

روشی جدید بر مبنای تبدیل موجک جهت افزایش پایداری رله دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت در برابر جریان هجومی و اشباع ترانسفورماتورهای جریان

ابوذر رحمتی و مجید صنایع پسند

که در برخی برق دار کردن ترانسفورماتورهای قدرت، تا چندین برابر جریان نامی می‌رسد، می‌تواند موجب عملکرد نابجای رله دیفرانسیل گردد. علاوه بر این جریان تفاضلی کاذبی که هنگام اشباع ترانسفورماتورهای جریان در اثر خطای خارجی ایجاد می‌گردد نیز می‌تواند موجب عملکرد نابجای رله دیفرانسیل شود. این عملکردهای نابجا می‌توانند قابلیت اطمینان و پایداری کل سیستم قدرت را تحت تأثیر قرار دهند. بنابراین از جمله مهم‌ترین موارد در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت، تشخیص جریان هجومی از جریان ناشی از خطای داخلی با سرعت و دقت زیاد و همچنین پایداری در برابر پدیده اشباع ترانسفورماتورهای جریان هنگام بروز خطای خارجی می‌باشد.

بخش عمده‌ای از روش‌های تشخیص خطا در حفاظت دیفرانسیل، روش‌های عمل‌کننده بر اساس محتوای هارمونیک جریان تفاضلی هستند. اصولاً این روش‌ها جهت تشخیص جریان هجومی بر این اصل استوارند که نسبت هارمونیک دوم جریان تفاضلی به مؤلفه اصلی این جریان، در این حالت بزرگ‌تر از حالت خطا می‌باشد [1]. ترانسفورماتورهای مدرن که با مواد مغناطیسی بهبودیافته ساخته می‌شوند، دارای نقطه زانویی بالاتری هستند و در نتیجه دامنه مؤلفه هارمونیک دوم آنها کوچک‌تر می‌باشد و حفاظت‌هایی را که بر اساس مهار هارمونیک دوم کار می‌کنند، دچار مشکل می‌کند [2]. همچنین هارمونیک دوم در برخی موارد همچون اشباع CT، حضور خازن موازی و خازن‌های توزیع‌شده در خط انتقال بلند که به ترانسفورماتورها متصل هستند، در خطای داخلی می‌تواند نزدیک یا بزرگ‌تر از مقداری باشد که در حالت جریان هجومی دارد و بدین ترتیب موجب عملکرد غیر صحیح رله شود [3]. به‌منظور جلوگیری از مشکلات روش‌های مبتنی بر هارمونیک دوم که در بالا ذکر شد، دسته‌ای از روش‌ها علاوه بر سیگنال جریان از سیگنال ولتاژ نیز استفاده کرده‌اند [4]. در [5] از روش توان تفاضلی برای تشخیص خطا از جریان هجومی استفاده شده است. در [6] نیز روشی برای تشخیص خطا از جریان هجومی بر اساس تبدیل مودال شکل موج‌های ولتاژ و جریان پیشنهاد شده است. از جمله مشکلات این روش‌ها استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ و افزایش هزینه و پیچیدگی الگوریتم حفاظتی آنها می‌باشد. دسته‌ای دیگر از روش‌ها، خطا را بر اساس اعوجاج شکل موج‌های جریان تفاضلی تشخیص می‌دهند. با توجه به این که فاصله بین پیک‌های متوالی در حالت جریان هجومی بیشتر از حالت خطاست، یکی از روش‌ها بر اساس اندازه‌گیری مدت زمان بین پیک‌های متوالی جریان تفاضلی عمل می‌کند [7]. مدت زمان نزدیکی شکل موج جریان تفاضلی به صفر، به‌عنوان معیار عملکرد در روشی دیگر است [8]. تأثیر اشباع CTها در این روش‌ها و تأخیر در تشخیص خطا در این دسته از الگوریتم‌ها از مشکلات آنها می‌باشد.

چکیده: رله حفاظتی دیفرانسیل به‌عنوان مهم‌ترین و عمده‌ترین رله حفاظتی الکتریکی در قبال اختلال در ایزولاسیون ترانسفورماتور محسوب می‌شود. تلاش‌های مداوم به‌منظور هوشمند نمودن هرچه بیشتر این نوع رله حفاظتی توسط کارخانجات سازنده مختلف صورت گرفته و تاکنون روش‌ها و ابداعات گوناگونی جهت عملکرد بهتر رله معرفی شده است. هرگونه عملکرد نابجای رله دیفرانسیل با قطع ترانسفورماتور در طی بهره‌برداری می‌تواند سبب بروز خاموشی‌های گسترده شده و با ناپایداری شبکه همراه باشد. به‌همین علت بررسی عوامل مؤثر در کار نابجای رله و پیش‌بینی‌های به عمل آمده به منظور مقابله با آن حائز اهمیت می‌باشد. از جمله مهم‌ترین پدیده‌هایی که ممکن است باعث ایجاد اختلال در عملکرد رله دیفرانسیل گردد، برقراری جریان هجومی هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور و اشباع ترانسفورماتورهای جریان می‌باشد. در این مقاله ابتدا الگوریتمی جدید بر مبنای رفتار متفاوت جریان‌های تفاضلی تحت شرایط برقراری جریان هجومی و جریان خطا جهت تمایز این دو جریان در رله دیفرانسیل ارائه گردیده است. روش ارائه‌شده قادر است در کمتر از ربع سیکل جریان هجومی را از خطای داخلی تشخیص دهد. در ادامه این مقاله با استفاده از اندیسی که از فرکانس‌های بالا و با استفاده از تبدیل موجک¹ استخراج می‌گردد، جریان مهار در مشخصه رله دیفرانسیل بهبود می‌یابد. در روش فوق هنگام خطای خارجی و اشباع ترانسفورماتورهای جریان، رله دیفرانسیل از پایداری قابل ملاحظه‌ای برخوردار خواهد شد. صحت الگوریتم‌های ارائه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی خطاهای مختلف و شرایط سوئیچینگ متفاوت توسط نرم‌افزار ATP/EMTP نشان داده شده است.

کلید واژه: اشباع ترانسفورماتور جریان، تبدیل موجک، ترانسفورماتور قدرت، جریان هجومی، رله دیفرانسیل.

1- مقدمه

مهم‌ترین حفاظت الکتریکی ترانسفورماتورهای قدرت، حفاظت دیفرانسیل می‌باشد. این سیستم حفاظتی باید از قابلیت اطمینان زیادی برخوردار باشد. بدین مفهوم که در شرایط غیر خطا مانند حالت جریان هجومی و یا اشباع ترانسفورماتورهای جریان در اثر خطای خارجی، نباید عمل کند و در شرایط خطا باید با سرعت قابل قبول عمل نماید. از آنجا

این مقاله در تاریخ 26 آذر ماه 1386 دریافت و در تاریخ 14 تیر ماه 1388 بازنگری شد.

ابوذر رحمتی، انستیتو برق و کامپیوتر، دانشکده فنی دانشگاه تهران، امیرآباد، کارگر شمالی، تهران، (email: abrahmati@gmail.com).
مجید صنایع پسند، انستیتو برق و کامپیوتر، دانشکده فنی دانشگاه تهران، امیرآباد، کارگر شمالی، تهران، (email: msanaye@ut.ac.ir).

