

روش ضریب همبستگی برای تشخیص جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی با

استفاده از تبدیل موجک در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت

معصومه رسول پور^۱، مهدی بانزاد^۲ و علیرضا احمدی فرد^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- ایران

m.rasoulpoor@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- ایران

m.banejad@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- ایران

ahmadyfard@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله روش جدیدی برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ارائه می شود. در این روش برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت از تبدیل موجک استفاده می شود. با استفاده از تبدیل موجک گسسته، سیگنال جریان به زیر باندهایی تجزیه می شود که اطلاعات بیشتری از ویژگی های سیگنال در باندهای فرکانسی مختلف در اختیار قرار می دهد. همچنین، از تبدیل موجک برای بررسی توزیع انرژی سیگنال در مقیاس های زمانی و فرکانسی مختلف استفاده می شود. این روش تشخیص بر اساس ضریب همبستگی بین بردارهای درصد انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک است؛ به این صورت که با استفاده از تبدیل موجک گسسته، سیگنال جریان به مؤلفه های فرکانسی مختلف تبدیل می شود. سپس با تشکیل بردارهای درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک و محاسبه ضرایب همبستگی بین این بردارها، امکان ایجاد یک معیار تشخیص برای شناسایی جریان هجومی از جریان خطا در الگوریتم پیشنهادی ایجاد می شود. روش ارائه شده در این مقاله برای شرایط مختلف، با استفاده از سیگنال های جریان هجومی و جریان خطای شبیه سازی شده بررسی قرار می شود. شبیه سازی سیگنال های جریان با استفاده از برنامه گذرای الکترومغناطیسی PSCAD/EMTDC که برنامه قدرتمندی برای بررسی سیگنال های گذرا است، انجام می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که الگوریتم پیشنهادی به درستی قادر به تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی در محدوده حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت در زمانی کمتر از یک چهارم سیکل فرکانس قدرت است. همچنین، علاوه بر دقت و قابلیت اطمینان بالا، روش پیشنهادی دارای حجم محاسباتی کمی بوده، بر خلاف بسیاری از روش های معمول به تعیین آستانه عملکرد، در هر سیستم قدرت جدید نیاز ندارد.

واژه های کلیدی: حفاظت دیفرانسیل، ترانسفورماتور قدرت، تبدیل موجک گسسته، خطای داخلی ترانسفورماتور

۱- مقدمه

ترانسفورماتور قدرت محسوب می شوند. عملکرد حفاظت دیفرانسیل بر اساس مقایسه جریان های جاری شده به سمت ترانسفورماتور و جریان های خارج شده از آن در ناحیه حفاظت شده است. مواردی وجود دارند که در آنها، عملکرد رله دیفرانسیل ممکن است دچار اشتباه شود، که از آن جمله می توان به وجود جریان های هجومی، اشباع ترانسفورماتورهای جریان و عملکرد تپ چنجر

رله های دیفرانسیل از حفاظت های اولیه و مهم

۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۰۴/۱۲

نام نویسنده مسئول : مهدی بانزاد

نشانی نویسنده مسئول : ایران-شاهرود - دانشگاه صنعتی شاهرود

- دانشکده برق و رباتیک

روش ضریب همبستگی برای تشخیص جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی.....

صورت گرفته است. در یک روش ارائه شده به نام توان تفاضلی از جمع توان های اکتیو جاری شده به سمت ترانسفورماتور استفاده می شود [۳]. روش پیشنهادی در [۴] بر اساس تبدیل مودال شکل موج های جریان و ولتاژ است. در این روش به اندازه گیری ولتاژ در کنار جریان نیاز بوده و بنابراین دارای محاسبات زیاد و زمان تشخیص طولانی است. در روش زاویه مرده از زمانی که شکل موج جریان نزدیک به صفر است، استفاده شده که این روش نیز دارای زمان تشخیص طولانی است [۵]. روش های جدیدی بر اساس هوش مصنوعی، مانند روش های منطق فازی و شبکه عصبی نیز در سال های اخیر پیشنهاد شده است [۶، ۷، ۸]. روش های مبتنی بر منطق فازی دارای عملکرد مناسبی در هنگام تغییرات سریع در سیستم قدرت نیستند و به عبارت دیگر دارای انعطاف پذیری کمی هستند. همچنین، این روش ها به قوانین زیادی برای یک تصمیم گیری نیاز داشته، ایجاد این قوانین نیز به کار و زمان زیادی احتیاج دارد. از طرف دیگر، تکنیک های مبتنی بر شبکه عصبی به الگوهای آموزشی و حجم محاسباتی زیادی نیاز دارند. همچنین، برای هر تغییر جدیدی در سیستم قدرت به طراحی جدید و ایجاد قوانین جدید برای شبکه عصبی نیاز است.

روش های تحلیل فرکانسی به عنوان ابزار جدید و مفیدی برای بررسی و به دست آوردن ویژگی های سیگنال هایی با ساختار پیچیده مطرح هستند. چنین تحلیل های کارآمدی با به کارگیری ابزارهای جدید در پردازش سیگنال ایجاد می شود. ابزارهای قدیمی پردازش سیگنال مانند تبدیل فوریه بر اساس طبیعت ایستاد و پرودیگ سیگنال ها عمل می کند. از طرف دیگر، اغتشاشات سیستم قدرت غیر پرودیگ، غیر ایستاد، دارای زمان نشست کوتاه و خاصیت نوسانی هستند [۹]. در نتیجه برای چنین سیگنال هایی روش های مبتنی بر تبدیل فوریه مناسب نبوده؛ باید از ابزارهای دیگری استفاده شود. در سال های اخیر برخی روش های جدید پردازش سیگنال، همچون تبدیل موجک برای رفع این مشکلات ارائه شده است. تبدیل موجک به عنوان ابزار

ترانسفورماتور اشاره کرد. در این مقاله عملکرد نادرست رله دیفرانسیل ناشی از جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت که از جمله عوامل مهم و شایع اشتباه عملکرد رله دیفرانسیل است، بررسی میگردد. به طور کلی، هرگونه تغییر ناگهانی در ولتاژ ترمینال ترانسفورماتورهای قدرت به ایجاد جریان های گذرا در ترانسفورماتور قدرت منجر می شود که جریان هجومی نام دارد. در میان انواع جریان های هجومی، جریان های ناشی از سوئیچینگ ترانسفورماتور قدرت دارای اهمیت بوده، بیشترین دامنه جریان را دارا ست. از آنجا که بروز جریان هجومی باعث ایجاد جریان تفاضلی با دامنه زیاد در رله دیفرانسیل می شود، این امر عملکرد نادرست رله را به دنبال دارد.

از معمولترین روش های تشخیص جریان هجومی، استفاده از مؤلفه هارمونیک دوم جریان است که این مؤلفه در جریان هجومی دارای دامنه بزرگتری نسبت به جریان خطای داخلی است [۱]. در این روش نسبت مؤلفه هارمونیک دوم به مؤلفه اصلی جریان با مقدار از پیش تعیین شده ای مقایسه می شود، که در مورد جریان هجومی این نسبت از مقدار آستانه تعیین شده فراتر رفته، به این ترتیب جریان هجومی از جریان خطا تشخیص داده می شود. با استفاده از مواد جدید در ساختار تشکیل دهنده هسته ترانسفورماتور که در سال های اخیر رواج یافته است و تغییراتی همچون به کارگیری خازن های جبران ساز در سیستم قدرت و به خصوص سیستم های دارای خطوط طولانی، تغییراتی در مقدار مؤلفه هارمونیک دوم جریان هجومی و جریان خطا ایجاد شده است. این تغییرات شامل کم شدن مؤلفه هارمونیک دوم جریان هجومی و افزایش آن در جریان خطا است [۲]. همچنین، در برخی خطاهای شدید خارجی ترانسفورماتور سطح مؤلفه هارمونیک دوم جریان خطا از جریان هجومی نیز فراتر رفته، باعث اشتباه در الگوریتم تشخیص می شود. به علت مسائل بیان شده روش های معمول تشخیص جریان هجومی دچار مشکلاتی شده و تلاش های زیادی برای ارائه روش های جدید تشخیص

روی تبدیل موجک و ضریب همبستگی ارائه و کاربرد آنها در روش پیشنهادی توضیح داده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای به‌کارگیری در حفاظت دیفرانسیل در بخش (۴) توضیح داده می‌شود. سپس شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی سیستم قدرت توصیف شده و تحلیل نتایج حاصل از آن در بخش (۵) بیان می‌گردد. همچنین، در بخش ۵ تعدادی از موارد شبیه‌سازی شده و نتایج الگوریتم پیشنهادی در مورد آنها به صورت جدول بیان می‌شود. مقایسه بین روش‌های موجود و روش پیشنهادی در قسمت (۶) و نتیجه‌گیری در بخش (۷) ارائه می‌گردد.

