده از عبارت شیفت داده شده  $\varphi(t)$  در طول محور زمان، توسط پله های عدد صحیح  $k$  و با ضرایب مقیاس  $c_k$  است. انتگرال گیری از رابطه (۶-۶) نشان دهنده رابطه زیر است.

$$\sum_k c_k = 2 \quad (5-6)$$

طبق رابطه (۶-۶) معادله مقیاس دهی برای موجک دایبیز با چهار ضریب به صورت زیر است.

$$\varphi(t) = c_0 \varphi(2t) + c_1 \varphi(2t-1) + c_2 \varphi(2t-2) + c_3 \varphi(2t-3) \quad (6-6)$$

تابع موجک متناظر  $\psi(t)$  طبق رابطه زیر به دست می آید.

$$\psi(t) = \sum_k (-1)^k c_{1-k} \varphi(2t-k) \quad (7-6)$$

طبق این رابطه موجک ها و توابع مقیاس متناظر با آن ها توابعی متعامد هستند. اگر موجک ها را با تعداد ضرایب مقیاس محدود  $N_k$  در نظر بگیریم، تابع موجک به صورت زیر است.

$$\psi(t) = (-1)^k c_{N_k-1-k} \varphi(2t-k) \quad (8-6)$$

طبق روابط بالا تابع موجک متناظر به صورت زیر حاصل می شود.

$$\psi(t) = c_3 \varphi(2t) - c_2 \varphi(2t-1) + c_1 \varphi(2t-2) - c_0 \varphi(2t-3) \quad (9-6)$$

برای به دست آوردن ضرایب مقیاس دهی از رابطه (۵-۶) داریم :

$$c_0 + c_1 + c_2 + c_3 = 2 \quad (10-6)$$

همچنین برای ایجاد یک سیستم ارتونرمال رابطه زیر برقرار است.

$$c_0^2 + c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 2 \quad (11-6)$$

برای تعداد  $N_k$  ضرایب مقیاس و با تعداد سطوح تجزیه  $m$  در تبدیل موجک رابطه زیر وجود دارد :

$$\sum_{k=0}^{N_k-1} (-1)^k c_k k^m = 0 \quad (12-6)$$

طبق رابطه (۱۲-۶) با مقدار  $m=0$  داریم :

$$-c_1 + 2c_2 - 3c_3 = 0 \quad (13-6)$$

بنابراین با برقراری روابط اصلی (۶-۱۰)، (۶-۱۱) و (۶-۱۳)، برای به دست آوردن ضرایب مقیاس، این ضرایب به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$c_0 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4}, c_1 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4}, c_2 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4}, c_3 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4} \quad (۶-۱۴)$$

و یا

$$c_0 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4}, c_1 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4}, c_2 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4}, c_3 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4} \quad (۶-۱۵)$$

سری اول ضرایب برای  $\varphi(t)$  و ضرایب سری دوم مربوط به  $\varphi(-t)$  هستند. ضرایب مقیاس بالا توسط روش‌های عددی ریاضی به دست می‌آیند.

تابع مقیاس توسط ضرایب محاسبه شده Db4 و رابطه (۶-۶) به دست می‌آید. برای این منظور رابطه (۶-۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\varphi_j(t) = c_0 \varphi_{j-1}(2t) + c_1 \varphi_{j-1}(2t-1) + c_2 \varphi_{j-1}(2t-2) + c_3 \varphi_{j-1}(2t-3) \quad (۶-۱۶)$$

در این رابطه  $j$  تعداد تکرار می‌باشد. با انتخاب یک مقدار اولیه برای  $\varphi_0(t)$  مقدار  $\varphi_1(t)$  به دست می‌آید. با استفاده از  $\varphi_1(t)$  مقدار  $\varphi_2(t)$  به دست می‌آید و این روند به همین صورت تکرار می‌شود. ضرایب تقریب به صورت زیر به دست می‌آید.

$$S_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N_k-1} c_k S_{m,\gamma n+k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [c_0 S_{m,\gamma n} + c_1 S_{m,\gamma n+1} + c_2 S_{m,\gamma n+2} + c_3 S_{m,\gamma n+3}] \quad (۶-۱۷)$$

$$= 0.483 S_{m,\gamma n} + 0.837 S_{m,\gamma n+1} + 0.224 S_{m,\gamma n+2} - 0.129 S_{m,\gamma n+3}$$

سپس از حاصلضرب یک رشته چهار رقمی از سیگنال با بردار ضرایب مقیاس (فیلتر پایین‌گذر)، برای تولید ضرایب تقریب در سطح اول استفاده می‌کنیم. برای تولید ضرایب جزئیات از ضرایب مقیاس

اصلاح شده  $b_k$  (فیلترهای بالاگذر) استفاده می‌شود ( $b_k = (-1)c_{N_k-1-k}$ ).

$$d_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{N_k-1} b_k S_{m,\gamma n+k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [c_3 S_{m,\gamma n} - c_2 S_{m,\gamma n+1} + c_1 S_{m,\gamma n+2} - c_0 S_{m,\gamma n+3}] \quad (۶-۱۸)$$

$$= -0.129 S_{m,\gamma n} - 0.224 S_{m,\gamma n+1} + 0.837 S_{m,\gamma n+2} - 0.483 S_{m,\gamma n+3}$$



از آنجائیکه در این روش از پنجره‌های نمونه برداری ۶۴ نمونه‌ای برای بررسی سیگنال‌های جریان استفاده می‌شود، ماکزیمم تعداد سطوح تجزیه که می‌تواند در تبدیل موجک صورت گیرد، به صورت توانی از ۲ یعنی شش سطح است. برای روش پیشنهادی در این پایان‌نامه پنج سطح تجزیه کافی بوده و ویژگی‌ها و تفاوت‌های سیگنال جریان خطا و جریان هجومی، برای استفاده در الگوریتم پیشنهادی آشکار شده و نیاز به شش سطح تجزیه نمی‌باشد. بنابراین با گرفتن تبدیل موجک ضرایبی شامل پنج سطح از ضرایب جزئیات و یک سری ضرایب تقریب حاصل می‌شود.

در الگوریتم پیشنهادی از انرژی ضرایب جزئیات در پنج سطح تجزیه استفاده می‌شود و از ارتباط بین این ضرایب انرژی در هر پنجره با پنجره بعدی آن برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی استفاده می‌شود.

انرژی کل سیگنال در هر پنجره لغزشی شامل  $N$  نمونه سیگنال به صورت رابطه زیر می‌باشد (j شماره پنجره لغزشی می‌باشد).

$$E_j = \sum_{n=0}^{N-1} (I(n))^2 \quad (19-6)$$

بعد از تجزیه کامل سیگنال انرژی ضرایب جزئیات حاصل از تبدیل موجک در هر سطح مقیاس به صورت زیر محاسبه می‌شود (M تعداد کل سطوح تجزیه و i سطح تجزیه مورد نظر است).

$$Ed_i = \sum_{n=0}^{M-i-1} (d_{i,n})^2 \quad (20-6)$$

بنابراین انرژی کل سیگنال برابر مجموع مربعات ضرایب جزئیات به اضافه مربع ضرایب تقریب باقیمانده در سطح آخر است.

به این ترتیب یک بردار، شامل درصد انرژی ضرایب جزئیات در پنج سطح تشکیل می‌شود. این درصد انرژی ضرایب جزئیات، به صورت نسبت انرژی ضرایب موجک در آن سطح به کل انرژی سیگنال در آن پنجره لغزشی تعریف می‌شود.

$$Ed_{i,j} = \frac{Ed_i}{E_j} \quad (21-6)$$

بردار انرژی ضرایب جزئیات حاصل از تبدیل موجک در هر پنجره لغزشی به صورت زیر بیان و تشکیل می شود.

$$Ed_{i,j} = [Ed_{1,j}, Ed_{2,j}, Ed_{3,j}, Ed_{4,j}, Ed_{5,j}]^T \quad (22-6)$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5$$

در این رابطه  $i$  بیانگر شماره سطح تجزیه موجک،  $j$  نشان دهنده شماره پنجره لغزشی و  $Ed_{i,j}$  بیانگر درصد انرژی ضرایب جزئیات در سطح  $i$  و پنجره  $j$  است. بنابراین برای یک سیگنال جریان ورودی که شامل  $N$  نمونه گسسته می باشد، ماتریس بردارهای درصد انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک به صورت زیر حاصل می شود.

$$Ed = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & \dots & E_{1,j} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & \dots & E_{2,j} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & \dots & E_{3,j} \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & \dots & E_{4,j} \\ E_{51} & E_{52} & E_{53} & \dots & E_{5,j} \end{bmatrix}_{5,j} \quad (23-6)$$

از آنجائیکه پنجره های نمونه برداری شامل نمونه های ۶۴ تایی می باشند، تعداد پنجره ها در یک سیگنال  $N$  نمونه ای برابر  $j = N - 64$  است.

بعد از تشکیل بردار انرژی ضرایب تبدیل موجک در هر پنجره لغزشی از یک معیار آماری به نام ضریب همبستگی<sup>۱</sup> برای تشخیص همبستگی و ارتباط بین بردار انرژی یک پنجره و پنجره بعدی استفاده می شود. ضریب همبستگی بین دو متغیر تصادفی  $x_1$  و  $x_2$  که با  $\rho_{x_1, x_2}$  نشان داده می شود، به صورت زیر تعریف می شود [۷۱].

<sup>۱</sup> Correlation

$$\rho_{x_1, x_2} = \frac{\text{COV}(x_1, x_2)}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (24-6)$$

در این عبارت  $\sigma_1^2$  و  $\sigma_2^2$  به ترتیب واریانس  $x_1$  و  $x_2$  هستند.

اگر دو متغیر به صورت دو ماتریس با بعد یکسان باشند، در این صورت رابطه ضریب همبستگی به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho_{x_1, x_2} = \frac{\sum_a \sum_b (x_{1ab} - \bar{x}_1)(x_{2ab} - \bar{x}_2)}{(\sum_a \sum_b (x_{1ab} - \bar{x}_1)^2)(\sum_a \sum_b (x_{2ab} - \bar{x}_2)^2)} \quad (25-6)$$

در این رابطه  $a$  و  $b$  بیانگر بعد بردارها و  $x_i (i=1,2)$  نشان دهنده متوسط یا میانگین بردار  $x_i$  است. در مورد ویژگی‌های ضریب همبستگی به طور خلاصه در پیوست توضیح داده شده است. با توجه به روابط بیان شده ضریب همبستگی بین دو بردار متوالی انرژی، در هر دو پنجره متوالی لغزشی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Factor = Correlation(Ed_j, Ed_{j+1}) = \rho_{j, j+1} \quad (26-6)$$

در این رابطه  $j$  بیانگر شماره پنجره لغزشی است. به این ترتیب ضرایب همبستگی بین هر دو بردار ستونی متوالی در رابطه (23-6) محاسبه می‌شود که حاصل آن به صورت زیر بیان می‌شود ( $\rho_{j, j+1}$ ) نشان دهنده ضریب همبستگی بین هر دو بردار در ستون‌های  $j$  و  $j+1$  است).

$$Factor = [\rho_{1,2} \ \rho_{2,3} \ \rho_{3,4} \ \dots \ \rho_{j-1,j}] \quad (27-6)$$

انتظار می‌رود که این ضرایب همبستگی برای شرایط نرمال و بدون خطا برابر یک باشند. به عبارت دیگر ضرایب انرژی دو پنجره متوالی برای حالت نرمال همبسته<sup>۱</sup> باشند. این امر به دلیل شرایط آرام حالت نرمال است، که در این حالت انرژی سیگنال در لحظه‌های مختلف دارای مقدار تقریباً یکسانی می‌باشد و تغییر قابل ملاحظه‌ای در آن وجود ندارد. از طرف دیگر با بروز یک اغتشاش در سیستم قدرت مقدار این انرژی دچار یک تغییر ناگهانی می‌شود و معمولاً انرژی سیگنال در این وضعیت

<sup>۱</sup>Correlated

بیشتر از حالت نرمال است. برای شرایط جریان هجومی، با توجه به خاصیت نوسانی جریان هجومی انتظار می رود که انرژی این سیگنال جریان در طیف های فرکانسی مختلف دارای تفاوت های قابل توجه باشند. به عبارت دیگر ضرایب انرژی ضرایب جزئیات تبدیل موجک در پنجره های متوالی ناهمبسته<sup>۱</sup> بوده و دارای خاصیت نوسانی باشند. برای شرایط جریان خطا در لحظه وقوع خطا یک تغییر لحظه ای شدید در مقدار انرژی وجود داشته و بعد از آن ضرایب انرژی دارای حالت نرمال و همبسته می شوند. که از همین خاصیت برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور در حفاظت دیفرانسیل استفاده می شود. بنابراین در الگوریتم تشخیص تعداد دره ها (فرورفتگی ها) یا نوسانات موجود در ضرایب همبستگی به عنوان یک معیار تشخیص استفاده می شود. به طوریکه برای شرایط خطا فقط یک فرورفتگی در ضرایب همبستگی وجود دارد، درحالیکه برای جریان هجومی تعداد فرورفتگی ها بسیار بیشتر بوده و این فرورفتگی ها تا نشست کامل جریان هجومی ادامه می یابند.

رابطه (۶-۲۸) ملاک عملکرد روش پیشنهادی را بیان می کند.

$$\begin{cases} \text{Dips number of (Factor)} > 1 & \text{Inrush current} \\ \text{Otherwise} & \text{Fault current} \end{cases} \quad (۶-۲۸)$$

#### ۶-۲-۲- الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطا

در این قسمت بر اساس مبنای روش پیشنهادی که در بخش (۶-۲-۱) بیان شد، الگوریتم پیشنهادی ارائه می شود. شکل (۶-۱) فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد.

مراحل عملکرد الگوریتم به صورت زیر است :

<sup>۱</sup>Uncorrelated

**بلوک (۱) :** در این قسمت جریان های تفاضلی ناشی از اغتشاش در ترانسفورماتور قدرت، وارد الگوریتم پیشنهادی می شوند. این جریان ها می توانند شامل جریان های خطا و یا جریان های هجومی باشند.

**بلوک (۲) :** با استفاده از مطالب بیان شده در قسمت (۶-۲-۱) و رابطه اصلی (۶-۱) از سیگنال های جریان تفاضلی تبدیل موجک گرفته می شود. تبدیل موجک گسسته در پنج سطح انجام می شود. بنابراین در این قسمت سیگنال های جریان به یک جزء تقریب و پنج سطح جزئیات شکسته می شوند.

**بلوک (۳) :** با استفاده از رابطه (۶-۲۰) انرژی ضرایب جزئیات حاصل از تبدیل موجک در هر پنج سطح تجزیه به طور جداگانه محاسبه می شوند. سپس با استفاده از روابط (۶-۲۲) و (۶-۲۳) بردارهای انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک در پنجره های لغزشی متوالی تشکیل می گردند.

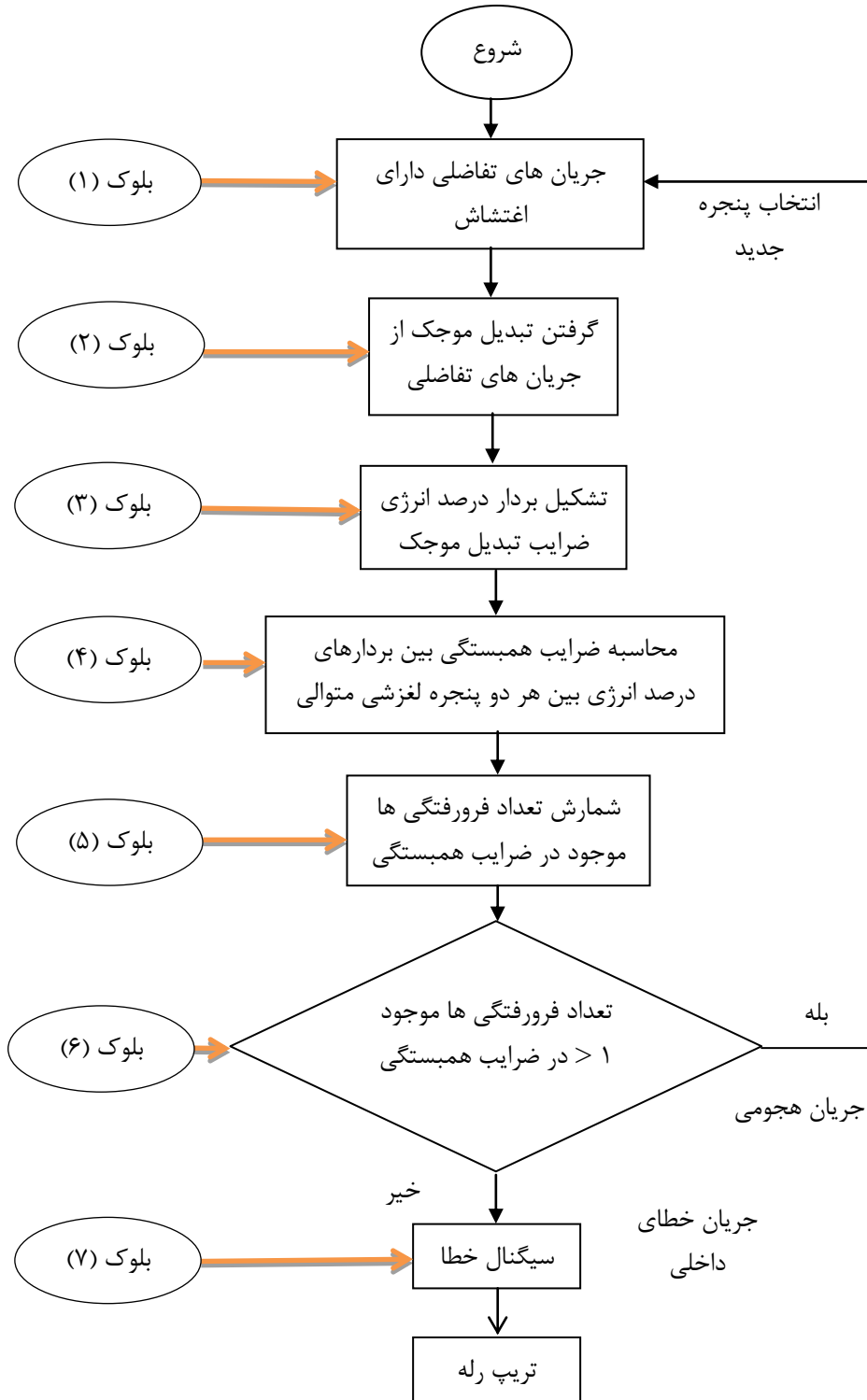
**بلوک (۴) :** در این قسمت بر اساس روابط بیان شده برای ضریب همبستگی، ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده در بلوک (۳) محاسبه می شوند.