سیگنال‌ها نمی‌باشد. از طرف دیگر تبدیل فوریه در مورد سیگنال‌های ایستا کاربرد دارد. به عبارت دیگر زمان ایجاد گذرا در تحلیل انجام‌شده توسط تبدیل فوریه تشخیص داده نمی‌شود و یک تبدیل حوزه فرکانس است که لحظه تغییر شکل سیگنال را نشان نمی‌دهد. این مطلب مهم‌ترین عیب تبدیل فوریه می‌باشد زیرا اساس بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در سیستم قدرت بر لحظه تغییر شکل سیگنال استوارند [15]. به منظور حل مشکلات فوق WFT^1 به کار برده می‌شود و در آن سیگنال توسط پنجره‌های متحرک در زمان و اندازه ثابت، جاروب می‌شوند. بدین ترتیب تبدیل به زمان بستگی پیدا کرده و زمان وقوع اغتشاش را معلوم می‌نماید. اندازه پنجره‌ها برای همه سیگنال‌ها ثابت است و در نتیجه برای همه آنها درجه تفکیک ثابتی در نظر گرفته می‌شود. لذا به منظور فائق آمدن بر مشکلات ذکرشده از تبدیل موجک استفاده می‌شود.

تبدیل موجک ابزاری بسیار قوی به منظور پردازش سیگنال‌های با گذراها و اعوجاج‌های بسیار می‌باشد [9] و [12]. تبدیل موجک، توسط انتقال (جابجایی در زمان) و تأخیر (فشرده‌گی در زمان) یک تابع موجک، به نام موجک مادر ایجاد می‌کند. تابع موجک بر حسب زمان و فرکانس بیان می‌شود تا ضرایب تبدیل موجک در سطوح مختلف فرکانسی بر حسب زمان به دست آیند. این امر موجب می‌شود که تبدیل موجک ابزار مناسبی برای بررسی سیگنال‌های با گذراهای محلی² باشد. خروجی تبدیل موجک همانند WFT به صورت دوبعدی (زمان - فرکانس) بیان می‌شود. با این تفاوت که طول پنجره در تبدیل موجک می‌تواند متغیر باشد. یعنی پنجره در فرکانس‌های زیاد، باریک و در فرکانس‌های پایین پهن می‌شود. همچنین در مقایسه با WFT ، تبدیل موجک می‌تواند فرکانس‌های زیاد را به طور مستقل از فرکانس‌های کم تشخیص دهد. یعنی در تبدیل موجک همانند WFT همه طیف‌های فرکانسی با هم تحریک نمی‌شوند [15].

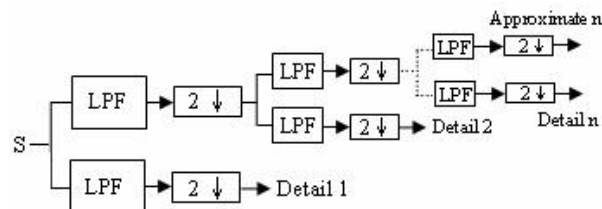
شکل 1 روند انجام تبدیل موجک را نشان می‌دهد که در آن S سیگنال اصلی است. سیگنال از دو فیلتر مکمل به نام‌های فیلتر تجزیه پایین‌گذر³ و بالاگذر⁴ عبور می‌کند. در هر مرحله سیگنال اصلی به دو باند فرکانسی برابر تقسیم می‌شود. خروجی فیلتر پایین‌گذر، مجدداً خود به دو بخش تقسیم شده و این روند تا به دست آمدن باند فرکانسی از پیش تعیین شده ادامه می‌یابد. اگر فرض شود فرکانس نمونه‌برداری سیگنال اصلی f_s باشد با توجه به تئوری نایکوئیست بزرگ‌ترین فرکانسی که سیگنال می‌تواند داشته باشد برابر $f_s/2$ خواهد بود. این فرکانس را می‌توان در بالاترین سطح فرکانسی ضرایب موجک یعنی d_1 مشاهده نمود. بنابراین باند فرکانسی $f_s/2$ تا $f_s/4$ در سطح d_1 خواهد بود. به طور مشابه باند فرکانسی $f_s/4$ تا $f_s/8$ در سطح d_2 می‌باشد. آخرین سطح فرکانسی که شامل سطوح فرکانس پایین می‌باشد در سطح $???$ نشان داده می‌شود. در این مقاله فرکانس نمونه‌برداری 5 KHz انتخاب شده که سطوح فرکانسی مختلف برای نرخ نمونه‌برداری فوق در جدول 1 آمده است.

3- الگوریتم پیشنهادی

3-1 تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی

روش پیشنهادی تشخیص جریان هجومی از شرایط خطای داخلی بر

1. Windowed Fourier Transform
2. Localized Transient
3. Low Pass Filter
4. High Pass Filter



شکل 1: روند انجام تبدیل موجک.

روش‌های پردازش سیگنال مبتنی بر تبدیل موجک، ابزار قدرتمندی برای بررسی سیگنال‌های ناشی از حالات گذرا در سیستم قدرت می‌باشند. از جمله کاربردهای تبدیل موجک در سیستم‌های قدرت بررسی گذراها [9]، کیفیت توان [10]، فشرده‌سازی اطلاعات [11] و تشخیص خطا [12] می‌باشد.

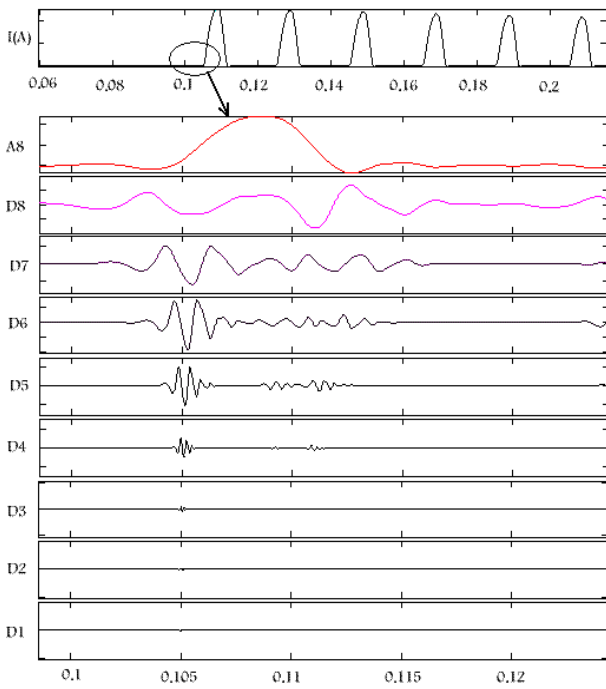
از تبدیل موجک به روش‌های مختلفی برای تحلیل سیگنال استفاده می‌گردد. در برخی روش‌ها جهت تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی از روش انرژی موجک استفاده می‌گردد [13].

در برخی دیگر از روش‌ها از تحلیل موجک استفاده می‌گردد [14]. به عنوان نمونه در [14] با استفاده از تبدیل موجک روشی بر مبنای مقایسه دو پیک متوالی ضرایب موجک ارائه گردیده است. در این روش اگر پیک اول از پیک دوم بیشتر باشد بروز خطا و در غیر این صورت بروز جریان هجومی تشخیص داده می‌شود. روش ارائه‌شده در این مرجع در برخی حالات جریان هجومی، با توجه به شار پسماند و میزان شیب ناحیه‌های از جریان هجومی، که به عنوان ناحیه با شیب کم شناخته می‌شود در سطوح فرکانسی بالا عملکرد غیر صحیح دارد.