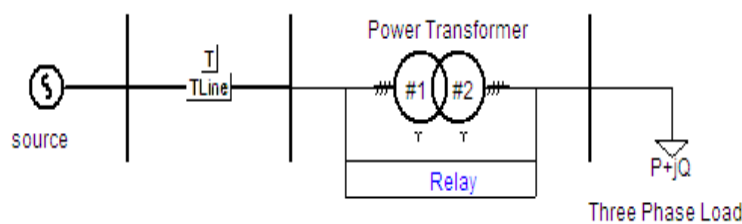
۲- سیستم قدرت شبیه‌سازی شده

به منظور ایجاد سیگنال‌های جریان شبیه‌سازی شده، برای بررسی صحت عملکرد روش ارائه شده، یک سیستم قدرت نمونه با استفاده از برنامه نرم‌افزاری PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود. نمایش تک خطی این سیستم قدرت در شکل (۱) نشان داده شده است. سیستم قدرت توصیف شده شامل یک منبع سه فاز KV ۲۲۰ است که از طریق یک خط انتقال ۲۰ Km به یک ترانسفورماتور سه فاز دو سیم پیچه، (۳۰۰ MVA، ۲۲۰/۱۳۲ KV، YY) متصل است. نقطه ختشی در ترانسفورماتور با اتصال ستاره، زمین شده است و ثانویه ترانسفورماتور به یک بار سه فاز 40Ω و $0.7H$ متصل می‌شود. باید توجه شود که ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه و ثانویه سیم پیچ ترانسفورماتور دارای اتصال دلتا هستند. در این مقاله موارد مختلف عملکرد سیستم قدرت، همچون وقوع جریان هجومی، جریان اتصال کوتاه داخلی و وقوع همزمان جریان هجومی و جریان خطا، روی سیستم قدرت توصیف شده، شبیه‌سازی و بررسی می‌شوند.

مفیدی برای پردازش اطلاعات و سیگنال‌های مختلف، به خصوص سیگنال‌های گذرا و متغیر با زمان مانند سیگنال‌های اغتشاش سیستم قدرت مطرح می‌شود. از طرف دیگر، برای استخراج کامل ویژگی‌های سیگنال به ابزارهایی نیاز است که قادر به تجزیه همزمان سیگنال در هر دو حوزه زمان و فرکانس باشد. تبدیل موجک به عنوان ابزاری که دارای چنین خاصیتی است، اطلاعات مفیدی از ویژگی‌های سیگنال را در اختیار قرار می‌دهد. بنابراین، تبدیل موجک به عنوان ابزار جدیدی در بسیاری از روش‌های تشخیص جریان هجومی در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت استفاده شده است [۱۰، ۱۱، ۱۲].

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت ارائه می‌شود. در روش پیشنهادی در این مقاله تبدیل موجک برای تجزیه سیگنال جریان به ضرایب تقریب و ضرایب جزئیات به کار می‌رود. سپس تشخیص جریان بر اساس معیاری که با توجه به این ضرایب تعیین می‌شود، صورت می‌گیرد. در این روش از یک معیار آماری به نام ضریب همبستگی برای بررسی و شناخت ارتباط بین انرژی ضرایب تبدیل موجک در سطوح مختلف تجزیه استفاده می‌شود. سپس معیار تشخیص با استفاده از این ضرایب همبستگی ایجاد می‌شود. صحت الگوریتم پیشنهادی با استفاده از سیگنال‌های جریان هجومی و جریان خطای شبیه‌سازی شده بررسی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی توانایی الگوریتم پیشنهادی را برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور اثبات می‌کند.

این مقاله به این صورت سازمان دهی شده است: در بخش (۲) سیستم قدرت مورد مطالعه که شبیه‌سازی روی آن اجرا می‌گردد، توصیف می‌شود. روش پیشنهادی در بخش (۳) بیان می‌شود. در این قسمت توضیح مختصری



شکل (۱): مدل سیستم قدرت شبیه‌سازی شده

روش ضریب همبستگی برای تشخیص جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی.....

در طول محور زمان نیز توسط متغیر انتقال "b" ایجاد می شود. تابع موجک بیان شده توسط معادله (۱) به نام موجک مادر و یا موجک پایه شناخته می شود. برای بیان تابع موجک گسسته، این تابع با نمونه گیری از پارامترهای "a" و "b" حاصل می شود که به صورت زیر بیان می شود:

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - b_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2)$$

در این رابطه ضرایب m و n به ترتیب وظیفه تغییر مقیاس و انتقال تابع موجک را بر عهده دارند. همچنین a_0 یک مقیاس ثابت تعیین شده است که در مقدراری بالاتر از یک تنظیم می شود و b_0 پارامتر مکان است که باید بزرگتر از یک باشد. انتخاب های 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 ۴ شناخته می شوند. این آرایش باعث می شود تا تحلیل انجام شده توسط موجک مؤثرتر و دقیقتر باشد [۱۴]. موجک مادر دیادیک به این صورت نوشته می شود (n یک عدد صحیح است):

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (3)$$

موجک های گسسته دیادیک مرتبط با توابع مقیاس و معادل های انتقال یافته آنها هستند. تابع مقیاس به صورت زیر داده می شود:

$$\phi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m}t - n) \quad (4)$$

اگر $X(t)$ یک سیگنال ورودی گسسته با طول محدود $N = 2^M$ باشد، در این صورت تعداد سطوح تجزیه در تبدیل موجک می تواند به صورت $m, 0 < m < M$ باشد. سیگنال ورودی می تواند به صورت عبارت هایی بر اساس بسط تبدیل موجک گسسته بیان شود:

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

در این رابطه $T_{m,n}$ و $S_{m,n}$ به ترتیب به عنوان ضرایب تقریب^۵ و جزئیات^۶ شناخته می شوند. در واقع، ضرایب تقریب و جزئیات متناظر با فیلتر کردن و کاهش نرخ نمونه برداری از سیگنال اصلی $X(t)$ هستند (شکل (۲)). شکل (۲) تجزیه سیگنال اصلی $X(t)$ را به ضرایب تقریب و جزئیات نشان می دهد. در این شکل LP و HP به ترتیب فیلترهای پایین گذر و بالاگذر هستند. طبق این شکل در