**بلوک (۵) :** تعداد فرورفتگی ها و یا نوسانات موجود در ضرایب همبستگی، که در بلوک (۴) محاسبه شده است، تعیین می گردند.

**بلوک (۶) :** این قسمت شامل یک بلوک مقایسه است. به صورتیکه اگر تعداد فرورفتگی ها تعیین شده در بلوک (۵) از عدد یک فرورفتگی بیشتر شود، الگوریتم مربوطه اغتشاش رخ داده شده را به عنوان جریان هجومی در نظر می گیرد. در غیر این صورت سیگنال جریان، یک خطای داخلی ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود.

**بلوک (۷) :** با توجه به تشخیص انجام شده در بلوک قبل، در صورتیکه سیگنال اغتشاش مربوط به جریان هجومی ترانسفورماتور باشد، الگوریتم مربوطه مانع عملکرد رله شده و دوباره برای بررسی نمونه های بعدی سیگنال جریان به بلوک (۱) بر می گردد. اگر سیگنال اغتشاش، شامل خطای داخلی

ترانسفورماتور باشد، یک سیگنال خطا صادر می شود، که بر طبق آن رله دیفرانسیل دستور قطع ترانسفورماتور خطادار را می دهد.



شکل (۱-۶) فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

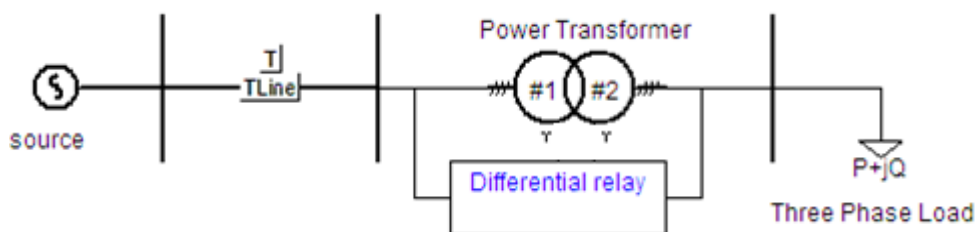
## ۳-۶- بررسی روش پیشنهادی با استفاده از نتایج شبیه سازی

در این پروژه برای شبیه سازی جریان هجومی و جریان خطای داخلی از نرم افزار PSCAD/EMTDC که نرم افزاری مناسب و قدرتمند برای بررسی پدیده های گذرا در سیستم قدرت است، استفاده می شود. سپس روش مورد استفاده و الگوریتم مربوطه در نرم افزار MATLAB برای تشخیص جریان هجومی به کار می رود. به عبارت دیگر تبدیل موجک در نرم افزار MATLAB انجام می شود.

همچنین باید ذکر شود که فرکانس نمونه برداری، برابر  $20\text{ KHZ}$  در نظر گرفته می شود که متناظر با  $400$  نمونه در هر سیکل فرکانس قدرت، برای سیستم قدرت دارای فرکانس  $50\text{ HZ}$  است.

## ۳-۶-۱- سیستم قدرت مورد مطالعه

برای بررسی صحت عملکرد روش ارائه شده از یک سیستم قدرت نمونه استفاده شده است [۶۱]. این سیستم قدرت شامل یک منبع سه فاز  $220\text{ KV}$  است که از طریق یک خط انتقال  $20\text{ Km}$  به یک ترانسفورماتور سه فاز و دو سیم پیچه  $(220/132\text{ KV}, 300\text{ MVA}, YY)$  متصل است. نقاط خنثی در اتصال ستاره در هر دو طرف ترانسفورماتور زمین شده است. همچنین ثانویه ترانسفورماتور به یک بار سه فاز  $44\text{ اهم}$  ( $44\Omega$ ) و  $0/068$  هانری ( $0/068\text{ H}$ ) متصل است. شکل زیر دیاگرام تک خطی سیستم قدرت نمونه را نشان می دهد.

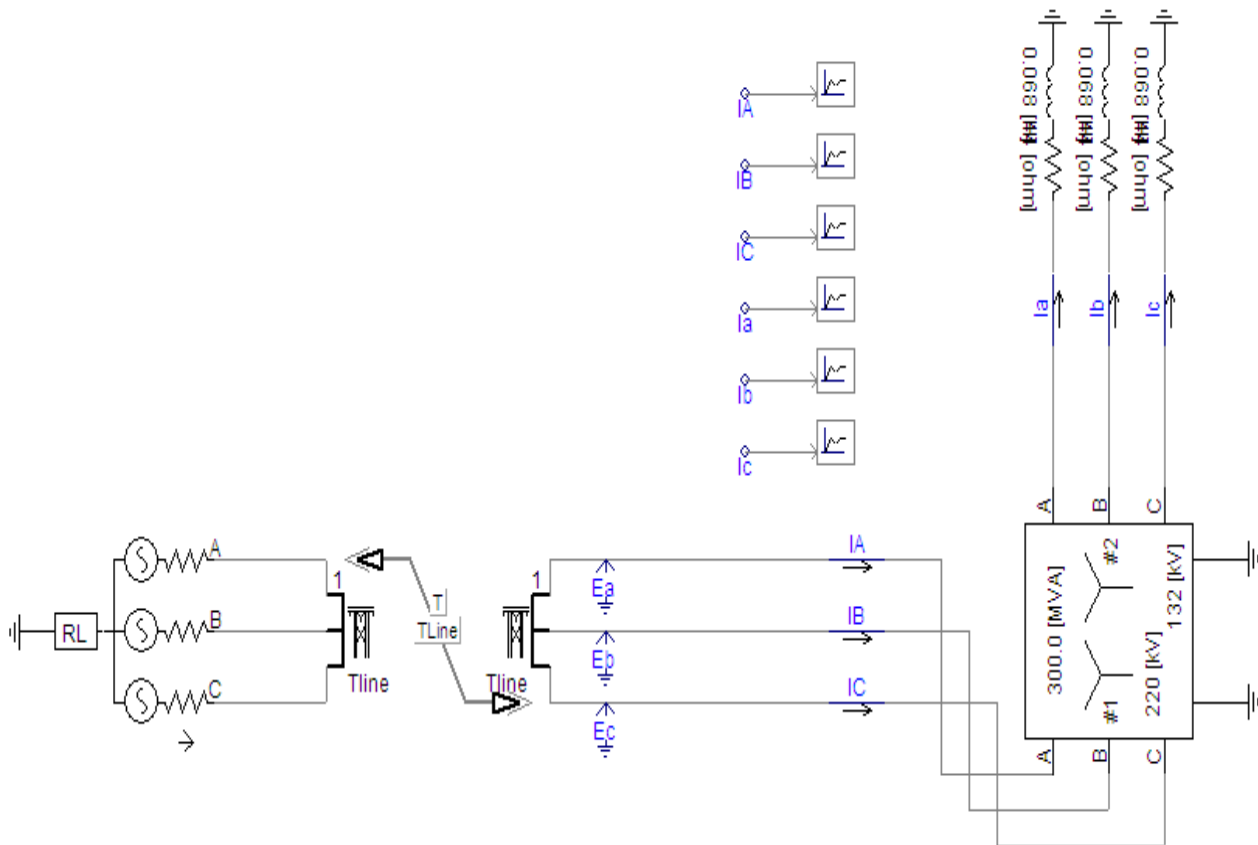


شکل (۳-۶) دیاگرام تک خطی سیستم قدرت نمونه

## ۳-۲-۳-۶- شبیه سازی سیگنال های جریان

در این قسمت سیگنال های جریان خطا و جریان هجومی در سیستم قدرت بیان شده در نرم افزار

PSCAD شبیه سازی می شوند. شکل (۳-۶) سیستم قدرت شبیه سازی شده را نشان می دهد.



شکل (۳-۶) سیستم قدرت شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD

در این سیستم از مدل ترانسفورماتور قدرت قابل اشباع استفاده می شود تا اثر جریان هجومی به درستی در نظر گرفته شود. طبق این شکل ناحیه داخل آمپرمترهای اندازه گیری جریان به عنوان ناحیه حفاظتی ترانسفورماتور قدرت در نظر گرفته می شود، به طوریکه رله دیفرانسیل خطاهای داخل این ناحیه حفاظتی را در نظر گرفته و به ازای خطاهای خارج از این ناحیه عمل نمی کند. همچنین در شبیه سازی های ارائه شده، جریان های تفاضلی که در مراحل شبیه سازی وارد الگوریتم تشخیص می شوند، به صورت زیر محاسبه می شوند [۶۱]:



$$Id_1 = (I_A - I_a) - (I_C - I_c) \quad (29-6)$$

$$Id_2 = (I_B - I_b) - (I_A - I_a) \quad (30-6)$$

$$Id_3 = (I_C - I_c) - (I_B - I_b) \quad (31-6)$$

در روابط بالا جریان های  $Id_1$ ،  $Id_2$  و  $Id_3$  به ترتیب جریان های تفاضلی مربوط به فازهای A، B و C می باشند. همچنین  $I_A$ ،  $I_B$  و  $I_C$  جریان های اولیه ترانسفورماتور و  $I_a$ ،  $I_b$  و  $I_c$  جریان های سمت ثانویه آن هستند. در مراحل شبیه سازی جریان های  $Id_1$ ،  $Id_2$  و  $Id_3$  به عنوان جریان های ورودی به الگوریتم در نظر گرفته می شوند. باید توجه نمود، تفاوتی که در حالت عادی بین مقادیر جریان های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و به دلیل نسبت تبدیل ترانسفورماتور وجود دارد، با ضرب نمودن جریان ثانویه ترانسفورماتور در عکس نسبت تبدیل ترانسفورماتور تصحیح می شود. در عمل این کار توسط ترانسفورماتورهای اندازه گیری جریان، انجام می گیرد.

شبیه سازی بر طبق الگوریتم پیشنهادی در شکل (6-1) انجام می گیرد. در این الگوریتم دو حالت مستقل در نظر گرفته می شود. در حالت اول جریان خطای داخلی ترانسفورماتور و در حالت دوم جریان هجومی ترانسفورماتور، شبیه سازی می شوند و مورد تحلیل قرار می گیرند. مراحل شبیه سازی بر طبق الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر است :

۱- ایجاد سیگنال های اغتشاش : در این مرحله سیگنال های جریان حاصل از خطای داخلی ترانسفورماتور و جریان هجومی، با نظر گرفتن حالت های خطا و کلیدزنی در ترانسفورماتور سیستم قدرت شبیه سازی شده، به دست می آیند.

۲- محاسبه جریان های تفاضلی : طبق روابط (6-29)، (6-30) و (6-31)، جریان های تفاضلی ورودی الگوریتم ( $Id_1$ ،  $Id_2$ ،  $Id_3$ ) محاسبه می شوند.

۳- تعیین پنجره لغزشی : در این مرحله سیگنال های جریان تفاضلی به صورت پنجره های لغزشی ۶۴تایی در نظر گرفته می شوند. به طوریکه در هر مرحله از تکرار الگوریتم، یک نمونه جدید به پنجره لغزشی اضافه شده و این پنجره در طول محور زمان حرکت داده می شود.

۴- گرفتن تبدیل موجک : در این مرحله با استفاده از تبدیل موجک، با تابع موجک مادر دابیچرز، از پنجره های لغزشی متوالی، در پنج سطح تبدیل موجک گرفته می شود. قابل ذکر است که چون پنجره های لغزشی شامل ۶۴ نمونه گسسته است، حداکثر تعداد سطوح تجزیه برابر شش سطح است. ولی از آنجائیکه ویژگی های مورد نظر سیگنال در پنج سطح تجزیه مشخص می شود، نیازی به تجزیه در سطوح بعد نبوده و معیار تشخیص با استفاده از این پنج سطح قابل تعیین است.

۵- تشکیل بردار درصد انرژی ضرایب جزئیات حاصل از تبدیل موجک : انرژی ضرایب جزئیات تبدیل موجک محاسبه شده و بردارهایی شامل این مقادیر انرژی، به ازای پنجره های لغزشی متوالی تشکیل می گردد (طبق روابط (۶-۲۲) و (۶-۲۳)).

۶- محاسبه ضرایب همبستگی : ضرایب همبستگی بین بردارهای درصد انرژی، که در مرحله قبل تشکیل شده اند، محاسبه می گردند.

۷- تعیین تعداد فرورفتگی ها : در این مرحله تعداد فرورفتگی ها یا نوسانات موجود در ضرایب همبستگی، تعیین می گردد.

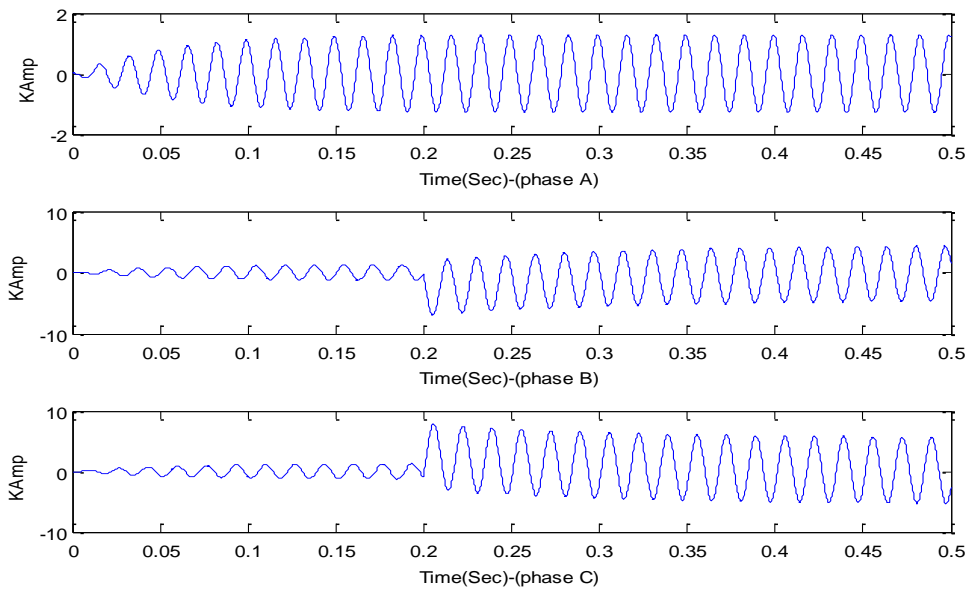
۸- تشخیص نوع سیگنال اغتشاش : اگر تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی، بالاتر از یک فرورفتگی باشد، اغتشاش رخ داده شده یک جریان هجومی در نظر گرفته شده و در غیر این صورت به عنوان خطای داخلی در نظر گرفته می شود.

### ۶-۳-۳- شبیه سازی و تحلیل جریان خطای داخلی ترانسفورماتور

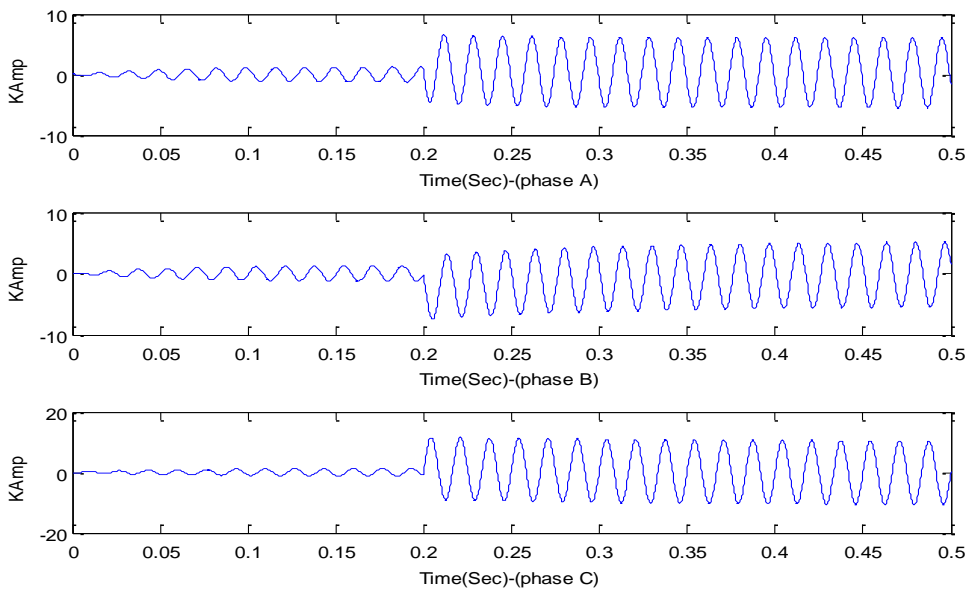
برای بررسی جریان خطای داخلی ترانسفورماتور و عملکرد روش ارائه شده بر روی آن سه حالت جریان خطای تک فاز ( فاز B) به زمین، خطای دو فاز ( فازهای B و C) به زمین و خطای سه فاز به زمین در نظر گرفته می شود. محل وقوع خطاها در ثانویه ترانسفورماتور قدرت و در داخل ناحیه حفاظتی در نظر گرفته می شوند. زمان شروع خطا در ۰/۲ ثانیه و مدت زمان تداوم آن ۰/۳ ثانیه در نظر گرفته می شود.