روش پیشنهادی اول بر مبنای رفتارهای متفاوت شکل موج‌های جریان هجومی و خطا در لحظات اولیه پس از وقوع اختلال ارایه شده است. در این روش ابتدا با استفاده از تبدیل موجک سیگنال جریان تقاضی به ضرایب موجک که هر کدام بیانگر باند فرکانسی خاصی می‌باشند تجزیه می‌شود. سپس بر اساس ویژگی‌هایی که در ضرایب تجزیه‌شده وجود دارد تابع معیاری تعریف می‌گردد که قادر است در کمتر از ربع سیکل و در تمام سطوح فرکانسی با دقت بالا جریان هجومی را از خطای داخلی تشخیص دهد. در ادامه مقاله با استفاده از دامنه ضرایب خاصی از اجزای تبدیل موجک در فرکانس‌های بالا، اندیسی تعریف می‌گردد که از آن برای پایداری رله دیفرانسیل در برابر اشباع CTها هنگام خطای خارجی استفاده می‌گردد. در روش فوق جریان مهار در رله دیفرانسیل به گونه‌ای بهبود می‌یابد که هنگام اشباع ترانسفورماتورهای جریان نقطه کار وارد ناحیه عملکرد رله نمی‌گردد و رله پایدار می‌ماند. صحت الگوریتم‌های ارائه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی خطاهای مختلف و شرایط سوئیچینگ متفاوت نشان داده شده است. بدین منظور یک شبکه قدرت شامل ترانسفورماتور قدرت، خط انتقال، بار و مدل ترانسفورماتور جریان در نرم‌افزار ATP/EMTP مدل‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده دقت و سرعت الگوریتم‌های ارائه‌شده می‌باشند.

2- تبدیل موجک

گذراهای سریع در سیستم قدرت، به صورت سیگنال‌های غیر پریودیک با نوسانات شدید و پالس‌های ناگهانی محلی در سیگنال قدرت و هارمونیک‌های آن ظاهر می‌شوند. این خصوصیات برای تبدیل فوریه ایجاد مشکل می‌کند، زیرا تبدیل فوریه بر اساس سیگنال‌های پریودیک کار می‌کند. از آنجا که سیستم قدرت با گذراها و سیگنال‌های غیرپریودیک مواجه است، بنابراین تبدیل فوریه روش کاملاً مناسبی برای پردازش این



شکل 4: جریان تفاضلی ناشی از وقوع جریان هجومی و سطوح فرکانسی مختلف حاصل از تبدیل موجک.

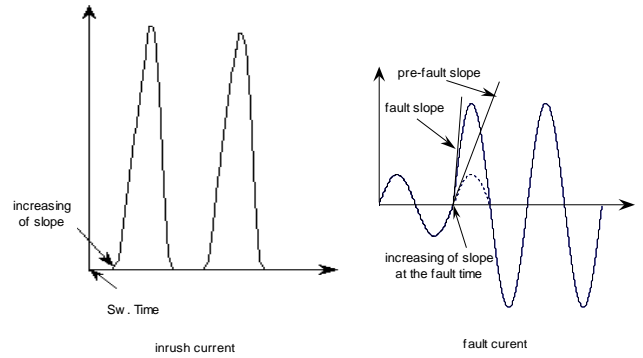
جدول 1: سطوح فرکانسی تبدیل WAVELET با فرکانس نمونه برداری 5 KHZ

Wavelet	باند فرکانسی	سطوح تبدیل
D1	1250-2500	
D2	625-1250	
D3	312,5-625	
D4	156,25-312,5	
D5	78,125-156,25	
D6	39,06-78,125	
D7	19,53-39,60	
A7	0-19,53	

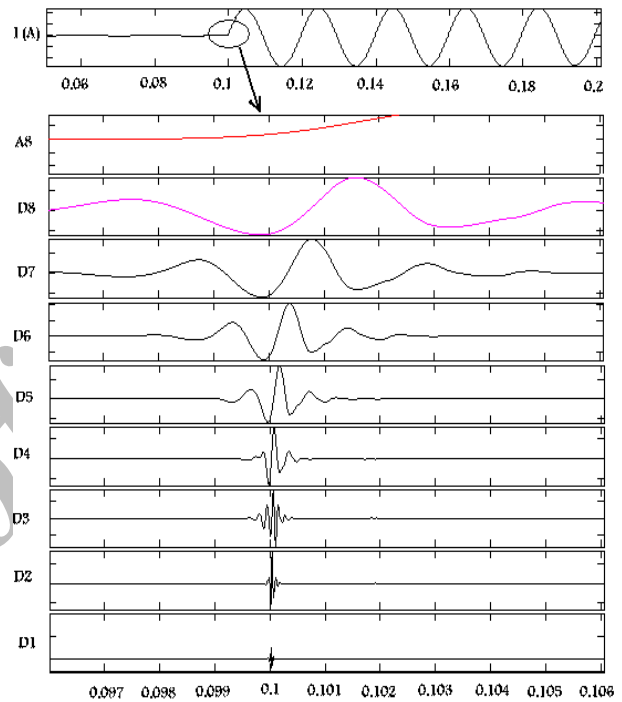
3) وجود شیب بیشتر در حوزه زمان نشان دهنده وجود فرکانس‌های بیشتر می‌باشد.

با توجه به اصول فوق انتظار می‌رود که هنگام وقوع خطای داخلی، دامنه اجزای فرکانس بالا در لحظات اولیه وقوع خطا، بیشتر از زمان‌های دیگر باشد. این روند در شکل 3 که جریان تفاضلی ناشی از خطای داخلی A-G در لحظه $t = 0,1$ ثانیه و سطوح فرکانسی مختلف حاصل از تبدیل Wavelet را نشان می‌دهد، قابل مشاهده است. در هنگام جریان هجومی نیز انتظار می‌رود دامنه اجزای فرکانس بالا در لحظات اولیه، کمتر از زمان‌های دیگر باشد. این روند نیز در شکل 4 نشان داده شده است.

ویژگی‌های ذکر شده در بالا به‌وضوح در سطوح فرکانسی D5 و D6 قابل مشاهده است. حال به‌منظور ارائه یک تابع معیار برای تشخیص جریان هجومی از شرایط خطای داخلی فاصله زمانی بین لحظه شروع اغتشاش تا بزرگ‌ترین پیک جریان تفاضلی در D5 یا D6 را در نظر می‌گیریم. اگر زمان محاسبه‌شده از مقدار تنظیم¹ از پیش تعیین شده کمتر باشد، خطا رخ داده است و اگر از مقدار تنظیم بیشتر باشد جریان هجومی خواهد بود. شکل 5، شکل موج جریان تفاضلی ناشی از جریان خطا و جریان هجومی را در سطح فرکانسی D5 نشان می‌دهد.



شکل 2: مقایسه شیب‌های جریان‌های هجومی و خطا.