۳- روش پیشنهادی بر اساس تبدیل موجک

و ضریب همبستگی

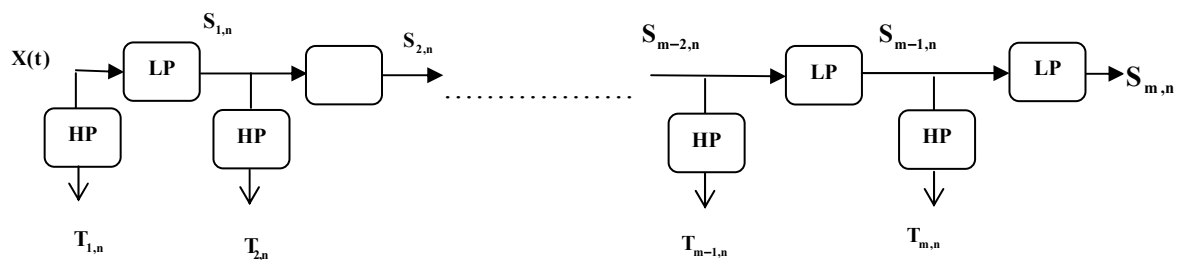
۳-۱- تبدیل موجک گسسته

سیگنال های مورد مطالعه در این مقاله دارای خاصیت غیر ایستاد^۱ هستند؛ به این معنی که ویژگی های آماری این سیگنال ها با گذشت زمان در حال تغییر هستند. از این رو، برای چنین سیگنال هایی تبدیل فوریه معمول، کافی نبوده، قادر به بیان ویژگی های سیگنال به طور صحیح نیست. برای چنین سیگنال هایی به ابزارهای تجزیه سیگنال در هر دو حوزه زمان و فرکانس نیاز است. در میان روش های پردازش سیگنال تبدیل فوریه زمان کوتاه^۲ و تبدیل موجک^۳ دارای چنین توانایی هستند. مشکل تبدیل فوریه زمان کوتاه داشتن پنجره زمان بندی یکنواخت است که فقط اجازه تجزیه سیگنال را در یک پنجره زمان-فرکانسی ثابت می دهد. از طرف دیگر، تبدیل موجک از انتقال و تغییر مقیاس یک تابع اولیه به نام تابع موجک پایه (مادر) حاصل می شود. از این رو، تبدیل موجک قادر به ایجاد پنجره هایی با اندازه های مختلف است. تبدیل موجک به عنوان ابزاری مناسب برای پردازش سیگنال در حوزه زمان و فرکانس مطرح است. بررسی انرژی مؤلفه های حاصل از تبدیل موجک روی سیگنال جریان، مشخص می کند که از اطلاعات موجود در انرژی این ضرایب می توان به عنوان ابزاری برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی استفاده نمود. همچنین، استفاده از فیلترسازی در چند مرحله در تبدیل موجک می تواند به تجزیه چند سطحی سیگنال منجر شود [۱۳]. به طور کلی، موجک ها برای تبدیل سیگنال تحت مطالعه به شکلی که اطلاعات بیشتری از ویژگی های سیگنال را در اختیار قرار می دهد، به کار می روند. از دیدگاه ریاضی تبدیل موجک حاصل کانولوشن تابع موجک با سیگنال اصلی تحت مطالعه است. تابع تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می شود: [۱۴]:

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

تغییر مقیاس تابع موجک؛ یعنی گستردگی و یا فشردگی آن با استفاده از متغیر "a" حاصل می شود. انتقال تابع موجک

نمونه برداری می‌شوند. ضرایب جزئیات نگه داشته شده و مؤلفه های تقریب برای ایجاد مؤلفه های سطوح بعدی، دوباره از فیلترهای پایین گذر و بالاگذر عبور داده می‌شوند. این روند تجزیه در تجزیه چند سطحی سیگنال ادامه می‌یابد؛ تا اینکه سیگنال به یک قسمت پایین گذر در یک مقیاس خاص به اضافه مؤلفه های جزئیات بالاگذر در سطوح مختلف تبدیل می‌شود.



شکل (۲): تجزیه m سطحی سیگنال

گذرایی که باید در سیگنال مشخص شود، انتخاب شود. در این مقاله روی سیگنال هایی با دوره کوتاه مدت، زمان نشست کم، طبیعت نوسانی و فرکانس بالا بحث می‌شود. برای چنین سیگنال هایی موجک مادر دابلیو۸ انتخاب مناسبی است [۱۵].

در روش پیشنهادی از موجک دابلیو۲ با دو ضریب، db2، استفاده می‌شود. مرحله بعد انتخاب تعداد سطوح تجزیه است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، حداکثر تعداد سطوح تجزیه می‌تواند به صورت توانی از ۲ بر حسب تعداد نمونه های موجود در سیگنال اصلی باشد. از آنجایی که پنجره های مورد مطالعه در هر سیکل شامل ۶۴ نمونه است، حداکثر ۶ سطح تجزیه وجود دارد. در این مقاله از پنج سطح استفاده شده و ویژگی های مورد نظر سیگنال برای استفاده در الگوریتم پیشنهادی توسط این پنج سطح مشخص شده است و به تجزیه در سطوح اضافی بیشتر نیازی نیست. در این مقاله از یک پنجره ۶۴ تایی از نمونه ها استفاده شده که پنج سطح ضرایب جزئیات و یک سطح تقریب را نتیجه می‌دهد.

تبدیل موجک گسسته، سیگنال اصلی ابتدا در سطح اول به دو قسمت فرکانس پایین و فرکانس بالا تقسیم می‌شود. مؤلفه های فرکانس پایین که شامل بیشتر انرژی سیگنال هستند، ضرایب تقریب را در سطح اول تشکیل می‌دهند. این ضرایب تقریب با یک فیلتر پایین گذر کانولوشن شده، سپس کاهش نرخ نمونه برداری می‌شوند تا ضرایب تقریب سیگنال را در سطح بعدی ایجاد کنند. از طرف دیگر، ضرایب تقریب، برای تولید ضرایب جزئیات در سطح بعدی، با یک فیلتر بالاگذر کانولوشن شده، کاهش نرخ

باید توجه شود که باند فرکانسی بیان شده توسط هر سطح به طور مستقیم مرتبط با فرکانس نمونه برداری است، که برای تعیین باند فرکانسی تبدیل موجک به کار می‌رود. طبق تئوری نایکوئیست بزرگترین مؤلفه فرکانسی موجود در سیگنال نصف فرکانس نمونه برداری است [۱۷].

در این مقاله از تبدیل موجک گسسته^۷ استفاده می‌شود. پیچیدگی تبدیل موجک گسسته نسبت به تبدیل موجک پیوسته کمتر است. همچنین تعداد ضرایب حاصل از تبدیل موجک گسسته نسبت به نوع پیوسته آن کمتر بوده، از این رو بررسی این ضرایب و بیان الگوی رفتاری آنها به منظور تمایز بین سیگنال های جریانی مختلف آسانتر است. فرکانس نمونه برداری مورد استفاده، برابر ۲۰ KHZ است که متناظر با ۴۰۰ نمونه در هر سیکل فرکانس قدرت، ۵۰ HZ است.

شایان ذکر است که توابع موجک مادر مختلفی برای کاربردهای مختلف وجود دارد. از طرف دیگر، انتخاب موجک مادر مناسب نقش مهمی را در کارآمدی تحلیل سیگنال و تشخیص تغییرات سیگنال ایفا می‌کند. موجک مادر باید بر اساس طبیعت سیگنال تحت مطالعه و نوع

روش ضریب همبستگی برای تشخیص جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی.....