الف) جریان های خطا برای هر سه نوع خطای شبیه سازی شده

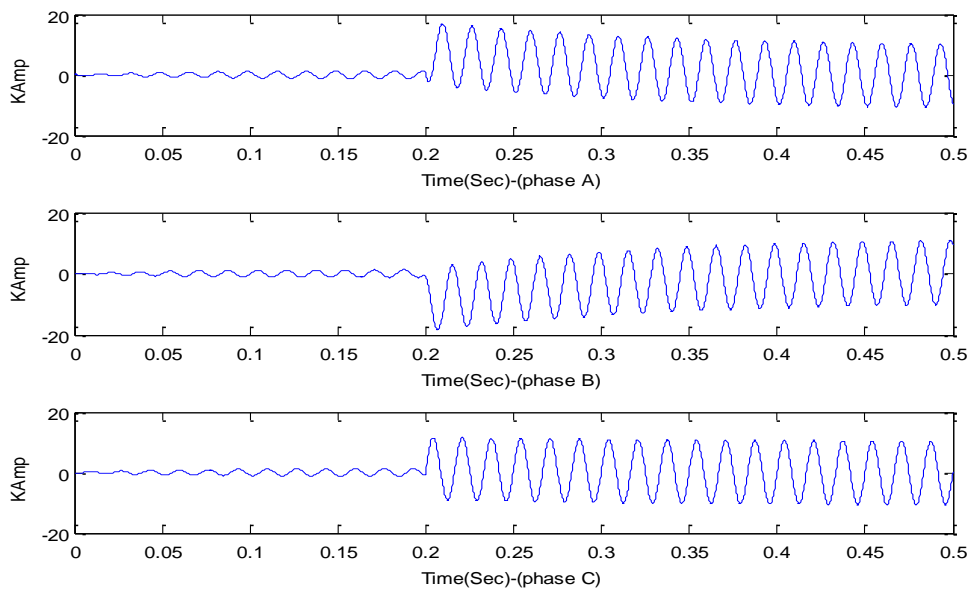
در این قسمت سیگنال های تفاضلی جریان های خطای شبیه سازی شده، در شکل های (۴-۶)، (۵-۶) و (۶-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۶) جریان خطای تک فاز به زمین

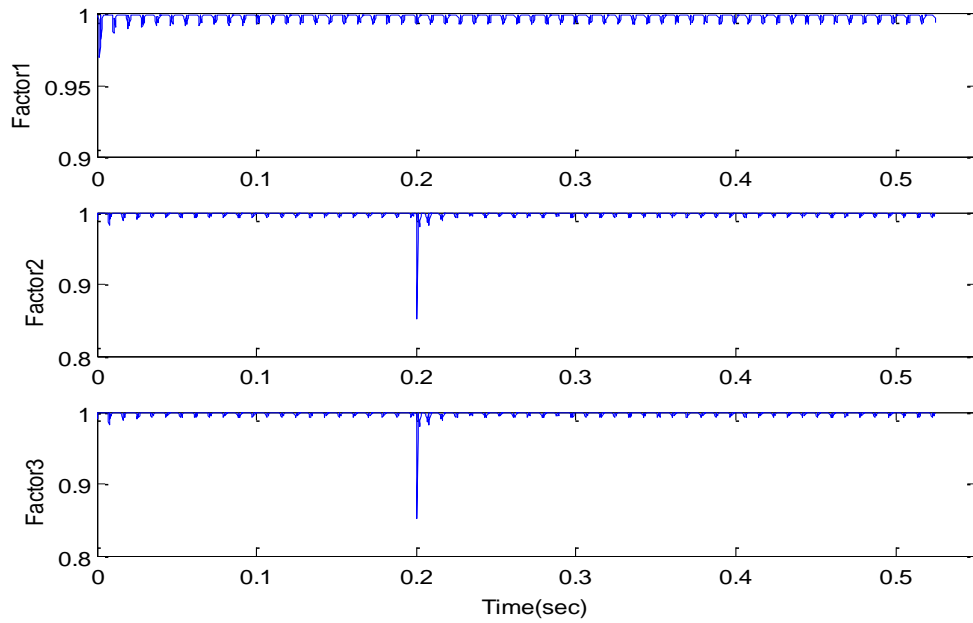


شکل (۵-۶) جریان خطای دو فاز به زمین

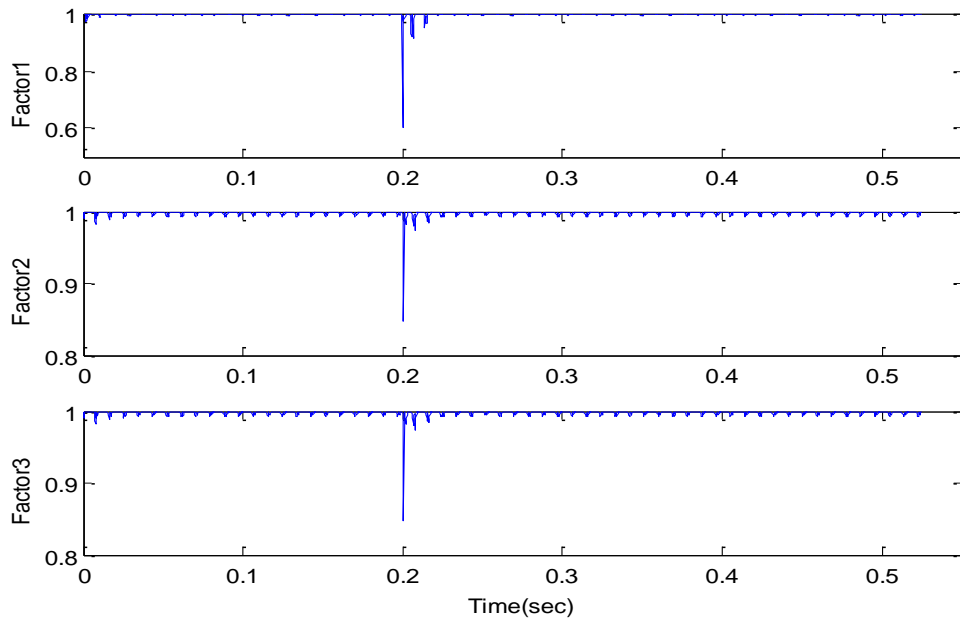


شکل (۶-۶) جریان خطای سه فاز به زمین

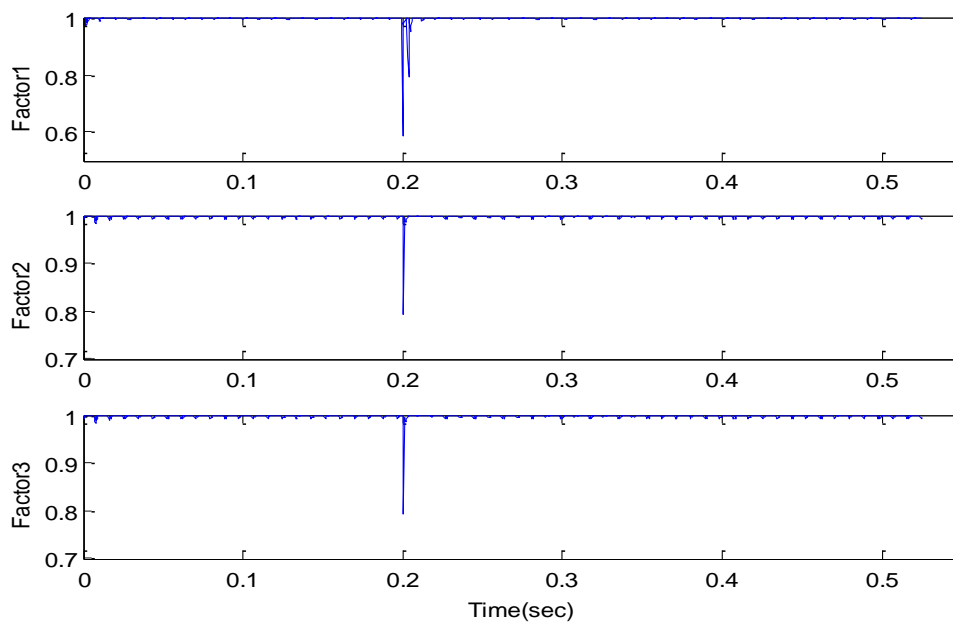
ب) محاسبه ضرایب همبستگی بین بردارهای درصد انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک در این مرحله جریان‌های تفاضلی محاسبه شده وارد نرم افزار MATLAB شده و تبدیل موجک روی آن‌ها اعمال می‌شود. بعد از به دست آوردن ضرایب تبدیل موجک و تشکیل بردار انرژی این ضرایب در پنج سطح برای هر پنجره لغزشی، همانطور که بیان شد، ضریب همبستگی بین این بردارها برای هر پنجره متوالی ۶۴ تایی از جریان‌ها محاسبه می‌شود که شکل‌های (۶-۷)، (۶-۸) و (۶-۹) این ضرایب همبستگی را برای جریان‌های تفاضلی سه فاز نسبت به زمان نشان می‌دهند. در این شکل‌ها عناوین Factor1، Factor2 و Factor3، به ترتیب مربوط به برای جریان‌های تفاضلی فازهای A، B و C هستند.



شکل (۶-۷) ضرایب همبستگی برای خطای تک فاز به زمین



شکل (۶-۸) ضرایب همبستگی برای خطای دو فاز به زمین



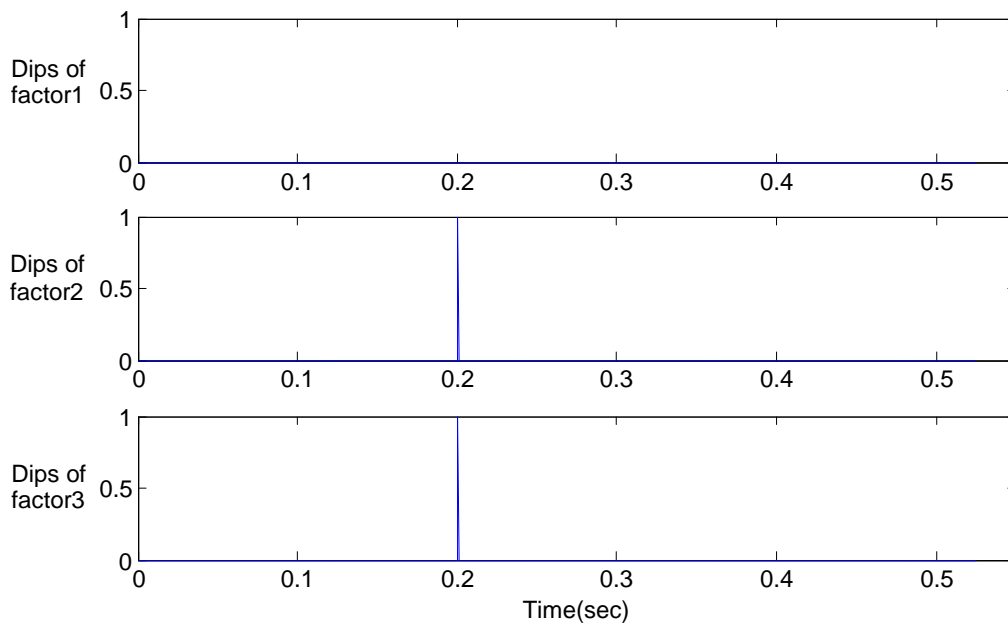
شکل (۶-۹) ضرایب همبستگی برای خطای سه فاز به زمین

همانطور که از شکل ها نیز مشخص است، مقدار ضریب همبستگی برای حالت نرمال برابر یک است. بعد از وقوع خطا یک کاهش و فرورفتگی در مقدار ضریب همبستگی دیده می شود که ناشی از یک تغییر لحظه ای شدید در مقدار انرژی ضرایب تبدیل موجک می باشد. در لحظات بعد از وقوع خطا مقدار ضریب همبستگی به مقدار یک بر می گردد. این حالت در تمام جریان های تفاضلی سه فاز و برای تمام انواع خطا های تک فاز، دو فاز و سه فاز رخ می دهد. در جریان تفاضلی فاز A در حالت خطای تک فاز به زمین مقدار نوسان لحظه ای در ضریب همبستگی مشاهده نمی شود که این امر به این دلیل است که این فاز متناظر با جریان های تفاضلی فازهای سالم است و جریان خطا در آن دیده نمی شود و به همین دلیل در این جریان مقدار ضریب همبستگی همواره متناظر با حالت نرمال و بدون خطای ترانسفورماتور یعنی مقدار یک است.

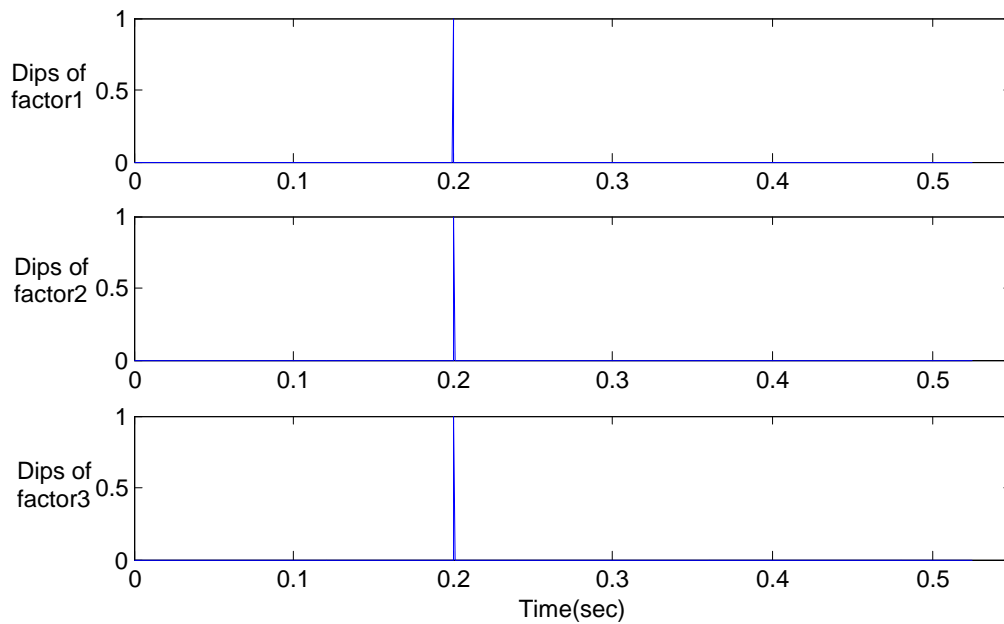
### ج) تعیین تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی

با توجه به نتایج بیان شده در الگوریتم تشخیص و شکل های قسمت (ب) می توان تعداد فرورفتگی ها ایجاد شده در ضرایب همبستگی را محاسبه نموده و از آن به عنوان یک معیار تشخیص، استفاده

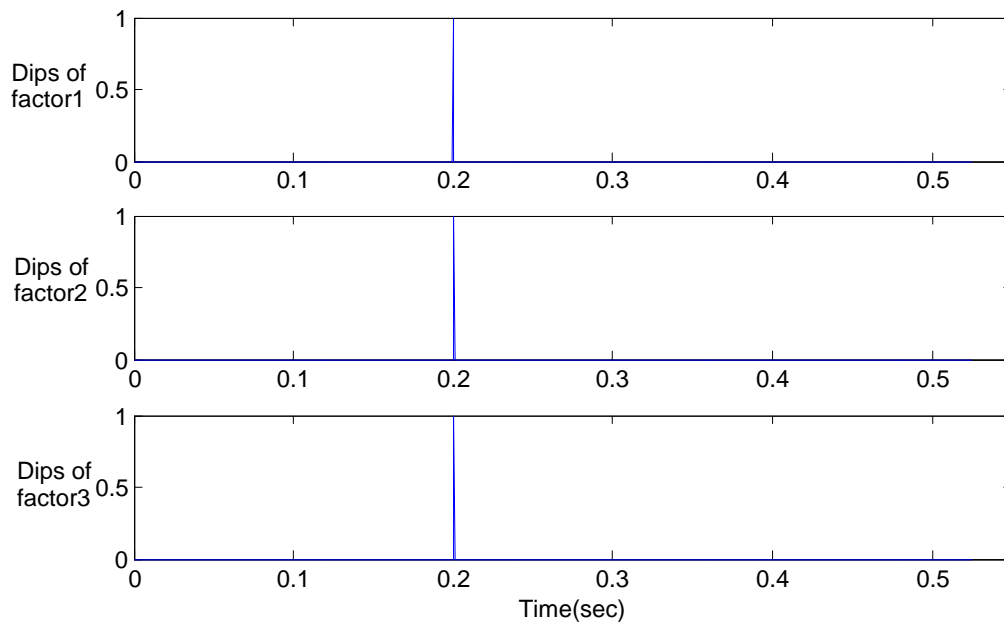
نمود. شکل های زیر این معیار تشخیص را نشان می دهند. در این شکل ها فرورفتگی هایی که دامنه آن ها از عدد  $0/9$  کمتر است و به صورت دره در آمده اند، یعنی از مقادیر قبلی و بعدی خود کوچکتر هستند را با عدد یک نشان داده و بقیه مقادیر که به صورت دره در نظر گرفته نمی شوند را با عدد صفر نشان می دهیم. عدد  $0/9$  هم به این دلیل انتخاب شده است که در حالت نرمال و زمانی که مقادیر ضرایب همبستگی دارای نوسان (فرورفتگی) نیستند و به عبارت دیگر همبسته هستند، این مقادیر بین حدوداً یک تا  $0/95$  قرار می گیرند و برای اطمینان بیشتر عدد  $0/9$  انتخاب شده است.