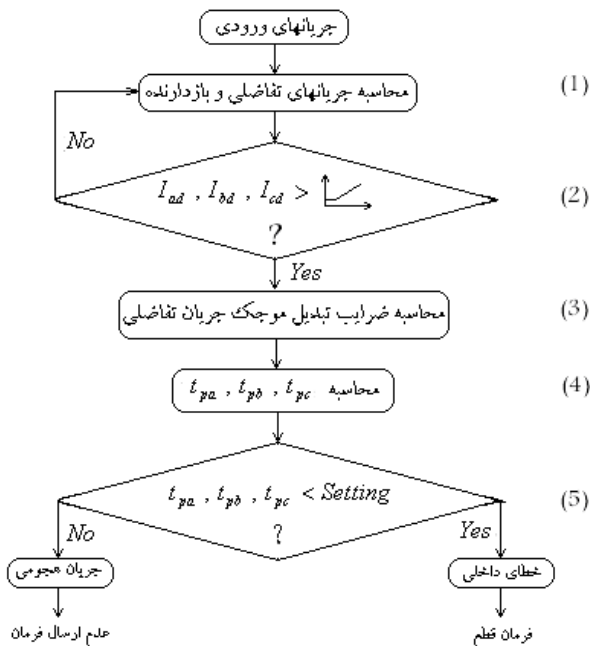
شکل 3: جریان تفاضلی ناشی از وقوع خطای داخلی A-G و سطوح فرکانسی مختلف حاصل از تبدیل موجک.

اساس رفتار متفاوت این دو شکل موج در لحظات اولیه پس از وقوع اختلال می‌باشد. با توجه به شکل موج جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی، این جریان با شیب بسیار کم شروع به افزایش می‌کند و با گذشت زمان بر شیب آن افزوده می‌شود. ولی در هنگام خطا، جریان با شیب زیادتری نسبت به حالت جریان هجومی شروع به افزایش می‌کند و با گذشت زمان از شیب آن کاسته می‌شود. شکل 2 این موضوع را نشان می‌دهد [16].

با توجه به این که این ویژگی‌ها از ماهیت متفاوت دو نوع جریان ناشی می‌شوند و با تغییر پارامترهای ترانسفورماتور و سیستم قدرتی که ترانسفورماتور در آن قرار دارد خیلی متأثر نمی‌شود، می‌توان از آنها به‌عنوان اساس الگوریتم تشخیص خطا از شرایط جریان هجومی استفاده نمود. الگوریتم پیشنهادی بر اصول زیر استوار است:

1) جریان تفاضلی ناشی از خطا با شیب بیشتر آغاز می‌شود و سپس از شیب آن کاسته می‌شود. ولی جریان تفاضلی ناشی از جریان هجومی با شیب کمی شروع می‌شود و سپس بر شیب آن افزوده می‌شود.

2) مکان تغییر شیب و در نتیجه دامنه فرکانس‌های بالاتر در جریان تفاضلی ناشی از جریان هجومی با تأخیر بیشتری نسبت به جریان تفاضلی ناشی از جریان خطا ایجاد می‌گردد.



شکل 6: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی.

جهت تعریف اندیس موجک¹ (WI) استفاده می‌شود. در بخش 3-1 بر اساس اصول ارائه شده مربوط به شکل موج جریان‌های هجومی و خطا دیده شد که سطوح فرکانسی بالا، از لحظه اغتشاش به بعد دارای رفتارهای متفاوتی می‌باشند. در جریان هجومی در لحظات اولیه شروع اغتشاش پیک‌های سطوح فرکانسی فوق‌روندی افزایشی دارند، در حالی که در جریان خطا این روند کاهشی بوده و خیلی سریع به سمت صفر میل می‌کنند. در حالت بروز خطای خارجی و اشباع ترانسفورماتورهای جریان نیز نوسانات فوق‌روندی افزایشی دارند. بنابراین از نوسانات موجک فوق‌به‌منظور تعیین اندیسی جهت اضافه‌نمودن به جریان مهار استفاده می‌گردد. با توجه به این که نوسانات موجک (D1) به‌صورت لحظه‌ای تغییر می‌نمایند به‌طور مستقیم نمی‌توان از آنها استفاده نمود. بدین منظور پنجره‌ای متحرک به طول 1 سیکل برای محاسبه مقدار ماکزیمم موجک، به‌کار برده می‌شود. مقدار محاسبه‌شده به روش فوق را WI می‌نامیم که به‌صورت (1) تعریف می‌گردد

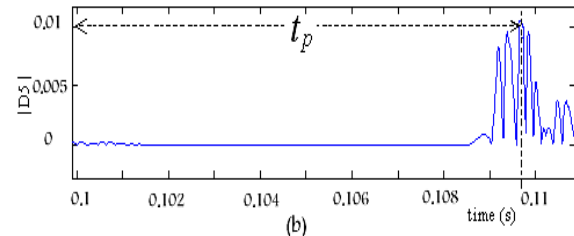
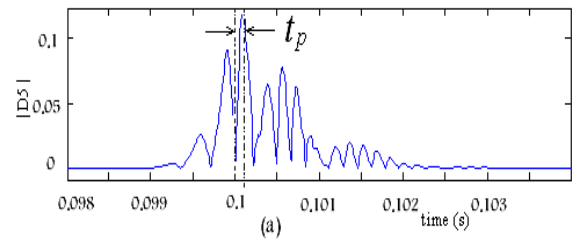
$$WI = K \cdot \text{Max}(D1(n - N : n)) \quad (1)$$

در رابطه فوق مقدار K ضریب تقویت و N تعداد نمونه‌ها در یک سیکل می‌باشند.

شکل 7 سطح فرکانسی (D1) و اندیس WI مربوط به حالت برقراری جریان هجومی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل دیده می‌شود در حالت برقراری جریان هجومی مقدار ماکزیمم محاسبه‌شده یا اندیس WI از لحظه بروز اختلال، به‌صورت پیوسته زیاد شده و در صورت اضافه‌شدن به جریان مهار باعث افزایش پایداری رله در برابر این پدیده خواهد شد.

شکل 8 سطح فرکانسی D1 و خروجی WI مربوط به خطای خارجی و اشباع ترانسفورماتورهای جریان را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد تا حدود 0/5 سیکل پس از شروع اختلال، CTها اشباع نشده‌اند و مقدار پیک محاسبه‌شده (WI) برابر صفر می‌باشد. به محض شروع اشباع CT مقدار اندیس WI به سرعت افزایش



شکل 5: اندازه جریان هجومی (a) و جریان ناشی از خطای داخلی (b) در سطح D5.

مقایسه زمان t_p با $Setting$ برای هر فاز بررسی می‌گردد، در صورتی که حتی فقط در یکی از فازها رابطه $t_p < Setting$ برقرار باشد، خطا به وقوع پیوسته است و فرمان قطع صادر می‌شود. مطابق شکل 5 و با کمک رابطه فوق می‌توان روند تشخیص را در مدت زمان نزدیک به ربع سیکل انجام داد که سرعت بسیار زیادی است. در واقع با توجه به نتایج به‌دست آمده که در بخش 4 ارائه شده است با فرض $Setting = 2 \sim 3 \text{ ms}$ تفکیک جریان‌های هجومی و خطا به‌راحتی امکان‌پذیر می‌گردد.