می‌شود:

$$Ed_i = \sum_{n=0}^{2^{M-i}-1} (d_{i,n})^2 \quad (8)$$

در این رابطه M تعداد کل سطوح تجزیه و i سطح تجزیه مورد نظر است. همچنین، انرژی کل سیگنال در هر پنجره لغزشی نیز محاسبه می‌شود (k تعداد نمونه های موجود در هر پنجره لغزشی، و j شماره پنجره لغزشی است):

$$E_j = \sum_{n=0}^{k-1} (I_j(n))^2 \quad (9)$$

درصد انرژی ضرایب جزئیات در هر پنجره لغزشی به صورت درصد انرژی ضرایب جزئیات در هر سطح تجزیه به کل انرژی سیگنال در آن پنجره لغزشی تعریف می‌شود:

$$Ed_{i,j} = \frac{Ed_i}{E_j} \times 100 \quad (10)$$

به این ترتیب، یک بردار، شامل درصد انرژی ضرایب جزئیات تبدیل موجه در هر پنجره لغزشی ایجاد می‌شود:

$$Ed_{i,j} = [Ed_{1,j}, Ed_{2,j}, Ed_{3,j}, Ed_{4,j}, Ed_{5,j}]^T \quad (11)$$

که در آن $Ed_{i,j}$ متناظر با درصد انرژی ضرایب جزئیات به کل انرژی سیگنال، در سطح مشخص i , ($i=1,2,3,4,5$) و پنجره لغزشی j ام است. چون در این مقاله تجزیه سیگنال های جریان در پنج سطح تجزیه صورت می‌گیرد، لذا بردار معرفی شده در رابطه (11) شامل پنج عنصر است که به درصد انرژی ضرایب تبدیل موجه در پنج سطح تجزیه مربوط است. بنابراین، برای یک سیگنال جریان ورودی که شامل N نمونه گسسته است، ماتریس بردارهای درصد انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجه به صورت زیر حاصل می‌شود:

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

از آنجایی که پنجره های نمونه برداری لغزشی شامل نمونه های ۶۴ تایی است، تعداد پنجره ها در یک سیگنال N نمونه ای برابر $j = N - 64$ است. هر ستون در ماتریس

۳-۲- ضریب همبستگی^۹ و مبنای روش

پیشنهادی

روش پیشنهادی در این مقاله بر اساس یک معیار آماری است که برای بیان ویژگی های مؤلفه های جریان های تفاضلی به کار می رود. برای توضیح معیار همبستگی در ابتدا مفهوم کوواریانس^{۱۱} توصیف می شود. معیار کوواریانس در جستجوی یک ارتباط و وابستگی بین دو متغیر حقیقی تصادفی است. با این توصیف می توان بیان نمود که ضریب همبستگی یک فاکتور بهبود یافته از مفهوم کوواریانس است. ضریب همبستگی بین دو متغیر تصادفی x_1 و x_2 که با نماد ρ_{x_1, x_2} نشان داده می شود، به صورت زیر تعریف می شود [۱۶]:

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

در این رابطه σ_i^2 , ($i=1,2$) واریانس است. دو متغیر تصادفی x_1 و x_2 دارای همبستگی منفی، ناهمبسته^{۱۱} و یا دارای همبستگی مثبت هستند، اگر و تنها اگر مقدار ρ_{x_1, x_2} به ترتیب منفی، صفر و مثبت باشد. باید توجه شود که ضریب همبستگی فقط مقادیر بین -۱ تا ۱ را اختیار می کند.

دو متغیر تصادفی بیان شده را به صورت دو ماتریس و یا بردار با طول مساوی در نظر بگیرد. در این صورت، عبارت ضریب همبستگی بین این دو متغیر به صورت زیر خواهد بود:

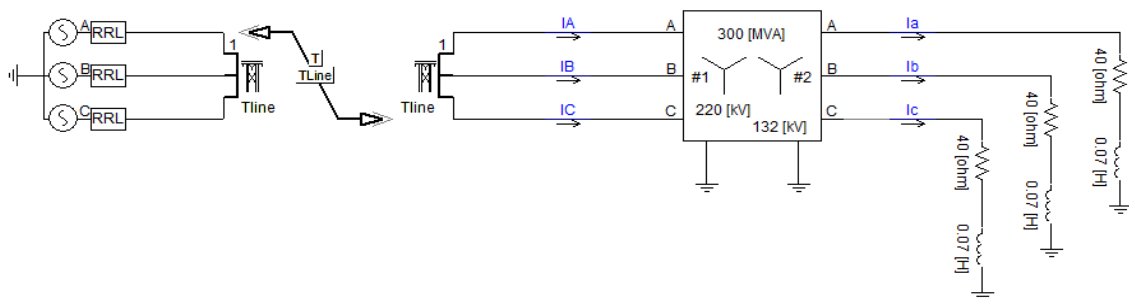
$$\rho_{x_1, x_2} = \frac{\sum_m \sum_n (x_{1,m} - \bar{x}_1)(x_{2,m} - \bar{x}_2)}{(\sum_m \sum_n (x_{1,m} - \bar{x}_1)^2)(\sum_m \sum_n (x_{2,m} - \bar{x}_2)^2)} \quad (7)$$

در این رابطه m, n بعد بردارهای تصادفی و $\bar{x}_i = \text{mean}(x_i)$, $i=1,2$ متوسط دو متغیر تصادفی است.

با توجه به توضیحات بیان شده، ضریب همبستگی و تبدیل موجه برای تشخیص جریان هجومی در ترانسفورماتور قدرت استفاده می شوند. به منظور ایجاد معیار تشخیص در ابتدا انرژی ضرایب جزئیات حاصل از تبدیل موجه در هر سطح تجزیه به صورت زیر محاسبه

درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک در سیگنال های جریان مورد مطالعه است، انتظار می رود که فاکتور بیان شده برای حالت پایدار سیستم قدرت مقدارهایی نزدیک به یک داشته باشد. این امر به خاطر شرایط آرام جریان است که در آن انرژی سیگنال تغییر قابل ملاحظه ای ندارد و بردارهای درصد انرژی ضرایب موجک بین دو پنجره متوالی با هم همبسته هستند. از طرف دیگر، با ایجاد اغتشاش در سیستم و تغییر ناگهانی در مقدار دامنه جریان مقدار دامنه انرژی سیگنال تغییر ناگهانی داشته، معمولاً از مقدار نرمال فراتر می‌رود و تغییرات زیادی در مقدار انرژی ضرایب جزئیات تبدیل موجک در سطوح مختلف ایجاد می شود. در مورد جریان هجومی ترانسفورماتور با توجه به خاصیت نوسانی آن و داشتن طیف انرژی متفاوت در سطوح فرکانسی مختلف، درصد انرژی سیگنال در سطوح فرکانس بالا دارای شکلی نوسانی خواهد بود.

از این رو، تفاوت موجود در مقادیر Factor و رفتار متفاوت این ضرایب که در قسمت شبیه سازی نیز نشان داده خواهد شد، در الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور به کار می‌رود.



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

سمت ترانسفورماتور حفاظت شده محاسبه می شوند. این جریان ها به صورت زیر حاصل می شوند [۱۷]:

$$I_1 = (I_A - I_a) - (I_C - I_c) \quad (15)$$

$$I_2 = (I_B - I_b) - (I_A - I_a) \quad (16)$$

$$I_3 = (I_C - I_c) - (I_B - I_b) \quad (17)$$

در روابط بالا I_A, I_B, I_C جریان های اولیه و

رابطه (۱۲) بیانگر درصد انرژی ضرایب جزئیات حاصل از تبدیل موجک در پنج سطح و مربوط به پنجره لغزشی آرام است. برای نمونه $E_{1,j}$ برابر با درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک در سطح تجزیه اول و پنجره لغزشی آرام است. سپس ضریب همبستگی بین دو بردار متوالی از دو پنجره لغزشی طبق رابطه زیر محاسبه می شود (j شماره پنجره لغزشی است):

$$Factor = correlation(E_{d_j}, E_{d_{j+1}}) = \rho_{j,j+1} \quad (13)$$

در این روابط j بیانگر شماره پنجره لغزشی است. به این ترتیب، ضرایب همبستگی بین هر دو بردار ستونی متوالی در ماتریس (۱۲) محاسبه می شود که حاصل آن به صورت زیر بیان می شود ($\rho_{j,j+1}$ نشان دهنده ضریب همبستگی بین هر دو بردار در ستون های j و j+1 است).

$$Factor = [\rho_{1,2} \ \rho_{2,3} \ \rho_{3,4} \ K \ \rho_{j-1,j}] \quad (14)$$

در این مقاله مقادیر Factor بیان شده در رابطه (۱۴) به عنوان یک معیار تشخیص در حفاظت دیفرانسیل به کار برده می شود. برای به کارگیری معیار معرفی شده (Factor)، مقادیر بردار Factor برای سیگنال های جریان هجومی و جریان خطای داخلی محاسبه می گردد. از آنجایی که مقادیر بیان شده در بردار Factor بیانگر میزان همبستگی بین

۴- الگوریتم پیشنهادی تشخیص جریان

هجومی ترانسفورماتور

در این قسمت رهیافت پیشنهادی در الگوریتم حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت توضیح داده می شود. در نخستین مرحله جریان های تفاضلی رله، از جریان های اندازه گیری شده توسط ترانسفورماتورهای جریان در دو

روش ضریب همبستگی برای تشخیص جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی.....