شکل (۶-۱۰) تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای تک فاز به زمین



شکل (۶-۱۱) تعداد فرورفتگی‌های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای دو فاز به زمین



شکل (۶-۱۲) تعداد فرورفتگی‌های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای سه فاز به زمین

بنابراین با توجه به شکل‌ها دیده می‌شود که برای حالت خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت فقط یک فرورفتگی و نوسان لحظه‌ای در مقدار ضرایب همبستگی وجود دارد که ناشی از حالت گذرای اولیه در اثر وقوع خطا و اغتشاش است. بنابراین در الگوریتم مربوطه با وجود فقط یک فرورفتگی در معیار



تشخیص، الگوریتم این حالت را خطای داخلی ترانسفورماتور تشخیص داده و رله دیفرانسیل باید عمل نماید. در حالیکه همانطور که در ادامه توضیح داده می شود این تعداد برای جریان هجومی بالاتر از یک بوده و رله دیفرانسیل در این حالت نباید وارد عمل شود.

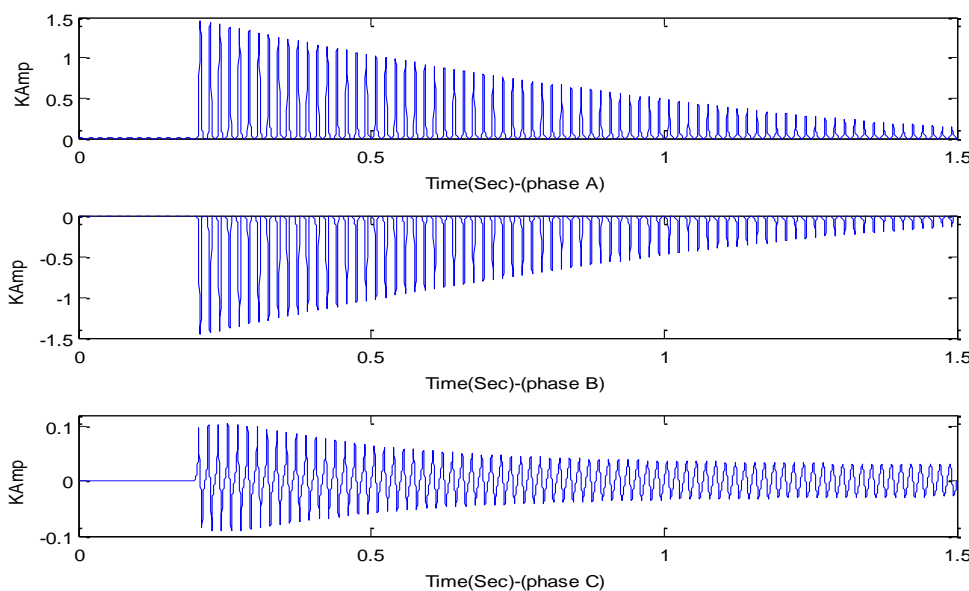
### ۶-۳-۴- شبیه سازی و تحلیل جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت

برای بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده در مورد جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت، جریان هجومی ناشی از کلیدزنی ترانسفورماتور قدرت در نظر گرفته می شود.

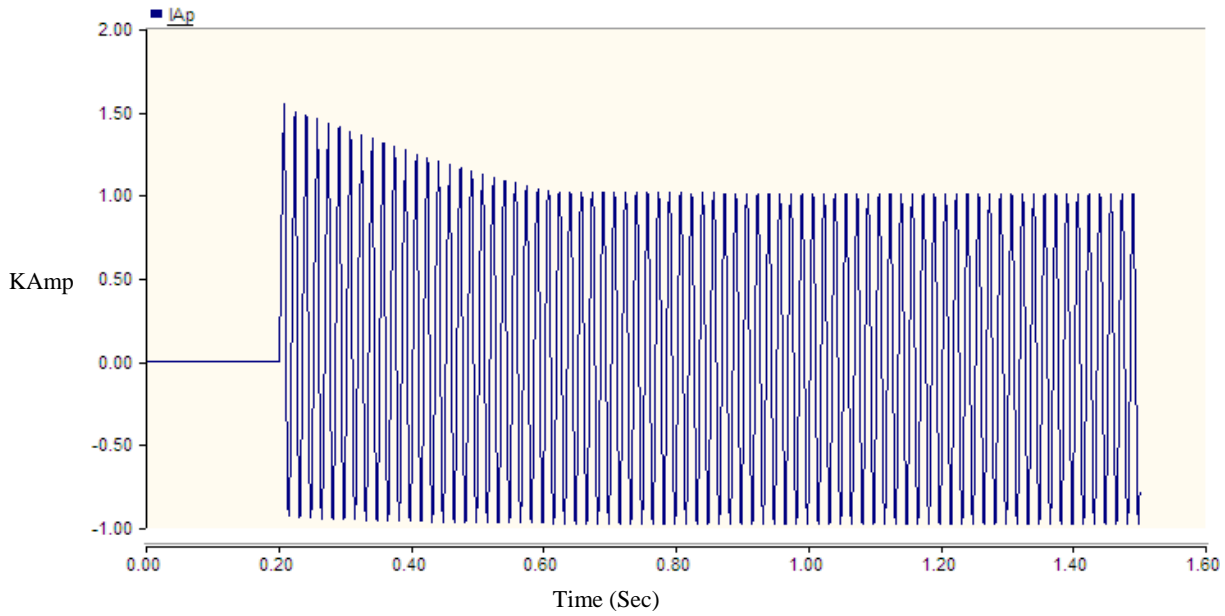
#### الف) جریان هجومی ترانسفورماتور

کلیدهای قدرت در شبیه سازی جریان هجومی در سمت اولیه ترانسفورماتور قرار داده شده و لحظه کلیدزنی  $0.2$  ثانیه در نظر گرفته می شود. شکل (۶-۱۳) یک نمونه از جریان هجومی شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD را که در نرم افزار MATLAB رسم شده است را برای هر سه فاز نشان می دهد.

شکل (۶-۱۴) سیگنال جریان هجومی فاز A را در نرم افزار PSCAD نشان می دهد.



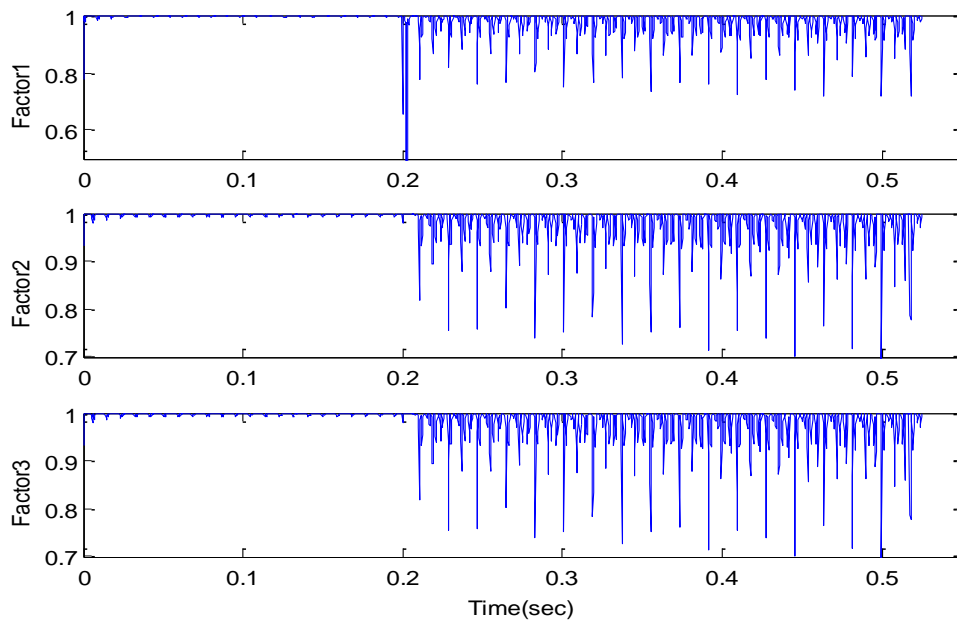
شکل (۶-۱۳) جریان هجومی ترانسفورماتور



شکل (۶-۱۴) جریان هجومی فاز A

(ب) محاسبه ضرایب همبستگی بین بردارهای درصد انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک

در شکل (۶-۱۵) ضرایب همبستگی برای جریان‌های تفاضلی در حالت جریان هجومی نشان داده شده است.



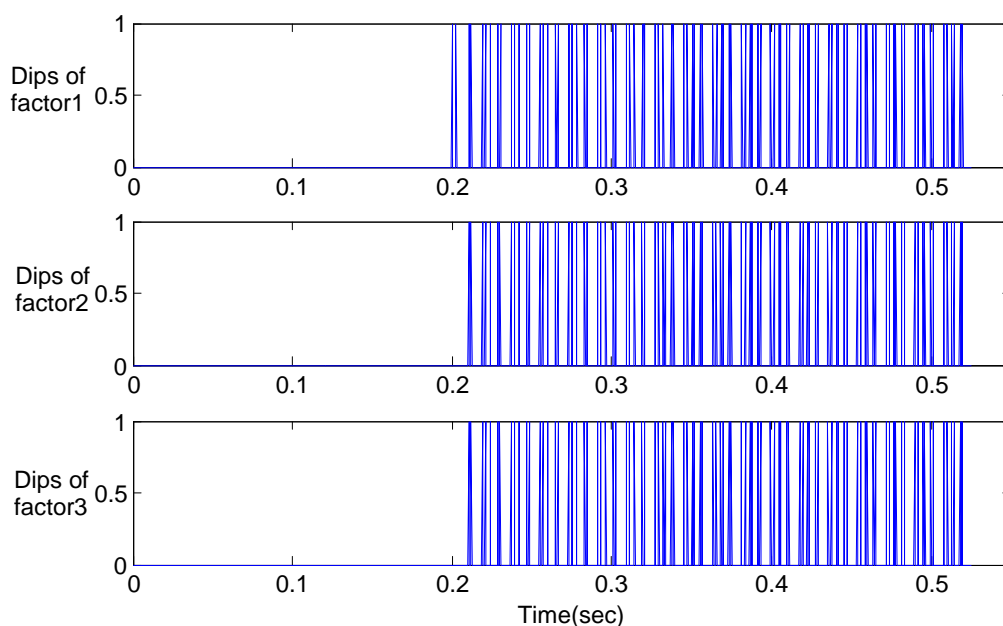
شکل (۶-۱۵) ضرایب همبستگی برای جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت

همانطور که از شکل (۶-۱۵) دیده می شود و قبلاً نیز بیان شد، مقدار ضرایب همبستگی برای حالت نرمال یعنی قبل از کلیدزنی ترانسفورماتور دارای مقادیر یک بوده و این ضرایب در این حالت با هم همبسته هستند. بعد از کلیدزنی ترانسفورماتور مقدار این ضرایب به دلیل حالت گذرای ناشی از وصل کلید دارای یک نوسان لحظه ای می شود که مشابه با حالت خطا است، ولی در این حالت مقدار این ضرایب بعد از گذشت زمان به حالت اولیه بر نمی گردد و بین یک مقادیری نوسان می کند و حالت نوسانی خود را تا رفع کامل جریان هجومی ادامه می دهد.

### ج) تعیین تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی

بنابر شکل (۶-۱۵) معیار بیان شده برای تشخیص جریان خطا و جریان هجومی که تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی، در نظر گرفته شده بود، در مورد جریان هجومی بیش از یک فرورفتگی است و از همین خاصیت برای تشخیص بین جریان هجومی و جریان خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت استفاده می شود.

شکل (۶-۱۶) این معیار تشخیص را برای جریان هجومی ناشی از وصل کلید قدرت، نشان می دهد.



شکل (۶-۱۶) تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی برای جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت

با توجه به شکل (۶-۱۶) دیده می‌شود که در مورد جریان هجومی بر خلاف جریان خطای داخلی ترانسفورماتور، تعداد فرورفتگی‌های موجود در ضرایب همبستگی بالاتر از یک فرورفتگی می‌باشد. بنابراین به طور کلی، در الگوریتم مربوطه بعد از وقوع یک اغتشاش و تشخیص آن، از سیگنال‌های جریان تفاضلی در پنجره‌های لغزشی ۶۴ تایی، در پنج سطح تبدیل موجک گرفته می‌شود. سپس بردار درصد انرژی ضرایب جزئیات تبدیل موجک در این پنج سطح در هر پنجره لغزشی تشکیل می‌شود. در مرحله بعد مقدار ضریب همبستگی بین بردار انرژی یک پنجره لغزشی و پنجره بعدی محاسبه می‌شود. سپس تعداد فرورفتگی‌های موجود در این ضرایب در الگوریتم مربوطه محاسبه شده و اگر تعداد آن‌ها در هر یک از جریان‌های تفاضلی، از عدد یک (فرورفتگی اول به دلیل حالت گذرای اولیه است) بیشتر شود الگوریتم مربوطه وقوع جریان هجومی را تشخیص داده و از عملکرد نادرست رله دیفرانسیل جلوگیری می‌کند.

باید توجه کرد که در مورد جریان هجومی شبیه‌سازی شده الگوریتم ارائه شده وقوع جریان هجومی را در ۰/۲۱۲ ثانیه تشخیص داده و با توجه به زمان کلیدزنی که در ۰/۲ ثانیه صورت می‌گیرد، زمان تشخیص جریان هجومی ۲/۵ میلی‌ثانیه می‌باشد که زمان خوبی برای تشخیص در نظر گرفته می‌شود.

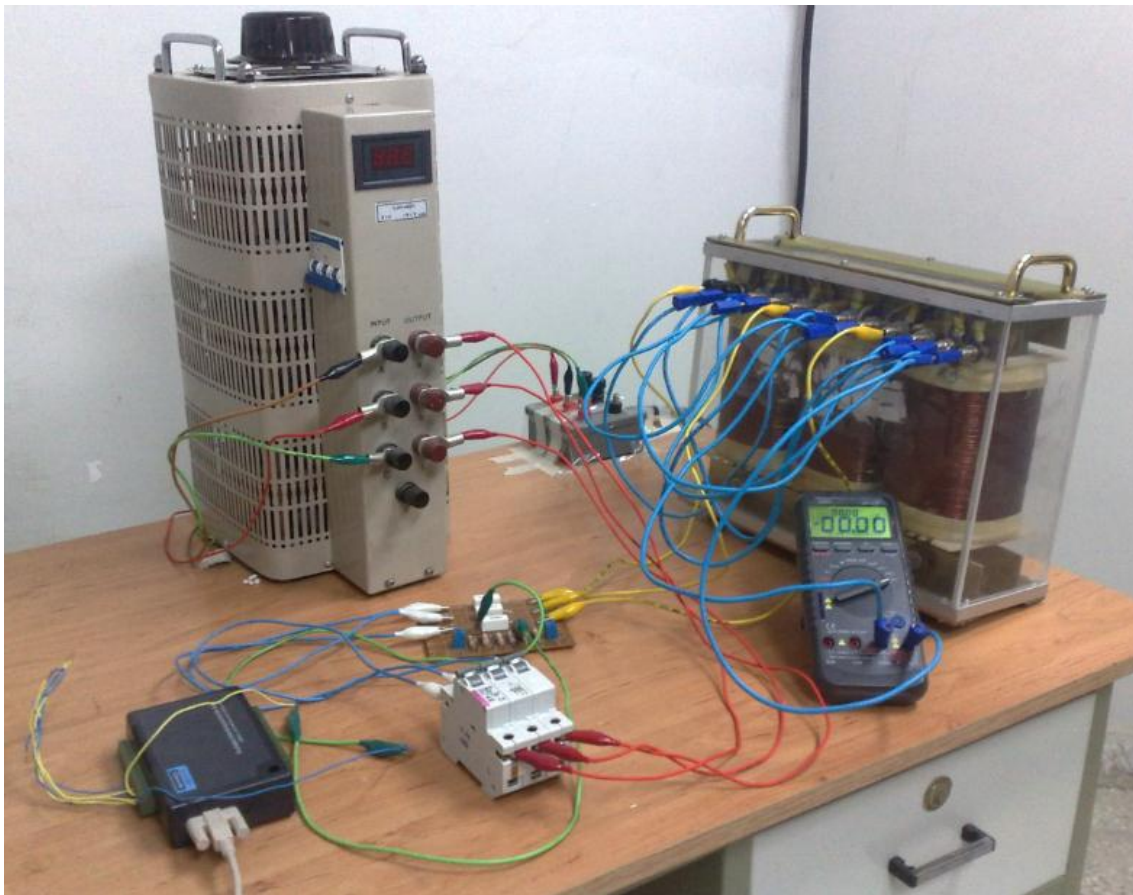
با توجه به موارد بیان شده علاوه بر زمان تشخیص بسیار کوتاه مدت، در این روش نیاز به استفاده از روش‌های تشخیص بر اساس منطق فازی و شبکه عصبی نمی‌باشد و علاوه بر آن روش آماری به کار گرفته شده ساده می‌باشد و دارای پیچیدگی‌های روش‌های دیگر نمی‌باشد.

#### ۴-۶- بررسی الگوریتم پیشنهادی در یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی

در این قسمت برای بررسی بیشتر در مورد صحت عملکرد الگوریتم ارائه شده یک تست واقعی بر روی یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی انجام شده و از سیگنال‌های جریان واقعی در الگوریتم تشخیص استفاده می‌شود.