در شکل 6 فلوچارت الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. ابتدا در بلوک 1 جریان‌های تفاضلی و بازدارنده محاسبه می‌شوند. اگر خروجی بلوک 2 Yes باشد، خطای داخلی یا جریان هجومی وجود دارند و بایستی از هم تشخیص داده شوند. در بلوک 3 ضرایب تبدیل موجک جریان تفاضلی و در بلوک 4 مقادیر t_p برای هر سه فاز محاسبه می‌گردند که در آن t_{pa} یعنی زمان مربوط به فاز a و الی آخر. سرانجام تصمیم‌گیری در بلوک 5 انجام می‌گیرد.

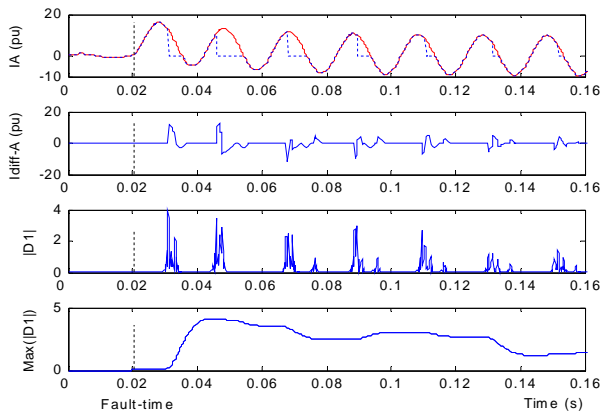
2-3 بهبود جریان مهار در رله دیفرانسیل جهت افزایش

پایداری در برابر اشباع CT و جریان هجومی

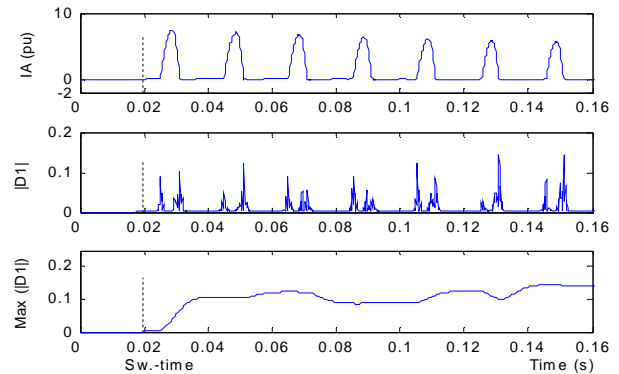
منطق عملکردی رله جهت پایداری آن حین اشباع در اثر خطای خارجی (خطای عبوری) و پدیده جریان هجومی می‌تواند شامل قفل کردن رله برای مدت زمان معین [15] و یا تغییر مشخصه عملکردی رله باشد [16]. این منطق‌ها تا حدودی می‌توانند مشکل عدم پایداری رله حین بروز پدیده‌های فوق را برآورده سازند. اما در مواردی که اشباع شدید هسته CT حادث می‌شود، رله پایداری خود را از دست داده و فرمان قطع نابجا صادر می‌کند. بدین منظور در این بخش، یک واحد پایدارساز بر مبنای تبدیل Wavelet، به‌منظور تضمین عملکرد ایمن و مطمئن رله دیفرانسیل ارائه می‌گردد.

روش پیشنهادی بر مبنای فرکانس‌های بالای موجود در جریان‌های هجومی و اشباع ترانسفورماتورهای جریان استوار می‌باشد. با توجه به بالا بودن فرکانس‌های مورد استفاده، استخراج اطلاعات یک باند فرکانسی خاص از آنها از طریق تبدیل فوریه به‌راحتی امکان‌پذیر نبوده، در صورتی که با استفاده از تبدیل Wavelet در هر لحظه از زمان استخراج اطلاعات فوق در هر باند فرکانسی خاص امکان‌پذیر می‌باشد.

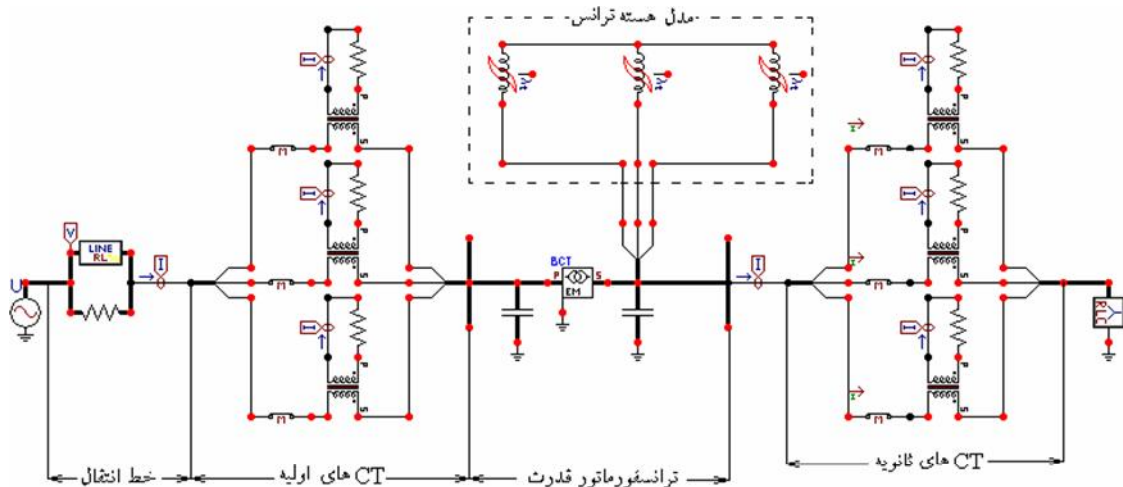
با توجه به سطوح فرکانسی جدول 1، فرکانس‌های بین 1/25 کیلوهرتز تا 2/5 کیلوهرتز در سطح D1 موجود بوده و بنابراین از باند فرکانسی فوق



شکل 8: جریان خطای خارجی، جریان تفاضلی سطح فرکانسی $D1$ و مقدار ماکزیمم $D1$ (اندیس WI) هنگام اشباع CT.



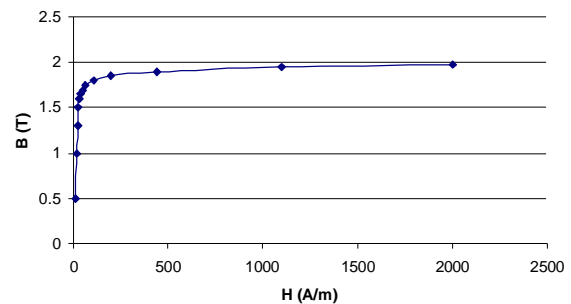
شکل 7: جریان هجومی، سطح فرکانسی $D1$ و مقدار ماکزیمم $D1$ (اندیس WI).



شکل 9: دیاگرام شبکه قدرت مورد مطالعه.

سطح ولتاژ 400/230 kV و مدل متقارن خط انتقال می‌باشد. با توجه به این که تولید سیگنال‌های جریان در شرایط مختلف از جمله کلیدزنی، خطا و ... به هسته ترانسفورماتور قدرت بستگی زیادی دارد، جهت تولید سیگنال‌های نزدیک به واقعیت، در اختیارداشتن مدل دقیق هسته ترانس از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. هسته‌های ترانسفورماتورها دارای انواع مختلفی می‌باشند که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به هسته نوع HIB و M5 اشاره نمود [17]. به دلیل اقتصادی‌تر بودن هسته نوع M5 در کشور ایران بیشتر از این نوع هسته استفاده می‌گردد. منحنی مشخصه هسته ترانسفورماتور قدرت نوع M5 که در این مقاله از آن استفاده گردیده است در شکل 10 نشان داده شده است.