یک قله و فقط در لحظه شروع خطا وجود داشته، در حالی که این تعداد برای جریان هجومی بسیار بیشتر از یک عدد بوده و در زمان های بعد و تا نشست کامل جریان هجومی و رسیدن به شرایط نرمال جریان، ادامه می یابد. در شمارش تعداد قله ها باید توجه شود که قله هایی از $\rho_{j,j+1}$ که دامنه آنها از ۰/۹ کمتر است، در نظر گرفته می شوند. عدد ۰/۹ به این علت انتخاب شده است که در شرایط بدون خطا مقدار ضریب همبستگی بسیار نزدیک به یک است که برای اطمینان از عملکرد الگوریتم، این عدد انتخاب شده و همچنین نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مقدار ضریب همبستگی پس از رفع حالت گذرا در شرایط خطای داخلی از مقدار ۰/۹ کمتر می شود. بنابراین فراتر رفتن تعداد قله هایی با دامنه کمتر از ۰/۹ در هر یک از مقادیر 'Factor 1'، 'Factor 2' و 'Factor 3' از تعداد یک بیانگر وقوع جریان هجومی بوده و در غیر این صورت سیگنال، به عنوان جریان خطا در نظر گرفته می شود. بنابراین، معیار عملکرد الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{cases} \text{Peaks number of (Factor)} > 1 & \text{Inrush current} \\ \text{Otherwise} & \text{Fault current} \end{cases} \quad (18)$$

اگر هر یک از فاکتورهای تشخیصی در الگوریتم پیشنهادی بروز یک خطای داخلی را تأیید نمایند، یک سیگنال تریپ به بریکرهای دو طرف ترانسفورماتور، به منظور ایزوله کردن ترانسفورماتور خطا دار از بقیه سیستم قدرت، ارسال می شود. شکل (۴) دیاگرام الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد. مراحل عملکرد الگوریتم به طور خلاصه به صورت زیر است:

- ۱- جریان های تفاضلی سه فاز طبق روابط (۱۵)، (۱۶)، (۱۷) محاسبه می شوند.
- ۲- پنجره های لغزشی، شامل ۶۴ نمونه گسسته از سیگنال های جریان تفاضلی، در هر مرحله از اجرای الگوریتم تعیین می شوند.
- ۳- جریان های تفاضلی با آستانه عملکرد رله دیفرانسیل مقایسه شده و در صورت بزرگتر بودن هر کدام از آنها از عدد آستانه، الگوریتم وارد مرحله بعد شده، در غیر این صورت به ابتدای الگوریتم بر می گردد.

جریان های ثانویه ترانسفورماتور قدرت و I_a, I_b, I_c جریان های تفاضلی هستند (شکل (۳)). بنابراین I_1, I_2, I_3 سیگنال های ورودی بوده که الگوریتم پیشنهادی روی آنها اعمال می شود. جریان های تفاضلی هر سه فاز با یک مقدار آستانه از پیش تعیین شده مقایسه می شوند. مقدار آستانه جریان بر اساس ویژگی های سیستم قدرت، ترانسفورماتور قدرت و مشخصه عملکرد رله دیفرانسیل و به منظور جلوگیری از عملکرد رله در شرایط نرمال سیستم و یا بروز خطاهای شدید خارج از ترانسفورماتور تعیین می شود. اگر هر کدام از جریان های تفاضلی از مقدار آستانه تعیین شده فراتر روند، نشان دهنده وقوع یک اغتشاش در ترانسفورماتور قدرت است و در الگوریتم پیشنهادی تحلیل موجک آغاز شده و سیگنال های جریان تفاضلی با استفاده از تبدیل موجک بیان شده به مؤلفه های جزئیات در پنج سطح و یک سری ضرایب تقریب شکسته می شوند. سپس درصد انرژی ضرایب جزئیات در پنج سطح محاسبه می شود. پس از این مرحله، بردارهای متشکل از درصد های انرژی این ضرایب، تشکیل می شود. در مرحله بعد ضریب همبستگی ($\rho_{j,j+1}$) بین دو بردار متوالی که از دو پنجره لغزشی متوالی تشکیل شده است، محاسبه می شود. مقادیر ρ به همین ترتیب برای سه جریان تفاضلی و پنجره های متوالی نسبت به زمان محاسبه می شود. مقادیر Factor در قسمت شبیه سازی برای سه جریان تفاضلی I_3, I_2, I_1 به ترتیب به صورت 'Factor 1'، 'Factor 2' و 'Factor 3' نشان داده می شوند. سپس شکل موج های 'Factor 1'، 'Factor 2' و 'Factor 3' نسبت به زمان برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی به کار می روند.

نتایج شبیه سازی بخش (۵) نشان می دهند که ضرایب همبستگی برای جریان هجومی حالت نوسانی داشته، برای جریان خطا با رفع حالت گذرا، این فاکتورها دارای طبیعت آرامی شده و به مقداری بسیار نزدیک به یک (حالت همبسته) می رسند. بنابراین، با توجه به شکل های 'Factor 1'، 'Factor 2' و 'Factor 3' یک معیار تشخیص در الگوریتم پیشنهادی تعریف می شود. معیار تعریف شده شامل تعداد قله های موجود در این فاکتورها است. با توجه به نتایج شبیه سازی دیده می شود که برای جریان خطا تعداد

۵- بردارهای درصد انرژی ضرایب جزئیات تبدیل موجک طبق روابط (۱۱ و ۱۲) تعیین می شوند.

۶- ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده، محاسبه می شوند (روابط ۱۳ و ۱۴).

۷- تعداد قله های موجود در ضرایب همبستگی محاسبه شده در رابطه (۱۴) تعیین می شود.

۸- اگر تعداد قله ها از عدد یک بیشتر باشد، سیگنال جریان یک جریان هجومی در نظر گرفته شده و الگوریتم تشخیص مانع عملکرد رله می شود و در غیر این صورت رله دیفرانسیل فرمان قطع ترانسفورماتور را صادر می کند.