ترانسفورماتور مورد آزمایش در این قسمت، یک ترانسفورماتور سه فاز  $220/110\text{KV}$  ،  $20\text{A}$  ، YY می باشد. در این آزمایش از یک کارت حافظه، که دارای پورت قابل ارتباط با کامپیوتر می باشد، برای ثبت سیگنال های جریان استفاده می شود. باید توجه نمود که این کارت حافظه در واقع سیگنال های ولتاژ دو سر یک مقاومت را اندازه گیری و ثبت می کند. بنابراین در نمودارهای ارائه شده دامنه جریان باید در مقدار مقاومت به کار برده شده ( در این آزمایش ها از مقاومت  $0/88$  اهم استفاده شده است) ضرب شود تا مقدار واقعی دامنه جریان به دست آید.

شکل (۶-۱۷) ترانسفورماتور مورد آزمایش را نشان می دهد.



شکل (۶-۱۷) سیستم نمونه آزمایشگاهی

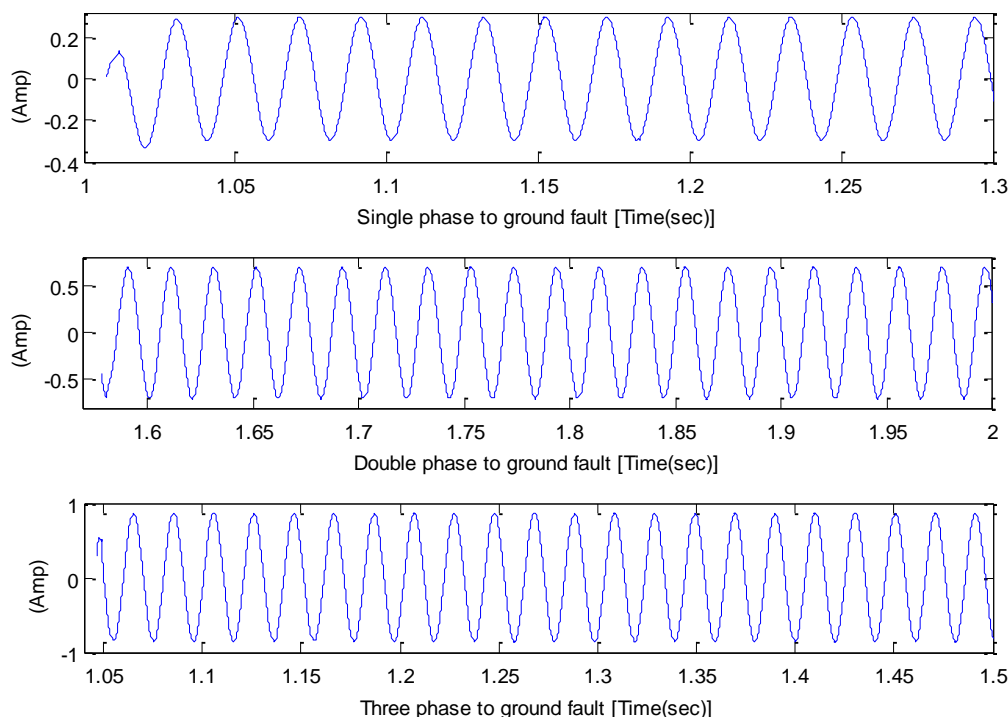
با استفاده از سیستم ارائه شده، آزمایشات اتصال کوتاه و کلید زنی ترانسفورماتور انجام شده که نتایج آن به صورت زیر می باشد.

## ۶-۴-۱- آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور و تحلیل نتایج آن

در این قسمت آزمایش‌های اتصال کوتاه‌های تک فاز به زمین، دو فاز به زمین و سه فاز به زمین روی ترانسفورماتور انجام می‌شود. آزمایش اتصال کوتاه در سمت اولیه ترانسفورماتور انجام می‌شود و ثانویه ترانسفورماتور بدون بار است. بنابراین جریان خطای اندازه‌گیری شده، همان جریان تفاضلی می‌باشد. باید توجه نمود که آزمایش اتصال کوتاه برای جلوگیری از آسیب دیدن سیستم و ادوات مورد آزمایش و همچنین حفظ امنیت جانی، در ولتاژ نامی انجام نشده و ولتاژ مورد استفاده در این آزمایشات برابر ۳۰ ولت می‌باشد که نسبت به ولتاژ نامی، دامنه جریان اتصال کوتاه دارای مقادیر کمتری می‌باشد.

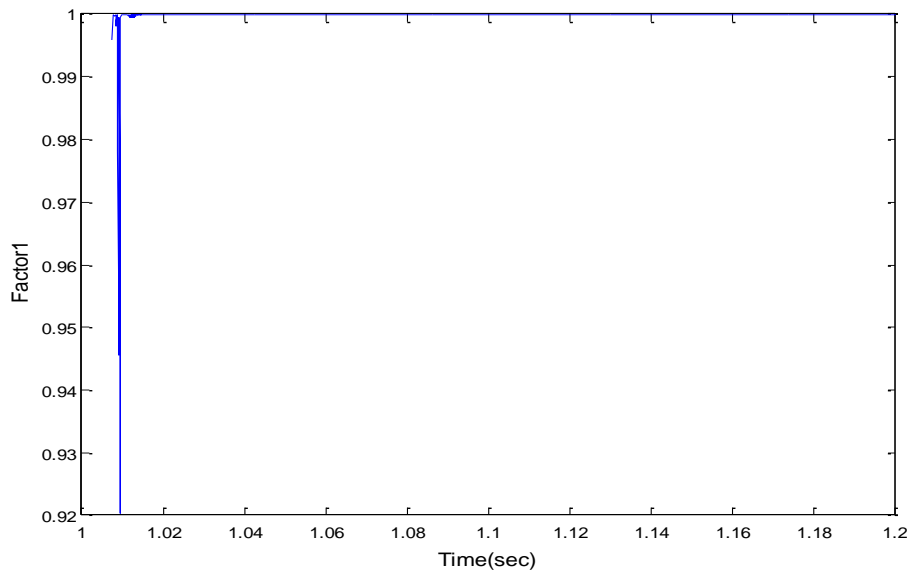
## الف) جریان‌های خطای ترانسفورماتور

شکل‌های (۶-۱۸) جریان‌های اتصال کوتاه را نشان می‌دهد.

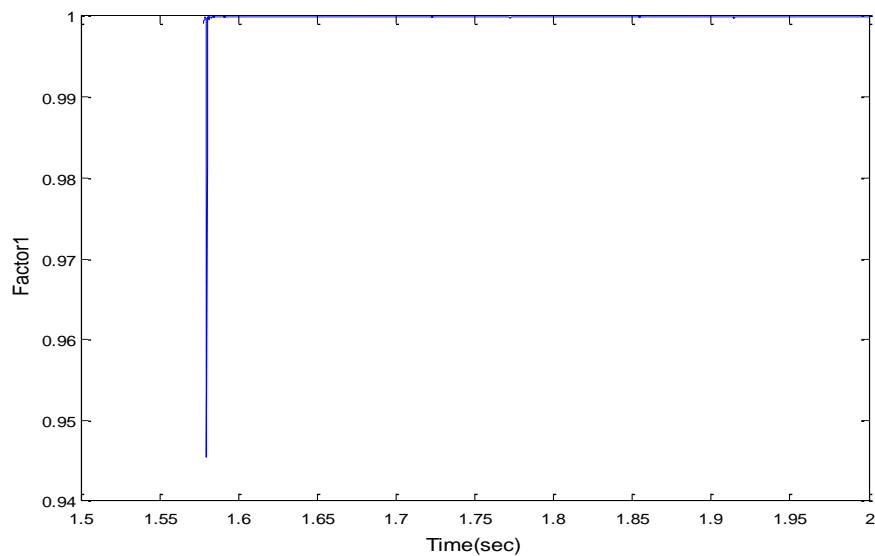


شکل (۶-۱۸) جریان‌های خطای واقعی

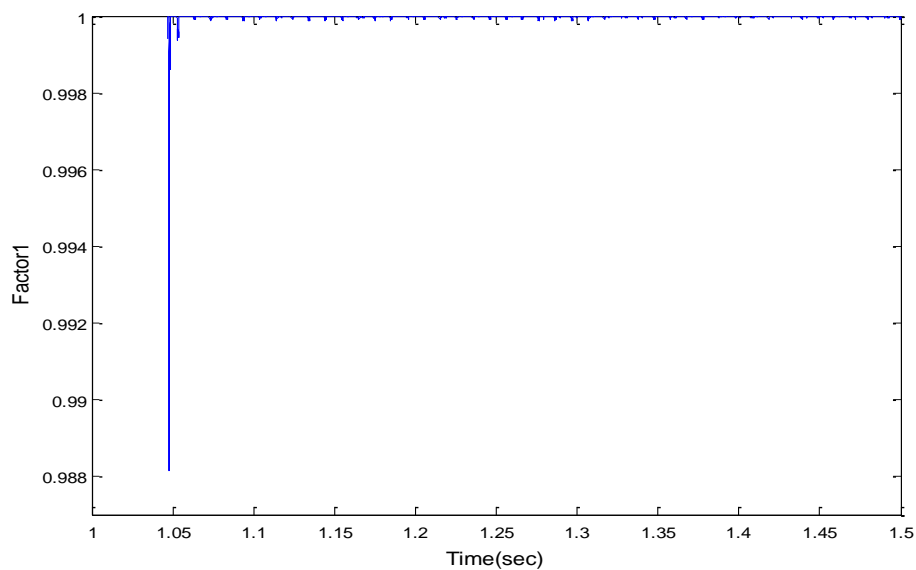
ب) محاسبه ضرایب همبستگی بین بردارهای درصد انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک با توجه به شکل موج‌های جریان‌های خطای به دست آمده از انواع اتصال کوتاه‌های ترانسفورماتور، روش بیان شده برای تشخیص جریان هجومی، اجرا می‌شود. شکل‌های حاصل از گرفتن تبدیل موجک و محاسبه ضرایب همبستگی، میان بردارهای تشکیل شده از درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک، بین هر دو پنجره لغزشی متوالی، بر حسب زمان به صورت شکل‌های (۶-۱۹)، (۶-۲۰) و (۶-۲۱) هستند.



شکل (۶-۱۹) ضرایب همبستگی برای خطای تک فاز به زمین



شکل (۶-۲۰) ضرایب همبستگی برای خطای دو فاز به زمین



شکل (۶-۲۱) ضرایب همبستگی برای خطای سه فاز به زمین

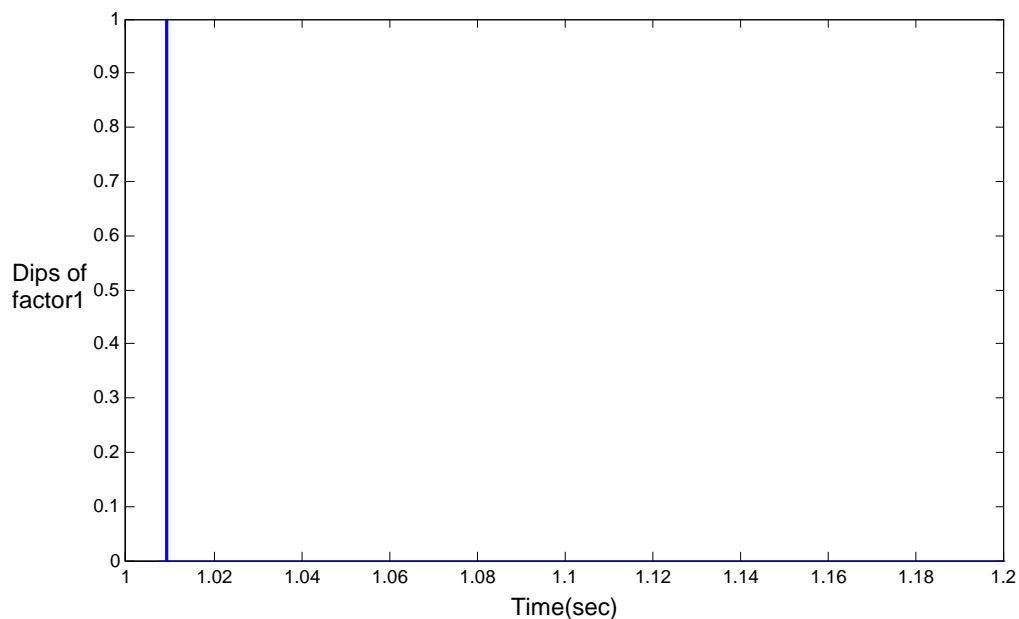
همانطور که در شکل‌ها مشخص است، در هر سه خطای اتصال کوتاه در ترانسفورماتور، مقدار ضریب همبستگی قبل از خطا برابر یک است و در لحظه شروع خطا مقدار آن یک کاهش و نوسان لحظه‌ای دارد که به دلیل حالت گذرا و تغییر انرژی در ضرایب تبدیل موجک است و بعد از آن مقدار این ضریب دوباره به مقدار یک بر می‌گردد. این نتایج مشابه نتایج حاصل از شبیه‌سازی بوده و تأیید



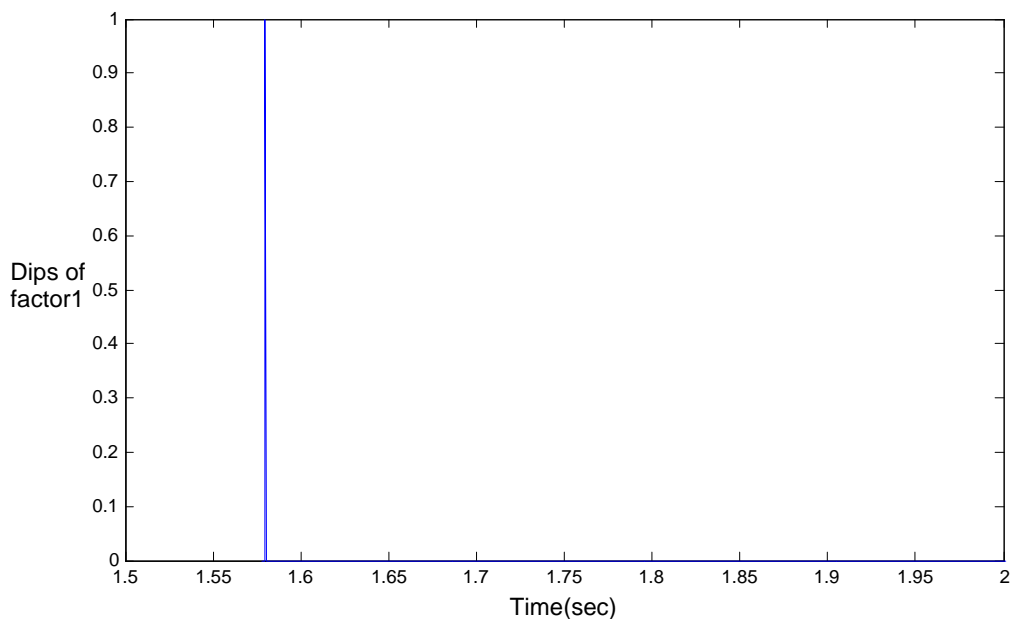
کننده آن است. باید توجه نمود که در آزمایش واقعی از آنجائیکه خطای اتصال کوتاه ترانسفورماتور نمی تواند در ولتاژ واقعی صورت گیرد، جریان های اتصال کوتاه دارای دامنه کمتر از حالت شبیه سازی کامپیوتری هستند و به همین دلیل مقدار تغییر در ضرایب همبستگی و دامنه آن کمتر از حالت شبیه سازی کامپیوتری می باشد.

### ج) تعیین تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی

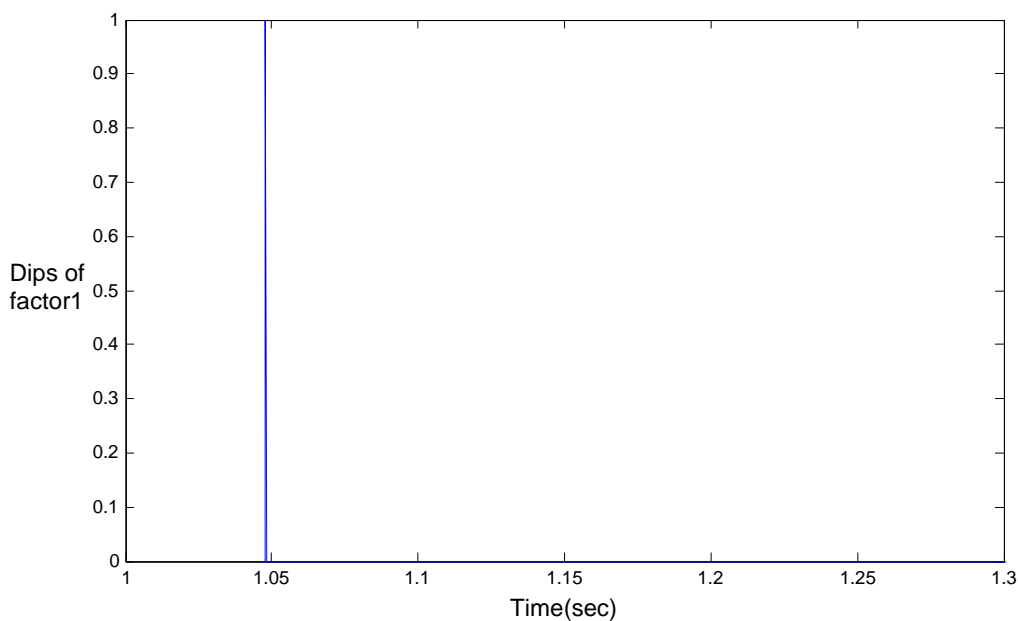
بعد از مشاهده ضرایب همبستگی، در این قسمت به بررسی معیار تشخیص که تعداد فرورفتگی های موجود در این ضرایب است را مورد بررسی قرار می دهیم. در این حالت همانطور که قبلاً نیز بیان شد، فرورفتگی های ضرایب همبستگی را با عدد یک و بقیه نقاط را با صفر نشان می دهیم.