حالت‌های مختلفی از جریان‌های خطا و جریان‌های هجومی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی حالات مختلف جریان هجومی با تغییر پارامترهای اصلی و مؤثر روی مشخصه‌های این جریان یعنی چگالی شار پس‌ماند در هسته ترانسفورماتور (B_r)، زاویه ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور (θ_a) و کلیدزنی در شرایط باردار بودن یا بی‌باری ترانسفورماتور انجام گردیده است. حالت‌های مختلفی از جریان خطا نیز با در نظر گرفتن عوامل اصلی و مؤثر روی مشخصه‌های این جریان، یعنی نوع خطا و نوع بار ترانسفورماتور شبیه‌سازی شده است. نتایج الگوریتم پیشنهادی جهت تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی به صورت خلاصه در جدول 2 آمده است. جدول فوق مقادیر محاسبه شده t_p در فازهای مختلف را در شرایط برقراری جریان هجومی مختلف نشان می‌دهد. ستون اول جدول فوق زاویه ولتاژ فاز a اعمالی به ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.



شکل 10: مشخصه هسته ترانس قدرت نوع M5.

می‌یابد. بدیهی است با اضافه نمودن این مقدار به جریان مهار، پایداری رله در برابر اشباع ترانسفورماتورهای جریان در اثر خطای خارجی افزایش خواهد یافت.

4- نتایج شبیه‌سازی

به منظور به دست آوردن سیگنال‌های مختلف مورد نیاز، جهت بررسی صحت الگوریتم‌های پیشنهادی، قسمتی از یک شبکه قدرت، شامل یک ترانسفورماتور قدرت، ترانسفورماتورهای جریان، ترانسفورماتور زمین به همراه خط انتقال که در شکل 9 نشان داده شده است در نرم‌افزار بررسی حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی¹ (EMTP) مدل شده است. شبکه قدرت مدل شده شامل یک ترانسفورماتور قدرت 160 MVA با

1. Electro Magnetic Transient Program

جدول 2: مقادیر t_p برای حالت‌های مختلف جریان هجومی (MS).

θ_A	فاز	بارداری			
		بی‌باری		بارداری	
		$B_{rA}=0$	$B_{rA}=58\%$	$B_{rA}=0$	$B_{rA}=58\%$
0	a	5,3	6,1	5,2	4,8
	b	4,8	6	4,8	4,8
	c	4,8	5,2	4,8	6,1
80	a	4,7	6,8	4,8	3
	b	4,6	6,8	4,7	6,2
	c	6,1	6,8	5,3	3,8
120	a	4,8	5,2	4,8	4,8
	b	5,3	6,1	5,2	4,8
	c	4,8	6	4,8	4,8

جدول 3: مقادیر t_p برای حالت‌های مختلف خطای داخلی (MS).

θ_A	فاز	بی‌باری				بارداری			
		a-g	a-b	a-b-g	a-b-c	a-g	a-b	a-b-g	a-b-c
0	a	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	b	0,7	0,1	0,1	1,5	0,7	0,1	0,1	1,5
	c	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
80	a	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	b	4,8	0,1	0,1	0,1	5	0,1	0,1	0,1
	c	0,1	0,1	1,5	0,1	0,1	0,1	1,5	0,1
120	a	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	b	1,5	0,1	0,1	0,1	3,1	0,1	0,1	0,1
	c	0,1	0,1	0,1	1,5	0,1	0,1	0,1	1,5

جدول 4: مقادیر t_p در حالت بروز هم‌زمان خطای داخلی و جریان هجومی (MS).

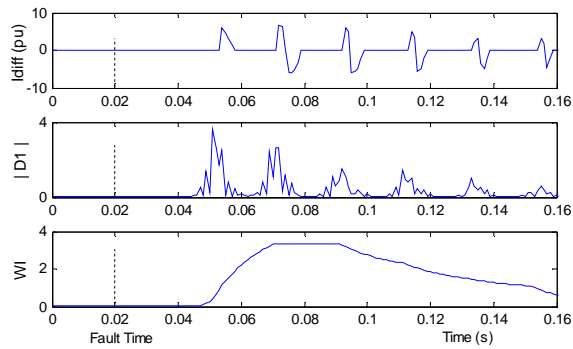
θ_A	B_r	فاز	بی‌باری				بارداری			
			a-g	a-b	a-b-g	a-b-c	a-g	a-b	a-b-g	a-b-c
80	$B_{rA}=0$	a	0,2	0,1	0,1	2,5	0,1	0,1	1,5	1,5
	$B_{rB}=0$	b	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
	$B_{rC}=0$	c	5,1	0,1	2,5	0,1	4,6	0,1	0,1	0,1
	$B_{rA}=58\%$	a	0,2	0,1	2,5	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1
	$B_{rB}=0$	b	0,2	0,1	0,1	0,2	3,5	0,2	1,5	0,1
	$B_{rC}=-58\%$	c	4,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

انجام گردیده است. همان‌طور که جداول 2 و 3 نشان می‌دهند زمان محاسبه شده t_p در حالت بروز خطا، حداقل در یکی از فازها کمتر از 1 میلی‌ثانیه بوده، در حالی که در شرایط بروز جریان هجومی این مقدار خیلی بیشتر و عموماً بالای 4 میلی‌ثانیه می‌باشد. بنابراین به راحتی این دو نوع جریان از هم تشخیص داده می‌شوند.

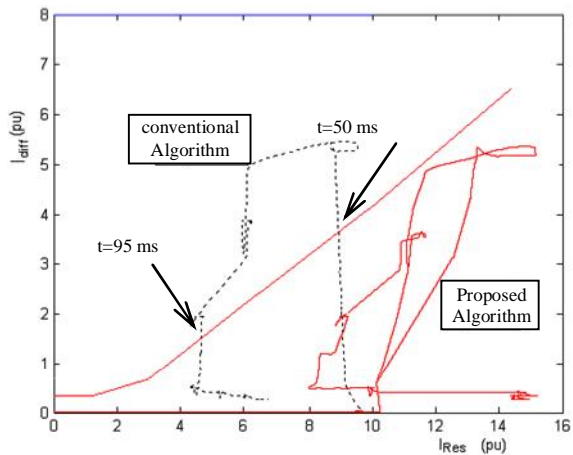
در شرایط برقراری هم‌زمان دو جریان فوق نیز حالت‌های مختلفی بررسی شده است. بدین منظور خطاهای مختلفی در ترانسفورماتور ایجاد شده سپس در شرایط چگالی شارهای پس‌ماند متفاوت کلیدزنی صورت گرفته است. خلاصه‌ای از نتایج فوق در جدول 4 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در این شرایط زمان محاسبه شده t_p کمتر از 1 میلی‌ثانیه بوده و در نتیجه به راحتی بروز خطا تشخیص داده می‌شود.