۵- نتایج شبیه سازی

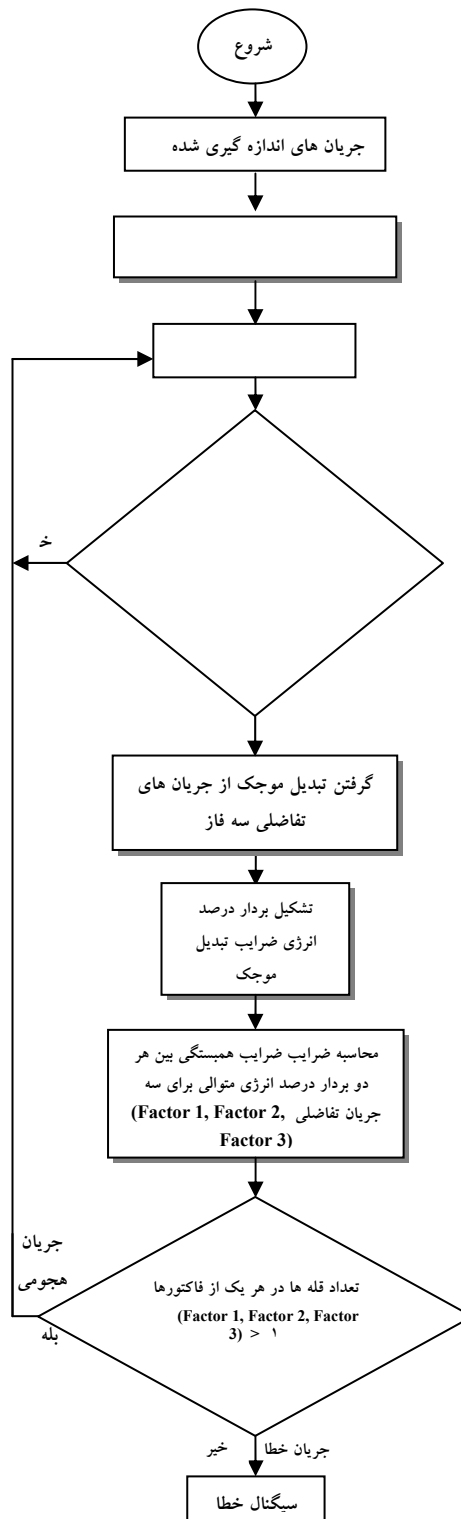
در این قسمت کارایی روش پیشنهادی با استفاده از شبیه سازی انواع جریان هجومی، جریان خطای داخلی و وقوع همزمان جریان هجومی و جریان خطا بررسی و تأیید می شود. اساس شبیه سازی بر مبنای الگوریتم نشان داده شده در شکل (۴) است. سیستم نمونه در شبیه سازی، شکل (۱) است که در نرم افزار PSCAD شبیه سازی می شود. دیاگرام مربوط به شبیه سازی در شکل (۳) نشان داده شده است.

۵-۱- جریان خطا

برای به دست آوردن سیگنال های جریان خطا، خطاهای مختلفی روی ناحیه حفاظتی ترانسفورماتور شبیه سازی می شود. این خطاها شامل خطای تک فاز به زمین (B-G)، خطای دو فاز به زمین (BC-G) و خطای سه فاز به زمین (ABC-G) است. مکان رخداد خطا در سمت ثانویه ترانسفورماتور، زمان وقوع خطا در ۰/۲ ثانیه و زمان تداوم آن ۰/۳ ثانیه است.

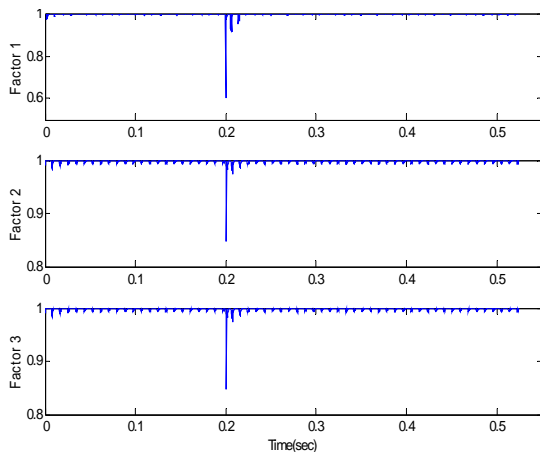
شکل (۵) مقادیر ضریب همبستگی را برای سه جریان تفاضلی سه فاز ('Factor 1'، 'Factor 2' و 'Factor 3') نسبت به زمان نشان می دهد. با توجه به شکل ها، مقدار ضرایب همبستگی برای شرایط پایدار ترانسفورماتور دارای مقادیری بسیار نزدیک به یک است، تا اینکه در زمان رخداد خطا یک تغییر ناگهانی و سریع در مقادیر این فاکتورها ایجاد شده، دوباره پس از زمان بسیار کمی به حالت اولیه؛ یعنی نزدیک مقدار یک بر می گردند. شکل فاکتور همبستگی

۴- از سیگنال های جریان دارای اغتشاش، تبدیل موجک گسسته گرفته شده و سیگنال های جریان به ضرایب تقریب و جزئیات تبدیل می شوند.

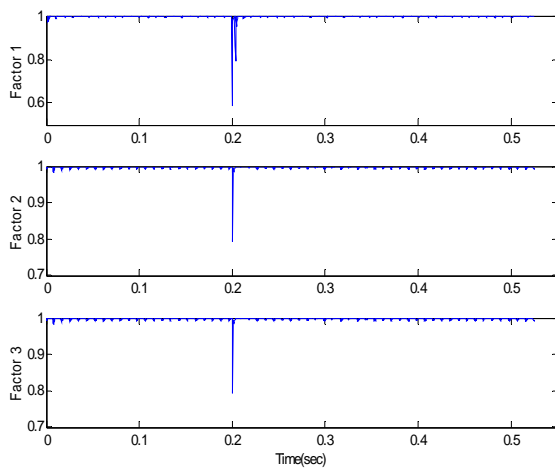


شکل (۴): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

روش ضریب همبستگی برای تشخیص جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی.....



شکل (۶): ضرایب همبستگی در خطای دو فاز به زمین



شکل (۷): ضرایب همبستگی در خطای سه فاز به زمین

۵-۲- جریان هجومی

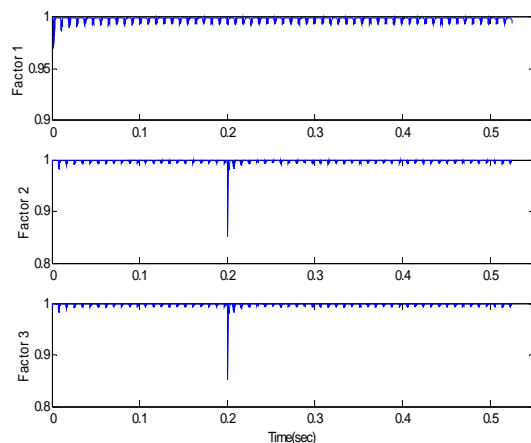
در مورد جریان هجومی مغناطیس کننده ناشی از سوئیچینگ ترانسفورماتور دو عامل اساسی در مقدار دامنه آن مؤثر هستند [۱۷]: فاکتور اول زمان برقرار کردن ترانسفورماتور است که می تواند توسط زمان بسته شدن بریکرهای دو طرف ترانسفورماتور کنترل شود. عامل دوم مقدار مغناطیس پسماند در هسته ترانسفورماتور است که به علت عملیات کلیدزنی که قبلاً در ترانسفورماتور صورت گرفته، ممکن است وجود داشته باشد. اگر پلاریته شار پسماند مخالف پلاریته آن در حالت پایدار باشد، حداکثر دامنه جریان هجومی افزایش می یابد. از طرف دیگر شار پسماند در ترانسفورماتور می تواند با چند بار سوئیچینگ ترانسفورماتور ایجاد شود و یا مقدار مشخص از مغناطیس پسماند می تواند با استفاده از منبع جریان dc قابل کنترل در

برای جریان I_1 ('Factor 1') مشابه دو جریان دیگر نیست، چون جریان این فاز متناظر با جریان های فازهای سالم و بدون خطا بوده، در تمام زمان ها مقدار فاکتور همبستگی نزدیک به یک است.

شکل (۶) مقادیر فاکتورهای همبستگی را برای خطای دو فاز به زمین نشان می دهد. سه فاکتور ضریب همبستگی برای شرایط قبل از خطا دارای مقدار یک هستند. پس از وقوع خطا تغییر ناگهانی و شدیدی در مقدار ضریب همبستگی ایجاد شده و مقدار آن از ۰/۹ بسیار کمتر می شود، ولی دوباره به سرعت به حالت اولیه و مقدار یک بر می گردد. در این شکل چون تمام جریان های تفاضلی سه فاز وابسته به جریان خطا هستند، سه فاکتور همبستگی برای سه جریان دارای رفتار مشابه هستند.