شکل (۵-۲۲) تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای تک فاز به زمین



شکل (۶-۲۳) تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای دو فاز به زمین



شکل (۶-۲۴) تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی برای خطای سه فاز به زمین

با توجه به شکل های (۶-۲۲)، (۶-۲۳) و (۶-۲۴)، دیده می شود که همانند نتایج شبیه سازی کامپیوتری، تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی تعریف شده برابر یک می باشد. از آنجائیکه مقدار دامنه جریان خطا را نمی توانیم در تست آزمایشگاهی زیاد در نظر بگیریم، لذا مقدار ضریب همبستگی افزایش پیدا می کند و مقدار ماکزیمم دامنه ضریب همبستگی افزایش می یابد. این

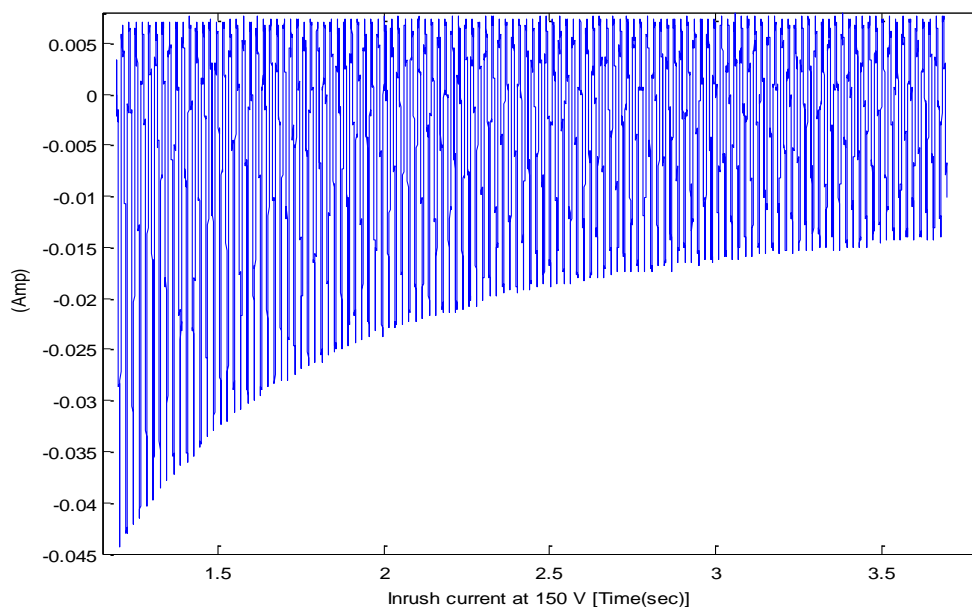
موضوع در حالی است که برای تشخیص خطا همان دامنه قبلی درست عمل خواهد نمود. چون در هر صورت تعداد فرورفتگی‌ها از یک کمتر است و الگوریتم مربوطه جریان خطا را تشخیص می‌دهد و عدم تغییر آن اختلالی در نتیجه الگوریتم ایجاد نمی‌کند.

#### ۶-۴-۲- آزمایش جریان هجومی ترانسفورماتور و تحلیل نتایج آن

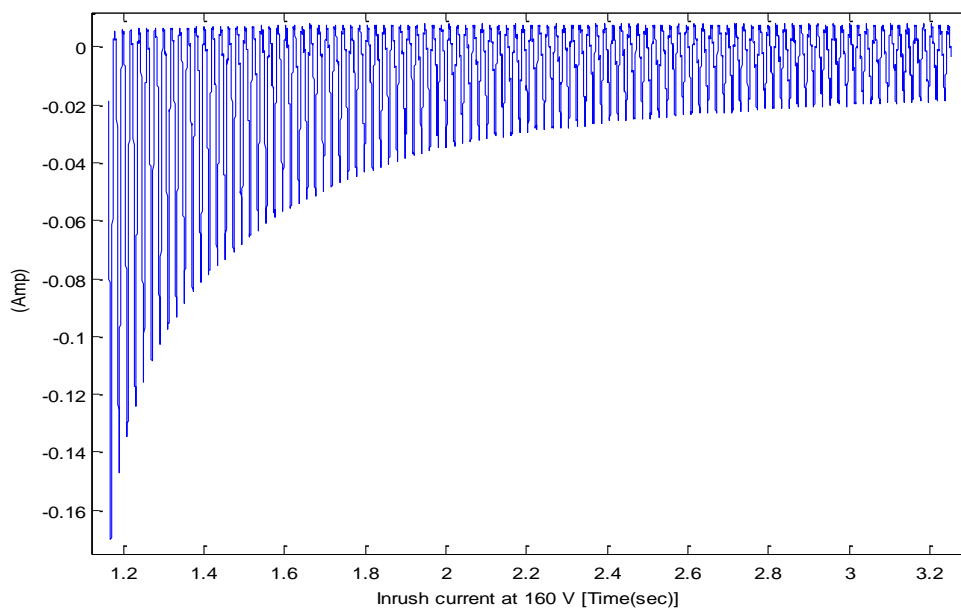
در این قسمت سیگنال‌های جریان هجومی حاصل از کلیدزنی ترانسفورماتور را بدست آورده و برای بررسی الگوریتم ارائه شده روی این سیگنال‌ها آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. تست کلید زنی ترانسفورماتور سه فاز توسط یک کلید سه فاز در سمت اولیه ترانسفورماتور و در حالت بی‌باری ترانسفورماتور انجام می‌شود. در یک لحظه کلید سه فاز در سمت اولیه ترانسفورماتور به منبع سه فاز متصل شده و جریان هجومی یکی از فازها توسط کارت حافظه ثبت می‌شود.

#### الف) جریان هجومی ترانسفورماتور

تست کلیدزنی ترانسفورماتور در دو ولتاژ  $150V$  و  $160V$  انجام می‌شود. شکل موج جریان هجومی در این دو ولتاژ به صورت شکل‌های (۶-۲۵) و (۶-۲۶) است.

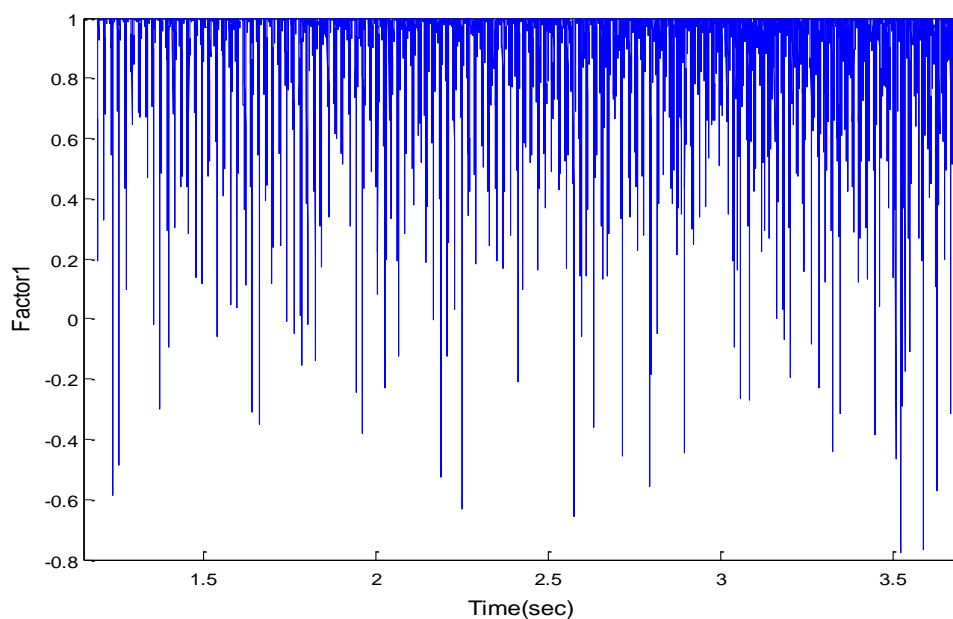


شکل (۶-۲۵) جریان هجومی در ولتاژ  $150V$  ولت

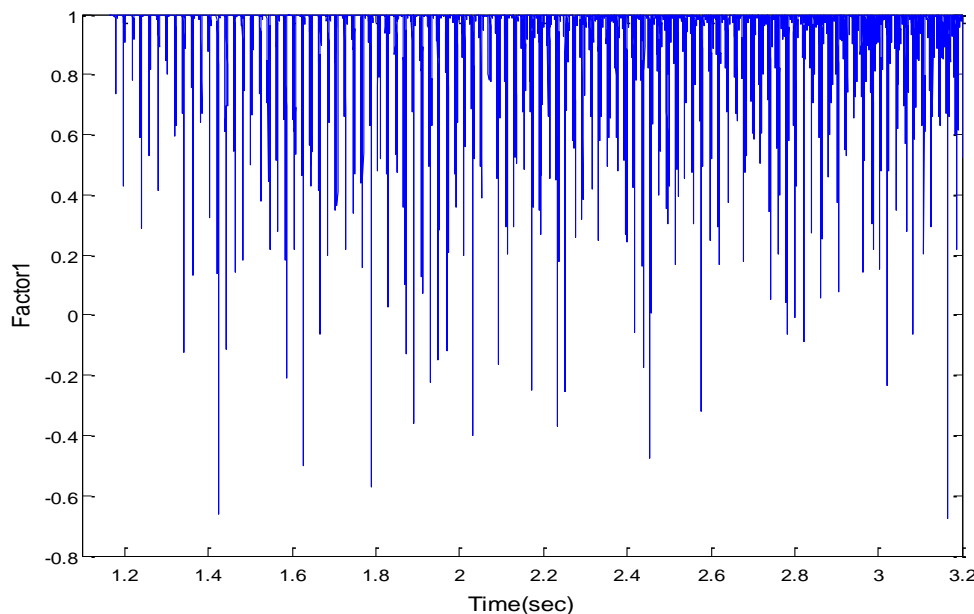


شکل (۶-۲۶) جریان هجومی در ولتاژ ۱۶۰ ولت

ب) محاسبه ضرایب همبستگی بین بردارهای درصد انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک در اینجا نیز مانند جریان اتصال کوتاه، الگوریتم ارائه شده را اجرا می کنیم که شکل های حاصل از محاسبه ضرایب همبستگی نسبت به زمان به صورت شکل های (۶-۲۷) و (۶-۲۸) است.



شکل (۶-۲۷) ضرایب همبستگی برای جریان هجومی در ولتاژ ۱۵۰ ولت

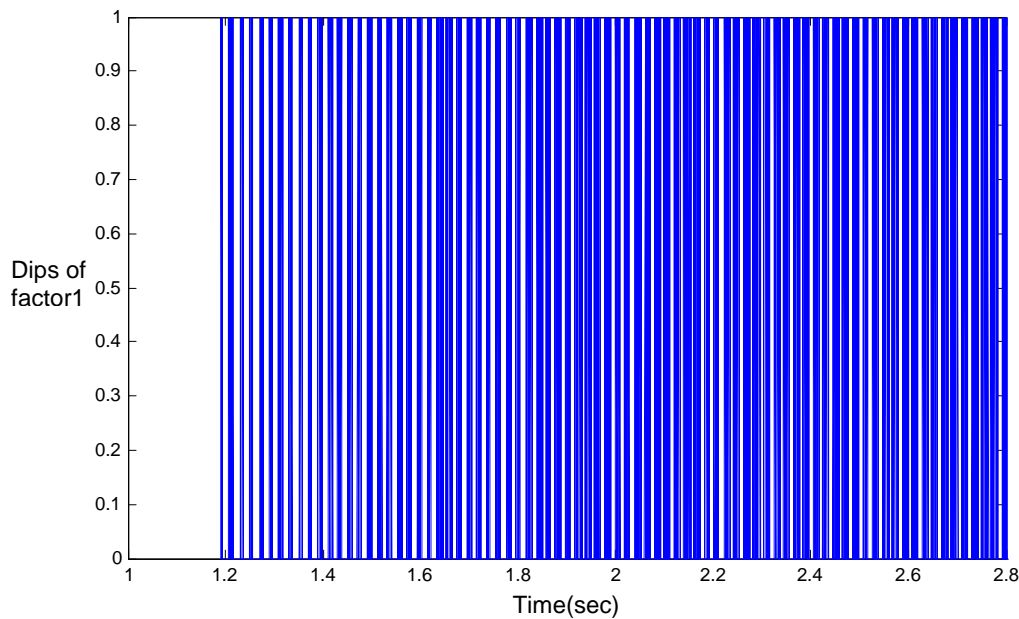


شکل (۶-۲۸) ضرایب همبستگی برای جریان هجومی در ولتاژ ۱۶۰ ولت

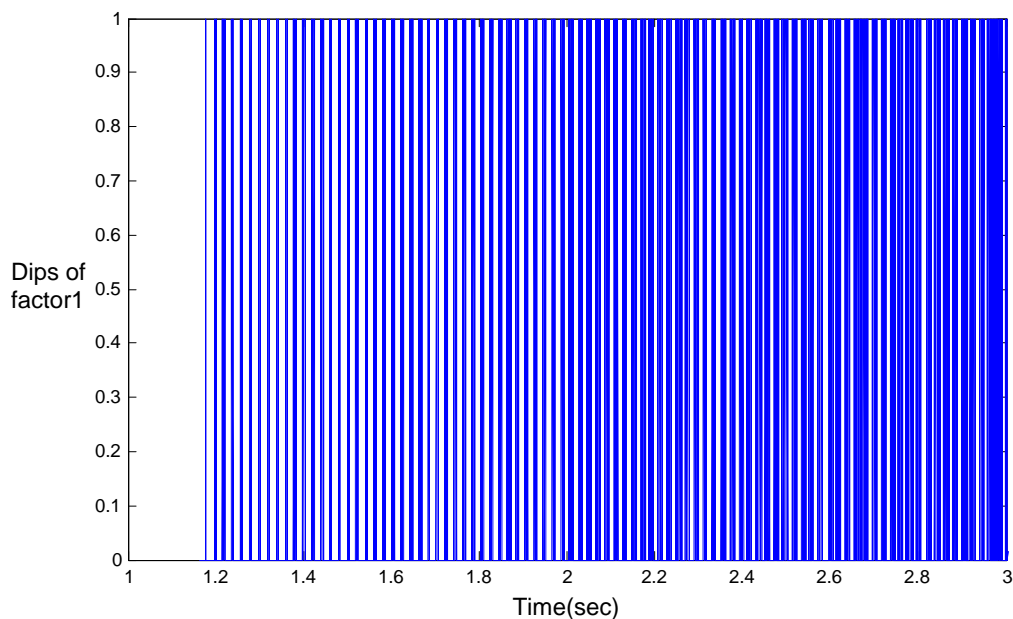
با توجه به شکل‌ها دیده می‌شود، در جریان هجومی بر خلاف حالت جریان اتصال کوتاه ترانسفورماتور، به دلیل خاصیت نوسانی شکل موج جریان هجومی و تغییرات زیاد انرژی سیگنال‌های جریان در فرکانس‌های مختلف، مقدار ضرایب همبستگی دارای مقادیر بسیار کمتر از یک می‌باشند. به عبارت دیگر بردارهای تشکیل شده از درصد انرژی ضرایب جزئیات تبدیل موجک در هر دو پنجره لغزشی متوالی ناهمبسته هستند و شکل ضرایب همبستگی نسبت به زمان به صورت نوسانی و با تعداد فرورفتگی‌های زیاد است. این نتایج با نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری یکسان بوده و تأیید کننده آن است.

### ج) تعیین تعداد فرورفتگی‌های موجود در ضرایب همبستگی

در این مرحله به تعیین معیار اصلی تشخیص جریان هجومی که تعداد فرورفتگی‌های موجود در ضرایب همبستگی است، پرداخته می‌شود. مانند مرحله شبیه‌سازی در اینجا نیز فرورفتگی‌هایی را که دامنه آن‌ها کمتر از  $0/9$  هستند و از مقادیر قبلی و بعدی خود کوچکتر هستند را با عدد یک و بقیه نقاط را با صفر نشان می‌دهیم.