ستون دوم بیانگر این است که جریان تفاضلی ایجاد شده مربوط به کدام فاز است. ستون‌های سوم و چهارم نیز نشان‌دهنده باز یا بسته بودن ثانویه ترانسفورماتور در لحظه برقراری جریان هجومی می‌باشند. در هر یک از دو حالت باز یا بسته بودن ثانویه ترانسفورماتور تأثیر چگالی شار پس‌ماند در سه شاخه هسته ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفته شده است.

در هر یک از دو حالت باز یا بسته بودن ثانویه ترانسفورماتور تأثیر چگالی شار پس‌ماند در سه شاخه هسته ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج الگوریتم پیشنهادی فوق برای حالت‌های مختلف خطای داخلی نیز در جدول 3 خلاصه شده است. در این جدول شبیه‌سازی‌ها برای حالت‌های مختلف خطا در شرایط بی‌باری و بارداری ترانسفورماتور



شکل 12: جریان تفاضلی، سطح فرکانسی $D1$ و اندیس WI هنگام اشباع CT در شرایط خطای سه فاز خارجی.



شکل 13: مکان نقطه کار قبل و بعد از پایدارسازی رله دیفرانسیل.

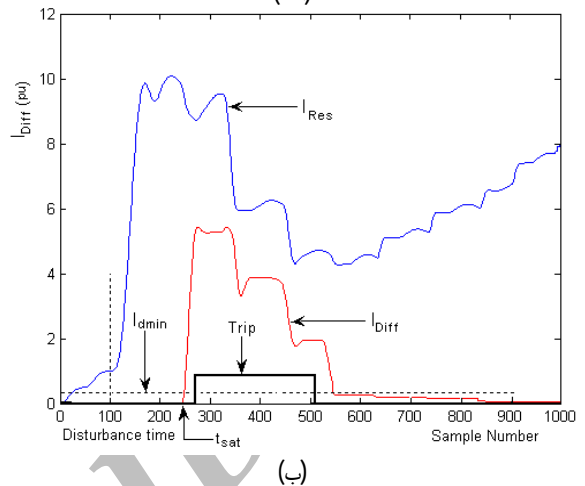
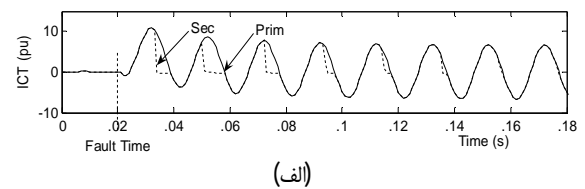
برای بررسی عملکرد رله پیشنهادی در برابر جریان هجومی حالت‌های مختلفی از این جریان شبیه‌سازی شده است. شکل 14 یک نمونه از جریان هجومی که در لحظه صفر ولتاژ (40 میلی‌ثانیه) رخ داده است نشان می‌دهد. در شکل 15 نیز مشخصه عملکرد رله نشان داده شده است. در شکل فوق، مکان نقطه کار بدون پایدارسازی و با وجود پایدارسازی مقایسه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با وجود پایدارسازی نقطه کار حدود 5 میلی‌ثانیه دیرتر نسبت به حالتی که از پایدارسازی استفاده نشده وارد ناحیه عملکرد رله می‌شود. بنابراین با به‌وجود آمدن تأخیر زمانی فوق در وارد شدن نقطه کار به ناحیه عملکرد رله، فرصت کافی برای تشخیص این جریان و پیش‌بینی عکس‌العمل مناسب در برابر این پدیده به‌وجود می‌آید.

در جدول 6 چند نمونه از حالت‌های مختلف کلیدزنی آورده شده که در آن پایداری رله با وجود پایدارکننده و بدون آن مقایسه گردیده است. با وجود پایدارکننده نقطه کار با تأخیر زمانی نسبتاً بالایی وارد ناحیه عملکرد رله می‌گردد.

5- نتیجه‌گیری

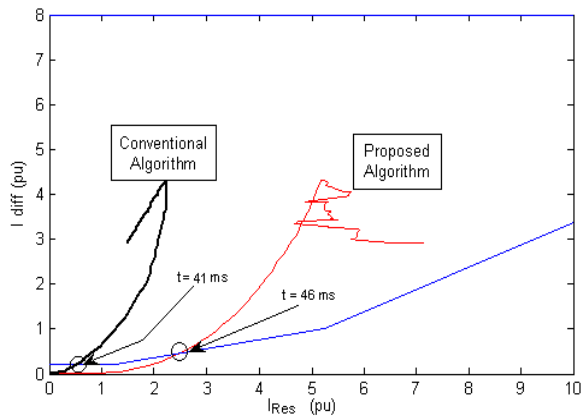
در این مقاله الگوریتمی جدید برای حفظ دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت ارائه گردید. روش ارائه‌شده بر مبنای رفتار متفاوت جریان‌های تفاضلی استوار می‌باشد. با استفاده از تبدیل موجک تابع معیاری بر اساس فواصل زمانی متفاوت ناشی از جریان‌های خطا و هجومی در هر باند فرکانسی خاص ارائه گردید. روش فوق قادر است با دقت بالایی و در مدت زمان کمتر از ربع سیکل خطای خارجی را از جریان هجومی تشخیص دهد. به‌علاوه با تعریف اندیسی که با استفاده از فرکانس‌های بالای موجود در جریان‌های اشباع‌شده در اثر خطای خارجی و جریان‌های



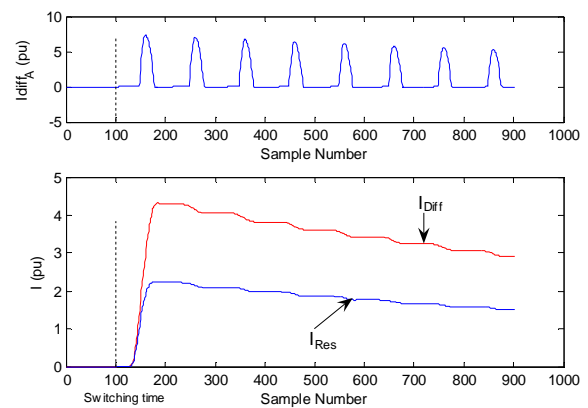
شکل 11: (الف) جریان خطای خارجی هنگام اشباع CT و (ب) جریان‌های مهاری، عملگر و خروجی رله بدون پایدارکننده.

جهت بررسی تأثیر اشباع ترانسفورماتورهای جریان بر روی عملکرد رله دیفرانسیل، شبیه‌سازی‌های مختلفی صورت گرفته که در ادامه بررسی می‌گردد. ماکزیمم جریان خطای خارجی هنگامی رخ می‌دهد که دقیقاً خارج از محدوده حفاظتی و در ترمینال CTها خطای سه‌فاز به زمین با مقاومت اتصال کوتاه صفر رخ دهد. شکل 11 جریان اشباع‌شده خروجی CT و جریان‌های عملگر (تفاضلی) و مهاری بدون پایدارسازی، در هنگام وقوع خطای خارجی را در این شرایط نشان می‌دهد.