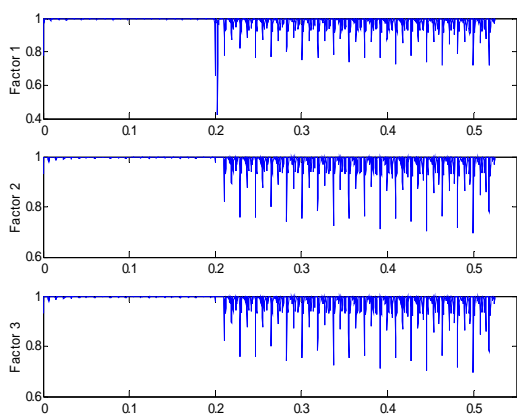
نوع دیگر جریان خطا مربوط به خطای سه فاز است که فاکتورهای همبستگی جریان های آن در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل نیز مانند دو خطای دیگر مقادیر 'Factor 1'، 'Factor 2' و 'Factor 3' قبل از خطا دارای مقدار یک هستند و در لحظه وقوع خطا دارای یک نزول ناگهانی شده، دوباره به حالت اولیه بر می گردند.

در تمام موارد جریان های خطاهای بیان شده، دیده می شود که مقادیر فاکتورهای همبستگی فقط در لحظه بروز خطا از مقدار ۰/۹ بسیار کمتر شده، سپس به حالت اولیه بر می گردند. بنابراین، همانطور که انتظار می رفت، در مورد جریان های خطا فقط یک قله وجود دارد که دامنه آن از ۰/۹ کمتر می شود.



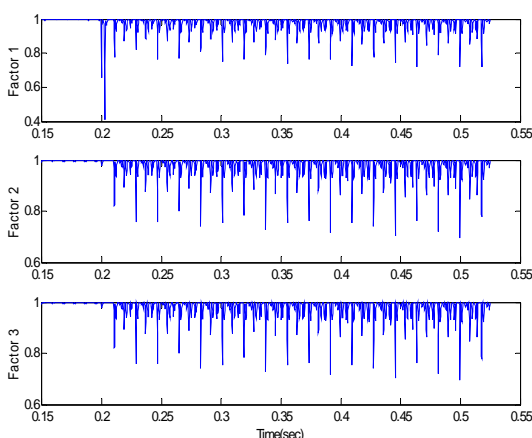
شکل (۵): ضرایب همبستگی در خطای تک فاز به زمین

فاکتورهای همبستگی را برای جریان های تفاضلی سه فاز و برای مورد ذکر شده نشان می دهد. با توجه به شکل دیده می شود که مقادیر ضریب همبستگی قبل از وقوع خطا دارای مقدار یک بوده در زمان وقوع خطا دارای یک تغییر و نزول ناگهانی کمتر از $0/9$ می شوند. سپس این مقادیر مانند وقوع خطای داخلی به سرعت به مقدار قبلی یک بر می گردند. بنابراین، فقط یک قله در مقادیر ضریب همبستگی برای هر یک از جریان های سه فاز وجود داشته و الگوریتم پیشنهادی به سرعت خطای ترانسفورماتور را تشخیص داده، اشتباهی در تشخیص آن صورت نمی گیرد.



شکل (۸): ضرایب همبستگی در جریان هجومی بدون شار

پسماند



شکل (۹): ضرایب همبستگی در جریان هجومی با شار پسماند

مدل شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD تولید شود [۱۸]. در این مقاله جریان هجومی ترانسفورماتور درحالی شبیه سازی می شود که ترانسفورماتور بدون بار بوده، بریکرهای وصل کننده ترانسفورماتور به منبع ولتاژ در سمت اولیه ترانسفورماتور قرار دارند. چندین مورد از جریان های هجومی با زمان های کلیدزنی مختلف شبیه سازی می شود که در این مقاله کلیدزنی در زمان $0/2$ ثانیه نشان داده می شود. شکل های (۸ و ۹) فاکتور ضریب همبستگی را برای جریان هجومی بدون در نظر گرفتن شار پسماند و با وجود آن نشان می دهند. در شکل (۸) ترانسفورماتور برای نخستین بار کلیدزنی شده، در شکل (۹) برای در نظر گرفتن شار پس ماند، دو بار کلیدزنی انجام می شود و جریان های هجومی حاصل از کلیدزنی دوم در نظر گرفته می شوند. از شکل ها واضح است که مقدار ضریب همبستگی در حالت پایدار و قبل از کلیدزنی ترانسفورماتور مانند شرایط خطای داخلی دارای مقدار نزدیک به یک است. پس از کلیدزنی ترانسفورماتور تغییر ناگهانی در مقادیر ضریب همبستگی برای جریان های هر سه فاز ایجاد می شود و دامنه آنها از مقدار $0/9$ کمتر می شود. در مورد جریان هجومی بر خلاف خطای داخلی فاکتورهای همبستگی به مقدار قبلی یک، بر نمی گردد و با یک شکل نوسانی ادامه می یابد. بنابراین، این مقادیر که از $0/9$ کوچکتر می شوند، به عنوان قله هایی در شمارش تعداد نوسان ها در نظر گرفته می شوند. از این رو، تعداد قله های زیادی در هر یک از مقادیر 'Factor 1'، 'Factor 2' و 'Factor 3' ایجاد شده و در الگوریتم پیشنهادی تعداد قله ها از یک فراتر رفته، مانع عملکرد نادرست رله دیفرانسیل می شود.

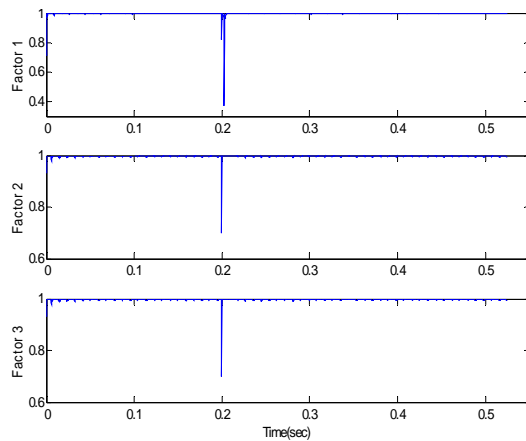
۵-۳- وقوع همزمان جریان هجومی و جریان خطا

پس از بررسی جریان های هجومی و خطا به طور جداگانه، وقوع همزمان آنها در این مقاله در نظر گرفته می شود. مورد بیان شده شامل خطای سه فاز به زمین در سمت ثانویه ترانسفورماتور و کلیدزنی ترانسفورماتور در سمت اولیه آن و در زمان $0/2$ ثانیه است. شکل (۱۰)

روش ضریب همبستگی برای تشخیص جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی.....

شده در ۵-۱ تا ۵-۳، به همراه تعداد دیگری از موارد شبیه سازی شده هستند. در هر جدول نوع سیگنال مورد مطالعه که جریان هجومی و یا خطای داخلی ترانسفورماتور است، مشخص شده است. همچنین تعداد قله های موجود در فاکتورهای همبستگی و نیز جواب نهایی الگوریتم آورده شده است.

همچنانکه نتایج حاصل از جداول فوق نشان می دهد وهمانطور که قبلا که توضیح بیان گردید، در هنگام وقوع جریان خطا تعداد قله های موجود در فاکتورهای همبستگی به تعداد یک محدود می شود، درحالیکه این تعداد برای جریان هجومی بیشتر از یک می شود. نتایج نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی به درستی قادر به تشخیص جریان هجومی می باشد.