شکل (۶-۲۹) تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی برای جریان هجومی ۱۵۰ ولت



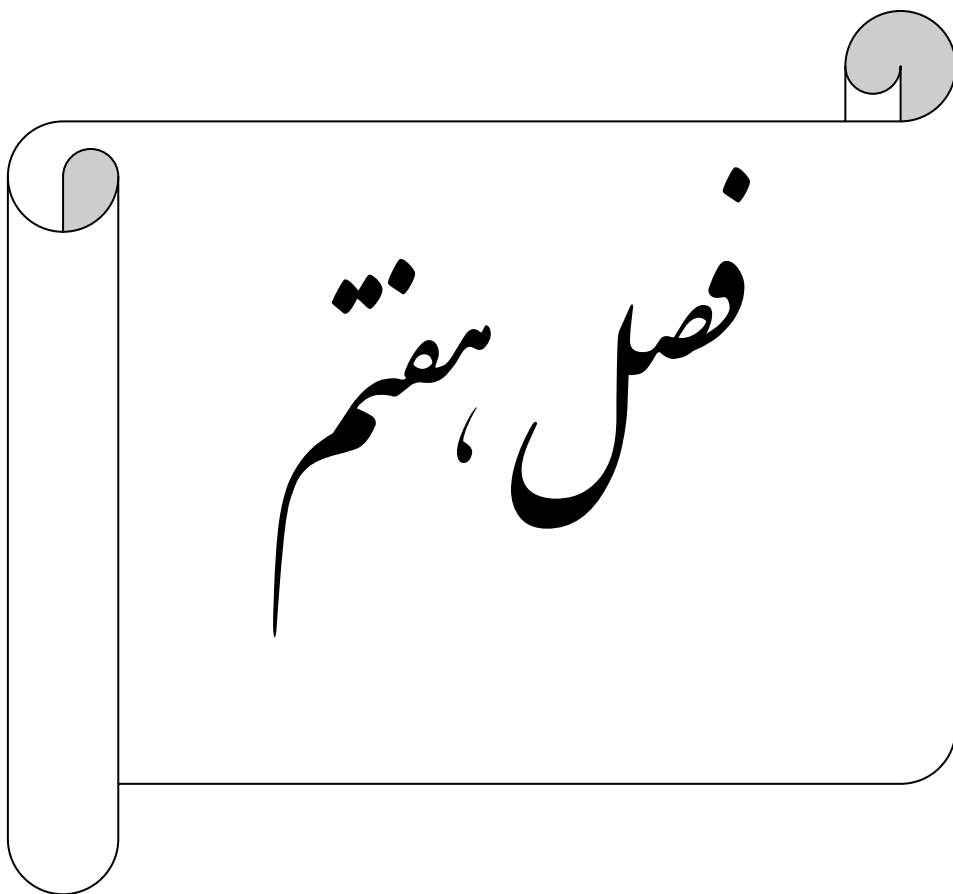
شکل (۶-۳۰) تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی برای جریان هجومی ۱۶۰ ولت

همانطور که از شکل ها مشخص است فرورفتگی هایی که با عدد یک نشان داده شده اند و معیار تشخیص جریان هجومی هستند، بعد از وقوع جریان هجومی، بر خلاف جریان اتصال کوتاه، بسیار بیشتر از یک فرورفتگی هستند. بنابراین تعداد این نقاط معیار تشخیص جریان هجومی قرار گرفته و

در الگوریتم ارائه شده با شمارش تعداد فرورفتگی ها، که در مورد جریان هجومی بالاتر از یک فرورفتگی است، جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه ترانسفورماتور تشخیص داده می شود.

#### ۶-۵- تحلیل نتایج

همانطور که بیان شد، اساس روش تشخیص پیشنهادی بر اساس تبدیل موجک و ضریب همبستگی می باشد. طبق نتایج حاصل از شده از شبیه سازی های کامپیوتری و تست آزمایشگاهی، انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک در جریان هجومی و جریان خطای داخلی ترانسفورماتور دارای رفتارهای متفاوتی می باشند، که از این تفاوت در الگوریتم تشخیص استفاده شده است. بردارهای حاصل از انرژی ضرایب تبدیل موجک در جریان خطا، به ازای سیکل های زمانی مختلف دارای تفاوت قابل ملاحظه ای نمی باشند و از نقطه نظر معیار آماری به کار برده شده، با هم همبسته هستند. ولی در مورد جریان هجومی این بردارهای انرژی در هر پنجره نمونه برداری دارای اختلاف زیادی بوده و به بیان دیگر ناهمبسته هستند. با توجه به این خاصیت، ضرایب همبستگی در جریان خطا دارای رفتاری پایدار بوده و فقط شامل یک نزول ناگهانی در زمان شروع خطا هستند. در حالیکه در مورد جریان هجومی ضرایب همبستگی دارای رفتار نوسانی بوده و تغییرات نوسانی و نزول های دره مانند آن تا نشست کامل جریان هجومی ادامه می یابند. بر این اساس، ملاک تشخیص، تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی می باشد. به این صورت که اگر تعداد فرورفتگی های موجود در ضرایب همبستگی، از عدد یک که مربوط به زمان شروع اغتشاش می باشد فراتر رود، الگوریتم مربوطه اغتشاش موجود در سیگنال جریان را جریان هجومی در نظر گرفته و مانع عملکرد رله می شود، در غیر این صورت اغتشاش رخ داده شده یک خطای داخلی ترانسفورماتور در نظر گرفته شده و فرمان قطع ترانسفورماتور خطا صادر می شود.



نتیجہ گیری و پیشہادات



## ۷-۱- نتیجه گیری

حفاظت دیفرانسیل از حفاظت های مهم و اولیه ادوات سیستم قدرت و به ویژه ترانسفورماتور قدرت می باشد. همانطور که بیان شد، این حفاظت بر اساس مقایسه بین جریان های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور عمل می کند. در حالت نرمال سیستم قدرت این جریان های اولیه و ثانویه دارای مقدار نزدیک به هم بوده و تفاضل آن ها دارای مقدار کمی است. در حالیکه در حالت وقوع خطای داخلی جریان تفاضلی دارای مقدار قابل ملاحظه ای است.

با توجه به اهمیت ترانسفورماتور قدرت، صحت و سرعت عملکرد رله دیفرانسیل دارای اهمیت بوده و نباید هیچ گونه خطایی در تشخیص خطا و قطع غیر ضروری و نادرست ترانسفورماتور قدرت صورت گیرد. در این پایان نامه دلایل ایجاد خطا در رله دیفرانسیل بیان و بررسی شد. یکی از دلایل مهم و شایع خطای عملکرد رله دیفرانسیل، در زمان کلیدزنی ترانسفورماتور قدرت و اتصال آن به سیستم قدرت می باشد. جریان هجومی که دارای دامنه زیاد بوده و در زمان کلیدزنی ترانسفورماتور ایجاد می شود، با جریان خطای داخلی اشتباه گرفته شده و باعث عملکرد نادرست رله دیفرانسیل می شود. با توجه به این مشکل روش های زیادی برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی بیان شده است. یکی از جدید ترین و بهترین روش ها استفاده از روش های پردازش سیگنال و تبدیل موجک می باشد.

در این پایان نامه یک روش جدید برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت، بر اساس تبدیل موجک ارائه شده است. در این روش از تبدیل موجک گسسته به دلیل مزیت های آن نسبت به تبدیل موجک پیوسته (که دلایل آن قبلاً بیان شده است) و گسسته بودن سیگنال های جریان نمونه برداری شده، استفاده می شود. سپس با توجه به روابط ارائه شده، بردار درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک گسسته تشکیل می شود. برای ایجاد یک معیار تشخیص در الگوریتم ارائه شده از یک فاکتور آماری به نام ضریب همبستگی استفاده شده و ارتباط و همبستگی این بردارهای انرژی توسط این فاکتور بیان و برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی به کار می رود.

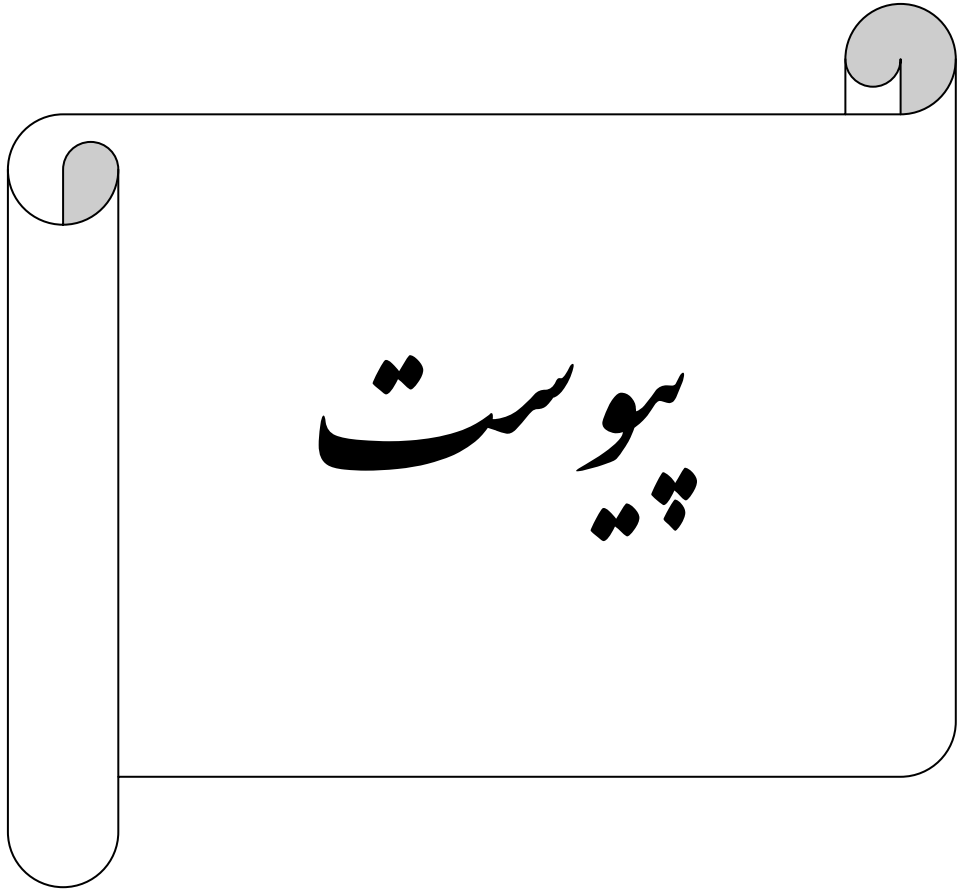
برای بررسی صحت عملکرد روش ارائه شده از سیگنال‌های شبیه‌سازی شده در نرم افزار PSCAD استفاده شده و این سیگنال‌ها توسط الگوریتم ارائه شده در نرم افزار MATLAB به کار گرفته می‌شوند. همچنین برای بررسی بیشتر از یک سیستم تست واقعی در آزمایشگاه استفاده شده و سیگنال‌های جریان خطا و جریان هجومی حاصل از یک ترانسفورماتور واقعی، ثبت و در الگوریتم پیشنهادی به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و همچنین تست آزمایشگاهی صحت عملکرد الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهند.

در این روش از تبدیل موجک استفاده شده است که نسبت به روش‌های قدیمی پردازش سیگنال مانند تبدیل فوریه بهتر بوده و قادر به بیان مؤلفه‌های سیگنال، در هر دو باند فرکانس و زمانی می‌باشد. همچنین این روش علاوه بر دقت و قابلیت اطمینان بالا دارای سرعت عملکرد زیاد بوده و قادر به تشخیص جریان هجومی در کمتر از ۳ میلی ثانیه، یعنی کمتر از یک چهارم سیکل فرکانس قدرت می‌باشد. نسبت به روش‌هایی که بر اساس توان سیگنال کار می‌کنند در این روش فقط از سیگنال جریان استفاده شده و نیاز به اندازه‌گیری و ثبت سیگنال‌های ولتاژ نمی‌باشد. الگوریتم پیشنهادی نیازی به استفاده از روش‌های پر حجم محاسباتی و زمان‌گیر آموزشی مانند شبکه عصبی و منطق فازی ندارد و الگوریتم تشخیص خطا با استفاده از یک سری محاسبات ساده و کم حجم اجرا می‌گردد. این روش نیاز به تعیین آستانه عملکرد خاصی ندارد و تشخیص جریان هجومی با شمارش تعداد فرورفتگی‌های موجود در ضریب همبستگی صورت می‌گیرد.

## ۲-۷- پیشنهادات

پیشنهادات زیر به منظور ادامه تحقیقات و بهبود حفاظت دیفرانسیل ارائه می‌گردد:

- ۱- با توجه به اینکه روش‌های مبنی بر تبدیل موجک نسبت به سیگنال‌های نویز حساس می‌باشند، پیشنهاد می‌شود که اثر این سیگنال‌ها و اعوجاج‌های ناخواسته بر روی روش تشخیص جریان هجومی در نظر گرفته شده و برای رفع اثر آن تمهیدات لازم صورت گیرد.
- ۲- با توجه به اینکه تبدیل موجک دارای انواع دیگر تابع مادر می‌باشد. می‌توان توابع موجک دیگر را به کار برده و ویژگی‌های هر کدام را از لحاظ سرعت و دقت مورد بررسی قرار داد.



پیوست-۱- ضریب همبستگی

برای بیان مفهوم ضریب همبستگی<sup>۱</sup> در ابتدا به مفهوم کوواریانس<sup>۲</sup> پرداخته می شود. عبارت کوواریانس در جستجوی پیدا کردن یک ارتباط و وابستگی بین دو متغیر تصادفی حقیقی می باشد. ضریب همبستگی یک مقیاس توسعه یافته از مفهوم کوواریانس می باشد.

کوواریانس بین دو متغیر تصادفی  $x_1$  و  $x_2$  که با  $\text{COV}(x_1, x_2)$  نشان داده می شود، به صورت زیر تعریف می شود [۷۱]:

$$\text{COV}(x_1, x_2) = E[(x_1 - \mu_1)(x_2 - \mu_2)] = E[x_1 x_2] - \mu_1 \mu_2 \quad (۱)$$

$$\mu_i = E(x_i) \quad , \quad i = 1, 2 \quad (۲)$$

در این عبارت  $E(x_i)$  میانگین یا میانه متغیر تصادفی  $x_i$  می باشد و  $E[x_1 x_2]$ ،  $\mu_1$  و  $\mu_2$  مقادیر محدود می باشند ( $E(x_i) = \mu_i$ ).

بر طبق رابطه بیان شده، ضریب همبستگی بین دو متغیر تصادفی  $x_1$  و  $x_2$  که با  $\rho_{x_1, x_2}$  نشان داده می شود، به صورت زیر تعریف می شود.

$$\rho_{x_1, x_2} = \frac{\text{COV}(x_1, x_2)}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (۳)$$

در این عبارت  $\sigma_1^2$  و  $\sigma_2^2$  به ترتیب واریانس  $x_1$  و  $x_2$  هستند.

باید توجه شود که در حالی که کوواریانس یک عبارت متناهی است، عبارت زیر صحیح است.

$$\text{COV}(x_1, x_2) = \text{COV}(x_2, x_1) \quad , \quad \text{COV}(x_1, x_1) = \text{COV}(x_1) \quad (۴)$$

اگر مقدار ضریب همبستگی دو متغیر تصادفی  $x_1$  و  $x_2$ ، به صورت منفی، صفر و مثبت باشد، این دو متغیر تصادفی به ترتیب دارای همبستگی منفی، ناهمبسته و همبستگی مثبت هستند.

اگر دو متغیر تصادفی  $x_1$  و  $x_2$  را در نظر بگیریم و فرض نماییم که واریانس آن ها به صورت  $0 < v(x_1), v(x_2) < \infty$  باشند در این صورت موارد زیر را خواهیم داشت:

<sup>۱</sup> Correlation coefficient  
<sup>۲</sup> Covariance

۱- اگر  $y_i = c_i + d_i x_i, i=1,2$  باشد که در آن  $c_i$  و  $d_i$  مقادیر ثابت و متناهی باشند، در آن صورت  $\rho_{y_1, y_2} = \rho_{x_1, x_2}$  خواهد بود.

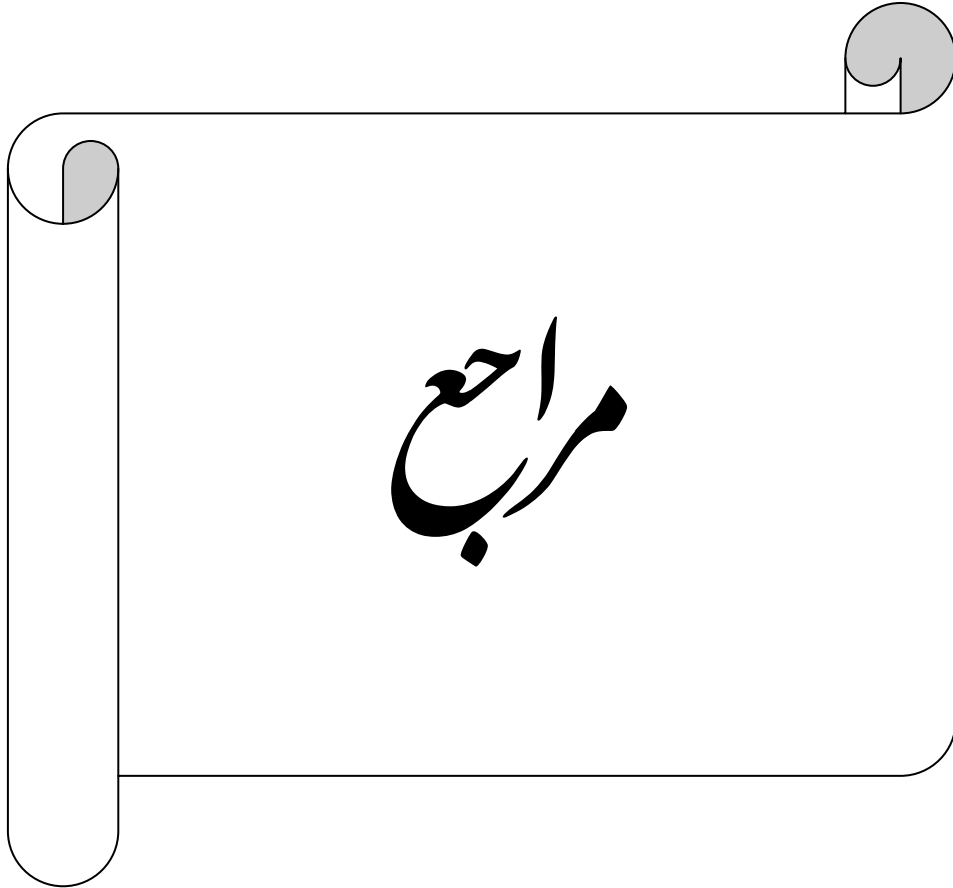
۲- اگر  $|\rho_{x_1, x_2}| \leq 1$  باشد، این نامساوی برای  $x_1 = a + bx_2$  و برای مقادیر ثابت  $a$  و  $b$  حفظ می شود.