شکل 12 اندیس موجک (WI) که در هنگام اشباع ترانسفورماتورهای جریان ایجاد گردیده را نشان می‌دهد. در این شکل خطا در لحظه 0.02 ثانیه (نمونه شماره 100) رخ داده و ترانسفورماتور جریان پس از حدود 30 میلی‌ثانیه اشباع گردیده است. تا قبل از اشباع CT اندیس WI صفر بوده، به محض شروع اشباع اندیس فوق شروع به افزایش نموده و با گذشت زمان و کاهش اثر اشباع CT از مقدار آن کاسته می‌شود. همان‌طور که شکل 13 نشان می‌دهد، جریان دیفرانسیل غیر واقعی ایجادشده در اثر اشباع به حدی است که نقطه کار حدود 30 میلی‌ثانیه بعد از وقوع خطا وارد ناحیه عملکرد رله شده و به مدت 45 میلی‌ثانیه در این ناحیه باقی می‌ماند (منحنی نقطه‌چین). با توجه به این حالت اگر رله دیفرانسیل پایدار نشده باشد، مطابق شکل 11 رله تریپ نایجا خواهد داد. در شکل 13 مکان نقطه کار بعد از پایدارسازی رله دیفرانسیل با خط توپر نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش اندیس WI به جریان مهاری نقطه کار وارد ناحیه عملکرد رله نشده و مانع از عملکرد نایجای آن می‌شود. الگوریتم پیشنهادشده در حالت‌های مختلفی از بروز خطای خارجی که باعث اشباع ترانسفورماتورهای جریان گردیده‌اند بررسی شده است. جدول 5 خلاصه‌ای از نتایج فوق را نشان می‌دهد. در جدول فوق ستون‌های اول و دوم لحظات بروز خطا و شروع اشباع CT را نشان می‌دهند. ستون سوم زمان برقراری اثر اشباع و اندیس WI را برای هر حالت نشان می‌دهد و ستون چهارم بیانگر ماکزیمم مقدار افزوده‌شده به جریان مهاری می‌باشد. همان‌طور که در ستون‌های پنجم و ششم ملاحظه می‌گردد با وجود پایدارسازی، رله دیفرانسیل در تمامی حالات پایدار بوده در حالی که بدون پایدارسازی در اکثر حالات عملکرد نایجا داشته است.



شکل 15: مشخصه و مکان نقطه کار قبل و بعد از پایداری رله.



شکل 14: جریان تفاضلی فاز A و مؤلفه‌های اصلی جریان‌های تفاضلی و مهار.

جدول 5: وضعیت‌های مختلف خطا و عملکرد رله هنگام بروز خطای خارجی.

لحظه بروز خطا (ms)	لحظه شروع اشباع (ms)	انتهای زمان اشباع و بی‌اثر شدن اندیس WI (ms)	ماکزیمم مقدار افزوده‌شده به جریان مهار (pu)	عملکرد رله با پایداری	زمان عملکرد رله بدون پایداری (ms)
40	71,4	145,24	3,8	پایدار	پایدار
42	64,22	184,26	4,12	پایدار	69,8
45	56,32	231,52	4,52	پایدار	61,2
48	74,36	194,26	4,4	پایدار	78,42
50	83,28	142,32	4,6	پایدار	88,2

جدول 6: وضعیت‌های چند نمونه از جریان هجومی در لحظات کلیدزنی مختلف.

لحظه کلیدزنی (ms)	لحظه ورود نقطه کار به ناحیه عملکرد رله بدون پایداری (ms)	لحظه ورود نقطه کار به ناحیه عملکرد رله با پایداری (ms)	ماکزیمم مقدار افزوده‌شده به جریان مهار (pu)
40	41	46	4,7
42	43	47	3,9
45	46	51	6
47	48	52	3,8
50	51	56	4,2

- [7] A. Giuliante and G. Clough, "Advances in the design of differential protection for power transformers," in *Proc. Georgia Technical Protective Relaying Conf.*, pp. 1-12, Atlanta, Georgia, May 1991.
- [8] P. Bastard, M. Meunier, and H. Regal, "Neural network based algorithm for power transformer differential relays," *IEEE Processings Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 142, no. 4, pp. 386-392, Jul. 1995.
- [9] M. V. Ribeiro, J. M. T. Romano, and C. A. Duque, "An improved method for signal processing and compression in power quality evaluation," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 464-471, Apr. 2004.
- [10] T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo, and D. Sutanto, "High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 397-407, Jan. 2005.
- [11] H. Mortazavi and H. Khorashadi-Zadeh, "A new inrush restraint algorithm for transformer differential relay using wavelet transform," in *Int. Conf. on Power System Technology, Powercon'04*, vol. 2, pp. 1705-1709, Singapore, Nov. 2004.
- [12] S. A. Saleh and M. A. Rahman, "Modeling and protection of a three-phase power transformer using wavelet packet transform," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1273-1282, Apr. 2005.
- [13] O. 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.
- [14] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, and H. J. Altuve, "A current based solution for transformer differential protection - part I: problem statement," *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 16, no. 4, pp. 485-491, Oct. 2001.
- [15] G. Ziegler, *Numerical Differential Protection: Principles, and Applications*, Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2005.

هجومی ارائه گردید، با بهبود جریان مهار، پایداری رله در برابر این شرایط، تا حد قابل قبولی افزایش یافت. توانایی الگوریتم ارائه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی‌های مختلفی که بر روی یک شبکه قدرت نوعی صورت گرفته نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر سرعت و دقت الگوریتم ارائه شده می‌باشند.

مراجع

- [1] م. خدرزاده، ا. صفرنورالله، م. مرتجایی و م. ا. همدانی گلشن، *حفاظت سیستم‌های قدرت*، چاپ اول، دانشگاه صنعت آب و برق، 1382.
- [2] T. S. Sidhu, M. S. Sachdev, H. C. Wood, and M. Nagpal, "Design, implementation, and testing of a micro-processor-based high-speed relay for detecting transformer winding faults," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, no. 1, pp. 108-117, Jan. 1992.
- [3] P. Liu, O. P. Malik, C. 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.
- [4] K. Yabe, "Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp. 1109-1117, Jul. 1997.
- [5] T. S. Sidhu and M. S. Sachdev, "Online identification of magnetizing inrush and internal faults in three phase transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 1885-1890, Oct. 1992.
- [6] G. D. Rockefeller, "Fault protection with a digital computer," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 88, no. 4, pp. 438-464, Apr. 1969.

مجید صنایع پسند مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران و مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق را از دانشگاه کلگری کانادا به پایان رسانده است و هم اکنون استاد انستیتو مهندسی برق و کامپیوتر پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران می باشد. زمینه های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند اتوماسیون سیستم های قدرت، حفاظت و کنترل سیستم های قدرت، رله های دیجیتال، مهندسی فشار قوی می باشد.

Application Manual of RET 521*2.3, Trans-former Protection Relay, [16]
ABB Company, 1MRK 504 021-UEN.

S. D. Cho, *Parameter Estimation for Transformer Modeling*, Ph.D. [17]
Dissertation, Michigan Technological University, Dec. 2002.

ابوذر رحمتی در سال 1384 مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعت آب و برق و در سال 1386 مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. از سال 1384 الی 1387 نامبرده به عنوان کارشناس سیستم های فشار ضعیف در مرکز تحقیقات مخابرات و الکترونیک ایران، شرکت پارس ژنراتور و شرکت مشاوره مهندسی برق مشانیر در تهران به کار مشغول بود. مهندس رحمتی از سال 1387 در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه ایلام مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می باشد. زمینه های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند حفاظت سیستم های قدرت، رله های دیجیتال، حالت های گذرا و کنترل سیستم های قدرت می باشد.

Archive of SID