شکل (۱۰): ضرایب همبستگی در وقوع همزمان جریان هجومی و جریان خطا

۴-۵- بررسی نتیجه الگوریتم پیشنهادی روی

موارد مختلف شبیه سازی

در این مرحله برای اثبات بیشتر درستی روش ارائه شده، موارد شبیه سازی شده در قسمت های قبلی همراه چندین مورد دیگر به صورت خلاصه بیان می گردد. مشخصات سیستم شبیه سازی شده در بخش ۲ آورده شده است. در این قسمت انواع خطاها در دو حالت تحت بار و بدون بار شبیه سازی می شود. جداول (۱) تا (۳) موارد شبیه سازی شده را نشان می دهند. جداول شامل خلاصه ای از نتیجه الگوریتم پیشنهادی در موارد شبیه سازی های بیان

۶- مقایسه روش پیشنهادی با روش های

موجود تشخیص جریان هجومی

در این قسمت خلاصه ای از مقایسه روش پیشنهادی نسبت به روش های موجود در جدول زیر آورده شده، مزایای روش پیشنهادی نسبت به این روش ها بیان می گردد. جدول بیان شده، نشان دهنده برتری روش پیشنهادی نسبت به روش های موجود است.

جدول (۱): نتایج شبیه سازی برای جریان خطا

	نوع خطا	تعداد قله های موجود در فاکتورهای همبستگی			
		Factor 1	Factor 2	Factor 3	نتیجه الگوریتم
سیستم تحت بار	B- G	0	0	1	جریان خطا
	BC- G	1	1	1	جریان خطا
	ABC- G	1	1	1	جریان خطا
سیستم بدون بار	B- G	0	1	1	جریان خطا
	BC- G	1	1	1	جریان خطا
	ABC- G	1	1	1	جریان خطا

جدول (۲): نتایج شبیه سازی برای جریان هجومی

جریان هجومی	تعداد قله های موجود در فاکتورهای همبستگی			
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	نتیجه الگوریتم
سیستم تحت بار	بیش از یک قله	بیش از یک قله	بیش از یک قله	جریان هجومی
سیستم بدون بار	بیش از یک قله	بیش از یک قله	بیش از یک قله	جریان هجومی

جدول (۳): نتایج شبیه سازی برای وقوع همزمان جریان هجومی و جریان خطا

نوع خطا	تعداد قله های موجود در فاکتورهای همبستگی			نتیجه الگوریتم
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	
B- G	1	1	1	جریان خطا
BC- G	1	1	1	جریان خطا
ABC- G	1	1	1	جریان خطا

جدول (۴) - مقایسه روش پیشنهادی با روش های موجود

مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش موجود	عیب روش موجود	مرجع مربوط به روش تشخیص جریان هجومی
از مولفه هارمونیک دوم جریان که می تواند در شرایط مختلف متغیر باشد، استفاده نمی شود.	روش بر مبنای استفاده از مؤلفه دوم هارمونیک جریان است	[۱، ۱۰]
فقط از سیگنال جریان استفاده نموده و به ترانسفورماتور ولتاژ برای اندازه گیری و ثبت سیگنال ولتاژ نیاز ندارد.	نیاز به استفاده از سیگنال ولتاژ علاوه بر استفاده از سیگنال جریان	[۳، ۴]
سادگی محاسبات و عدم نیاز به برنامه های یادگیری	نیاز داشتن به برنامه های زمان گیر آموزشی و پر حجم بودن محاسبات روش	[۶، ۷، ۸]
عدم وابستگی به شکل موج سیگنال جریان و استفاده از انرژی سیگنال	وابسته بودن به شکل موج سیگنال های جریان که با تغییر پارامترهای سیستم می تواند تغییر نماید	[۱۷]
استفاده مستقیم از سیگنال های حاصل از تبدیل موجک و پاسخ سریع الگوریتم پیشنهادی	استفاده از برنامه های آموزش سیگنال های جریان حاصل از تبدیل موجک و طولانی شدن الگوریتم تشخیص	[۷، ۱۵]

۷- نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی، بر اساس تبدیل موجک گسسته ارائه شده است، که بر خلاف روش های قدیمی پردازش سیگنال مانند تبدیل فوریه قادر به حفظ مؤلفه های زمانی سیگنال است و از این رو، برای سیگنال های گذرای سیستم قدرت مناسبتر است. بعلاوه، در این روش فقط از سیگنال های جریان استفاده شده است و به اندازه گیری و ثبت سیگنال های ولتاژ نیاز ندارد. همچنین، در روش پیشنهادی از روش های محاسباتی پیچیده و برنامه های آموزشی زمان گیر، همچون شبکه عصبی و منطق فازی استفاده نشده است و الگوریتم تشخیص با یک سری محاسبات ساده اجرا می گردد. الگوریتم پیشنهادی بر اساس درصد انرژی ضرایب حاصل از تبدیل موجک و معیار آماری ضریب همبستگی شکل گرفته است. صحت عملکرد

الگوریتم پیشنهادی با شبیه سازی یک سیستم قدرت نمونه بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی بیانگر این مطلب است که فاکتور همبستگی برای جریان هجومی حالت نوسانی داشته، برای جریان خطا نزدیک مقدار یک، به اشباع می رسد. بر این اساس، تعداد قله های موجود در فاکتور همبستگی در مورد جریان هجومی از عدد یک فراتر می رود، در حالی که برای جریان خطا فقط یک قله وجود دارد؛ به این معنا که در جریان خطا پس از رفع حالت گذرا بردارهای انرژی حاصل از ضرایب جزئیات تبدیل موجک با هم همبسته هستند. نتایج شبیه سازی بیانگر دقت و قابلیت اطمینان الگوریتم پیشنهادی در تشخیص انواع جریان های جاری شده از ترانسفورماتور است.

مراجع

- [1] X. Lin, J. Huang, L. Zeng, Z. Q. Bo, "Analysis of electromagnetic transient and adaptability of second-harmonic restraint

- of wavelet-packet-transform differential protection for power transformers”, IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 47, No. 2, pp. 1003-1012, March-April 2011.
- [13] A.N. Akansu, R.A. Haddad, Multiresolution signal decomposition (Transforms, Subbands, and Wavelets), Second edition, New Jersey Institute of Technology, Newark, Nj, Academic press. 1992.
- [14] P.S. Addison, The illustrated wavelet transform handbook, Napier University, Edinburgh, UK, IOP publishing Ltd 2002.
- [15] 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.
- [16] N. Mukhopadhyay, International encyclopedia of statistical science (chapter: correlation coefficient), university of Connecticut-Storrs, Storrs, CT, USA.
- [17] A.A. Hossain, 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.
- [18] D. Woodford, “Introduction to PSCAD V3”, in Manitoba HVDC Research Centre Inc, Winnipeg, MB, Canada, Jan. 2001.
- based differential protection of UHV power transformer”, IEEE Trans. Power Del, Vol. 25, No. 4, pp. 2299-2307, Oct. 2010.
- [2] P.Liu, O.P.Malik, D.Chen, G.S.Hope, Y.Guo, “Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.7, No. 4, p.1912-1919, October 1992.
- [3] K. Yabe, “Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 3, pp. 1109-1118, Jul, 1997.
- [4] 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.
- [5] 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, NO. 7, p. 557-562, Jul. 2001.
- [6] M.C. Shin, C.W. Park, J.H. Kim, “Fuzzy logic-based relaying for large power transformer protection”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp. 718-724, uly 2003.
- [7] 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), Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium, pp. 62-67, Jun. 2010.
- [8] M. Tripathy, R. P. Maheshwari, H. K. Verma, “Power transformer differential protection based on optimal probabilistic neural network”, IEEE trans, Power Delivery, Vol. 25, No. 1, pp. 102-112, January 2010.
- [9] S.K. Pandy and L. Satish, “Multiresolution signal decomposition: A new tool for fault detection in power transformers during impulse tests”, IEEE. Trans. Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 1194-1200, Nov. 1998.
- [10] O.A.S. Youssef, “A wavelet-based technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003.
- [11] 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.
- [12] S.A. Saleh, “A new implementation method

¹ Non- Stationary

² Short- Time Fourier Transform (STFT)

³ Wavelet Transform (WT)

⁴ Dyadic

⁵ Approximation Coefficient

⁶ Detail Coefficient

⁷ Discrete Wavelet Transform (DWT)

⁸ Daubechies

⁹ Correlation Coefficient

¹⁰ Covariance

¹¹ Uncorrelated