### پیوست-۲- ضریب همبستگی و استقلال

اگر ضریب همبستگی دو متغیر تصادفی  $x_1$  و  $x_2$  متناهی بوده و دو متغیر تصادفی نسبت به هم مستقل باشند، ضریب همبستگی بین این دو متغیر برابر صفر خواهد بود.

عبارت مهمی که نقش ضریب همبستگی صفر را در توزیع نرمال دو متغیری آشکار می کند، به صورت زیر بیان می شود.

- فرض کنید که  $(x_1, x_2)$  دارای توزیع نرمال  $N_2$ ،  $(\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho)$ ، باشد که در آن  $-\infty < \mu_1, \mu_2 < \infty$ ،  $0 < \sigma_1, \sigma_2 < \infty$  و  $-1 < \rho (= \rho_{x_1, x_2}) < 1$  باشد، آنگاه  $x_1$  و  $x_2$  در صورتی مستقل از هم هستند که  $\rho = 0$  باشد.



- [۱] دکتر مجتبی خدرزاده، مهندس علی صفر نوراله، مهندس محمد مرتجی، دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن، مبانی حفاظت سیستم های قدرت، ۱۳۸۳.
- [۲] Zora. Gajic, Differential protection for arbitrary three-phase power transformers, Lund university. Sweden. Department of industrial electric engineering and automation, PhD. Thesis, 2008.
- [۳] Z. Gayic, "Differential protection for special industrial transformer protection", IEEE Trans. Power Del, Vol. 22, No. 4, pp. 2126-2131, Oct. 2007.
- [۴] دکتر علی مطلبی، ترانسفورماتورهای تک فازه و سه فازه، انتشارات افروز تهران، ۱۳۷۸.
- [۵] هادی شفیع، تشخیص جریان هجومی از جریان خطا در ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از اندوکتانس لحظه ای معادل، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، بهمن ۱۳۸۸.
- [۶] S. G. Abdulsalam, W. Xu, "Analytical study of transformer inrush current transients and its applications", Presented at the international conference on power systems transients (IPST'05) in Montreal, No. IPST05 – 140, Canada, Jun. 2005.
- [۷] M. Hamad, M. Saied, "A study on the inrush current phenomena in transformer substation", IEEE department of electrical engineering college of engineering and petroleum, 2001.
- [۸] A. Tokic, V. Madzarevic, I. Uglesic, "Numerical calculations of three-phase transformer transients", IEEE Trans. Power Del, Vol. 20, No. 4, pp. 2493-2500, Oct. 2005.
- [۹] حمید ظریفیان محقق، بهبود حفاظت ترانسفورماتور با استفاده از شبکه عصبی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران، دی ۱۳۸۷.
- [۱۰] G. B. Kumbhar, V. Kullkarni, "Analysis of sympathetic inrush phenomena in transformers using coupled field circuit approach", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007.
- [۱۱] دکتر حسن منصف، امین ظاهری اسبق، "الگوریتم متوقف کننده عملکرد رله های حفاظتی ترانسفورماتور هنگام وقوع جریان هجومی"، هجدهمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۸۸.



- [۱۲] H. S. Bronzeado, P. B. Brogan, R.Yacamini, "Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction", IEEE Trans, Power System, Vol. 11, No. 4, pp. 2051-2056, Nov. 1996.
- [۱۳] X. Lin, J. Huang, L. Zeng, Z. Q. Bo, "Analysis of electromagnetic transient and adaptability of second-harmonic restraint based differential protection of UHV power transformer", IEEE Trans. Power Del, Vol. 25, No. 4, pp. 2299-2307, Oct. 2010.
- [۱۴] M.A. Rahman, B.Jeyasurya, "A state-of-the-art review of transformer protection algorithms", IEEE Trans. Power Del, Vol. 3, No.2, pp. 534-544, Apr. 1988.
- [۱۵] P.Liu, O.P.Malik, D.Chen, G.S.Hope, and Y.Guo, "Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults", IEEE Trans. Power Del, Vol. 7, No. 4, pp. 1912-1919, Oct. 1992.
- [۱۶] M. Habib, M. A. Marin, "A comparative analysis of digital relaying algorithms for the differential protection of three phase transformers", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 3, No. 3, No.3, pp. 1378-1384, Aug. 1988.
- [۱۷] S. Guocai, Y. Dachuan, "Identifying internal faults of transformer through the similarity degree between voltage and current", power engineering society, Vol. 3, pp. 1868-1872, IEEE, 2000.
- [۱۸] K. Yabe, "Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers", IEEE. Trans. Power Del, Vol. 12, No. 3, pp. 1109-1118, Jul. 1997.
- [۱۹] محمد اسماعیل همدانی گلشن، بهادر فانی محمد آبادی، "تشخیص جریان هجومی ترانسفورماتور از شرایط خطای داخلی با استفاده از تابع مشتق دوم جریان های تفاضلی"، سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، اردیبهشت ۱۳۸۴.
- [۲۰] A. Kulid jian, B. Kasztenng, B. Campbell, "New magnetizing inrush restraining algorithm for power transformer protection", Development in power system protection, IEEE, 2001.
- [۲۱] H. Zhang, J.F. Wen, P. Liu, O. P. Malik, "Discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers using short time correlation transform", Electrical power and energy system, Vol. 24, pp. 557-562, Jul. 2001.

[۲۲] E. Vazquez, I. Maijares, A. Conde, "Transformer differential protection using principal component analysis", IEEE Trans. Power Del, Vol. 23, No. 1, pp. 67-72, Jan. 2008.

[۲۳] محمد حسین جاویدی، هاشم مرتضوی، " بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور مبتنی بر تکنیک بازدارنده شاری به کمک شبکه های عصبی"، هجدهمین کنفرانس بین المللی برق ایران، ۱۳۸۸.

[۲۴] A. G. Phadke, Y. S. Thorp, "A new computer based flux- restraint current differential relay for power transformer protection", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS- 102, No. 11, pp. 3624 – 3629, Nov. 1983.

[۲۵] M. Chul shin, c. Park, Y. Kim, "Fuzzy logic based relaying for large power transformer protection", IEEE trans. Power Del, Vol. 18, No. 3, pp. 718-724, Jul, 2003.

[۲۶] L. Perez, A. Flechasing, J. Mea dorz, Z. Obradovic, "Training and artificial neural network to discrimination between magnetizing inrush current and internal current", IEEE Trans. Power Del, Vol. 9, No. 1, pp. 434-441, Jan, 1994.

[۲۷] S. Sendilkumar, B. L. Mathur, J. Henry, "Differential protection for power transformer using wavelet transform and PNN", International journal of electrical and electron engineering, pp.468-474, May 2010.

[۲۸] S. Jazebi, B. Vahidi, S.H. Hosseinian, J. Faiz, "Magnetizing inrush current identification using wavelet based Gaussian mixture models", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 17, No. 6, pp. 991- 1010, Jul. 2009.

[۲۹] G. Mokryani, P. Siano, A. Piccolo, "Inrush current detection based on wavelet transform and probabilistic neural network", Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), No. 14-16, pp. 62-67, Jun. 2010.

[۳۰] O. Ozgonenel, "Wavelet based ANN approach for transformer protection", International Journal of Computational Intelligence, pp. 161–168, 2005.

[۳۱] A. L. Orille-Fernandez, N. K. Ghonaim, J. A. Valencia, "A FIRANN as a differential relay for three phase power transformer protection", IEEE Trans. Power Del, Vol. 16, No. 2, pp. 215-218, Apr. 2001.

- 
- [٣٢] M. Tripathy, R. P. Maheshwari, H. K. Verma, "Power transformer differential protection based on optimal probabilistic neural network", IEEE Trans. Power Del, Vol. 25, No. 1, pp. 102-112, Jan. 2010.
- [٣٣] A. N. Akasun, R. A. Haddad, Multiresolution signal decomposition, New Jersey institute of technology, Newark, NJ, 2001.
- [٣٤] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi, Wavelet toolbox for use with matlab, March. 1996.
- [٣٥] S. Mallat, A wavelet tour of signal processing, Ecole polytechnique, Paris, Courant institute, New York University, 1999.
- [٣٦] P. S. Addison, The illustrated wavelet transform handbook, Napier University, Edinburg, UK, 2002.
- [٣٧] Ghosh, A, G. Ledwich, "Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition", Kluwer academic publishers, USA, 2002.
- [٣٨] V. L. Phan, K. P. Wong, "Wavelet transform based algorithm for harmonic analysis of power system waveform", IEE Proceeding of generation, Transmission and distribution, Vol. 146, No. 3, pp. 249-254, May. 1999.
- [٣٩] V. L. Phan, K. P. Wong, "Antidistortion method for wavelet transform filter banks and nonstationary power system", IEE Proceeding of generation, Transmission and distribution, Vol. 148, No. 2, pp. 117-122, Mar. 2001.
- [٤٠] V. L. Phan, K. P. Wong, N. Watson, J. Arrillaga, "Sub-harmonic state estimation in power systems", IEEE Power engineering society winter meeting, Vol. 2, pp. 1168-1173, Jan. 2000.
- [٤١] R. Zhen, H. Qungu, G. Lin, H. Wenying, "A new method for power system frequency tracking based on trapezoid wavelet transform", International conference on advances in power system control, Operation and management, Vol. 2, pp. 364-369, 2000.
- [٤٢] M. T. Chen, S. Meliopoulos, "Wavelet based algorithm for voltage flicker analysis", Proceeding ninth international conference harmonic and quality of power, Vol. 2, pp. 732-738, 2000.

- 
- [٤٣] Y. H. Gu, M. H. J. Bollen, “Time frequency and time scale domain analysis of voltage disturbances”, IEEE Trans. Power Del, Vol. 15, No. 4, pp. 1279-1284, Oct. 2000.
- [٤٤] A. M. Gaouda, M. M. A. Salama, M. R. Sultan, A. Y. Chikhani, “Power quality detection and classification using wavelet muliresoulution signal decomposition”, IEEE Trans. Power Del, Vol. 14, No. 4, pp. 1469-1476, Oct. 1999.
- [٤٥] Z. M. Li, Y. P. Feng, J. Q. Chen, X. G. Zheng, “Wavelet analysis used in UHF partial discharge detection in GIS [gas insulated substation]”, International conference on power system technology, Vol. 1, pp. 163-166, 1998.
- [٤٦] I. K. Yu, C. Kim, Y. H. Song, “A novel short term load forecasting technique using wavelet transform analysis”, Electric machine and power system, Taylor and francis inc, Vol. 28, No. 30, pp. 537-549, 2000.
- [٤٧] F. H. Magnago, A. Abur, “Fault location using wavelets”, IEEE Trans. Power Del, Vol. 13, No. 4, pp. 1475-1480, Oct. 1998.
- [٤٨] P. M. Silveira, R. Seara, H. H. Zurn, “An approach using wavelet transform for fault type identification in digital ralaying”, IEEE power engineering society summer meeting, Vol. 2, pp. 937-942, 1999.
- [٤٩] W. Zhao, Y. H. Song, W. R. Chen, “Improved GPS travelling wave fault locater for power cables by using wavelet analysis”, International journal of electrical power and energy systems, Vol. 23, No. 5, pp. 403-411, Jun. 2001.
- [٥٠] W. Charytoniuk, W. J. Lee, M. S. Chen, J. Cultrera, T. Maffetone, “Arcing fault detection in underground distribution networks feasibility study”, IEEE Trans. Industary application, Vol. 36, No. 6, pp. 1756-1761, Nov-Dec. 2000.
- [٥١] D. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer, W. B. Gish, “Wavelet and electromagnetic power system transients”, IEEE Trans. Powe Del, Vol. 11, No. 2, pp. 1050-1058, Apr. 1996.
- [٥٢] A. P. S. Meliopoulos, C. H. Lee, “An alternative method for transient analysis via wavelets”, IEEE Trans. Powr Del, Vol. 15, No. 1, pp. 114-121, Jan. 2000.
- [٥٣] A. S. Youssef, “A wavelet-based technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers”, IEEE Trans. Power Del, Vol. 18, No. 1, pp. 170-176, Jan. 2003.
-

- [۵۴] A. Rahmati, M. Sanaye-Pasand, "New method for discrimination of transformers internal faults from magnetizing inrush currents using wavelet transform" Power System Technology, and IEEE Power India Conference, 2008. .
- [۵۵] Y. C. Kang, B.E.Lee, S.H.Kang, "Transformer protection relay based on induced voltages", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 29, No. 4, pp. 281-289, May. 2007.
- [۵۶] T. S. Sidhu, M.S. Sachdev, "On line identification of magnetizing inrush and internal faults in three phase transformers", IEEE Trans. Power Del, Vol. 7, No. 4, pp. 1885–1891, Oct, 1992.
- [۵۷] M. Jing, W.Zengping, "A novel algorithm for discrimination between inrush currents and internal faults based on equivalent instantaneous leakage inductance", IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-8, 2007.
- [۵۸] Rockefeller. G. D, "Fault protection with a digital computer," IEEE Trans. Power Apparatus System, vol. 88, no. 4, pp. 438–464, Apr. 1969.
- [۵۹] H. Hiyazi, A. Basak, "Analysis of integral method for fault detection in transformers", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 29, No. 6, pp. 3213-3215, Nov. 1993.
- [۶۰] T. S. Sidhu, M. S. Sachdev, H. C. Wood, "Microprocessor based relay for protecting power transformer", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, Vol. 137, No. 6, pp. 436-444, Nov. 1990.
- [۶۱] محمود زاده باقری، مهرداد جعفر بلند، حسین نبئی، "حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از روش هارمونیک سوم مجازی"، شانزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۳۸۶.
- [۶۲] A. A. HossumEldin, M.A.Refaey, "A novel algorithm for discrimination between inrush current and internal faults in power transformer differential protection based on discrete wavelet transform", Electric Power System Research, Vol. 81, No. 1, pp. 1-6, Jul. 2011.
- [۶۳] M. M. Eissa, "A novel digital directional transformer protection technique based on wavelet packet", IEEE Trans. Power Del, Vol. 20, No. 3, pp. 1830-1836, Jul. 2005.

- 
- [٩٤] H. Monsef, S. Lotfifard, “Internal fault current identification based on wavelet transform in power transformers”, *Electric power systems research*, Vol. 77, No. 12, pp. 1637-1645, Oct. 2007.
- [٩٥] A. Hooshyar, S. Afsharnia, M. Sanaye-Pasand, B. Mahdi Ebrahimi, “A new algorithm to identify magnetizing inrush conditions based on instantaneous frequency of differential power signal”, *IEEE Trans. Power Del*, Vol. 25, No. 4, pp. 2223-2233, Oct. 2010.
- [٩٦] H. Moetazavi, H. Khorashadi-Zadeh, “A new inrush restraint algorithm for transformer differential relays using wavelet transform”, *Power System Technology, International Conference, IEEE*, Vol. 2, pp. 1705-1709, Nov. 2004.
- [٩٧] H. Khorashadi-Zadeh, M. Sanaye-Pasand, “Power transformer differential protection scheme based on wavelet transform and artificial neural network algorithms”, *Universities Power Engineering Conference, UPEC, IEEE*, Vol. 1, PP. 747-752, Sept. 2004.
- [٩٨] P.L. Mao, R.K. Aggarwal, “A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network”, *IEEE Trans. Power Del*, Vol. 16, No. 4, pp. 654-660, Oct. 2001.
- [٩٩] S. A. Saleh, M. A. Rahman, “Testing of a wavelet-packet-transform-based differential protection for resistance-grounded three-phase transformers”, *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 46, No. 3, pp. 1109-1117, May/Jun. 2010.
- [١٠٠] R. C. Gonzalez, R. E. Wood, *Digital image processing, Second Edition*. University of Tennessee, 2001.
- [١٠١] N. Mukhopadhyay, *International encyclopedia of statistical science (chapter: correlation coefficient)*, university of Connecticut-Storrs, Storrs, CT, USA.

## **Abstract**

Differential relays are main and initial protections of power transformer. Therefore fast and accurate operation of these facts has special importance. In some cases incorrect operation of the differential relays is occurred, that is because of inrush currents, saturation of current transformers, transformer over excitation, and differential current due to unbalanced of current transformer ratio through tapchanger operation. Among them, the impact of inrush current is the most important reason of incorrect operation of differential relay. As a result many studies have been carried out to discriminate between fault and inrush current.

In this thesis, a new method for discriminating between fault and inrush current is proposed. In the proposed method, a signal processing tool named as wavelet transform is used. The proposed algorithm is based on the extracted features of frequency and time analysis. The wavelet analysis results in time variant frequency components at different frequency levels. The performed investigations in this thesis on the energy distribution of these components and at the different frequency levels show the energy difference between inrush and internal fault current in the frequency levels. This difference is used to discriminate the fault from inrush currents. In order to form a pattern, and use of it in the proposed algorithm, a statistical measure known as correlation factor is employed. The correlation factor is used to express the relationship between the energies of wavelet transform components at the different frequency levels. In this method a criterion is created and used to block the differential relay in the case of inrush current. Simulation results and experimental laboratory test verify the accuracy, rapidity and reliability of the proposed method.

**Key words:**

Power transformer, differential protection, inrush current, internal fault current, wavelet analysis





Shahrood University of Technology  
Faculty of Electrical and Robotics Engineering

**Title:**

Investigation the Effect of Inrush Current on Differential Protection System  
of Power Transformers

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

Advisor:

Dr. Alireza Ahmadyfard

By:

Masoumeh Rasoulpoor

October  
2011