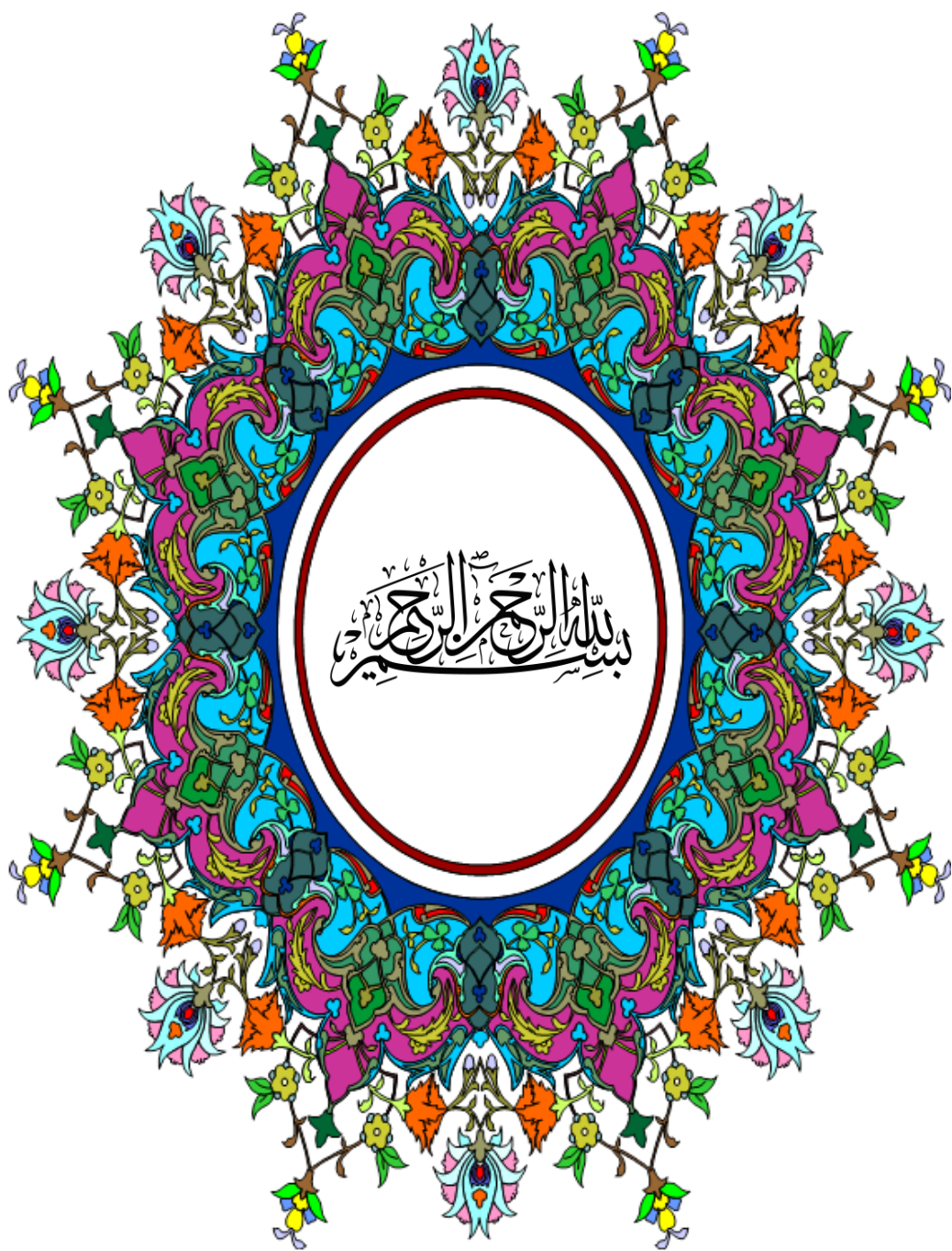






دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق رشته مهندسی سیستم‌های قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی در ترانسفورماتورهای قدرت با

کمک الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته

نگارنده

سیدمسعود لعل موسوی

اساتید راهنما

دکتر محسن اصیلی

دکتر یاسر دامچی

شهریور ۱۴۰۰

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یاری دلسوز و خداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

با شکر و سپاس از خداوند متعال برای اعطای سعادت کسب فیض علم

در کمال افتخار و امتنان بر خود لازم می‌نمزم از زحمات استاید فرزانه و فرهیخته جناب آقای دکتر محسن اصیلی و جناب آقای دکتر یاسر داغچی، به دلیل یاری‌ها و راهنمایی‌های

بی‌چشم داشت ایشان که بسیاری از سختی‌ها و مدت انجام پایان‌نامه را برایم آسان نمود سپاس‌گزاری نمایم.

از استادان محترم جناب آقای دکتر احمد دارابی و جناب آقای دکتر سید ششم سید بزرگ‌کر که داوری پایان‌نامه اینجانب را قبول زحمت فرمودند و همچنین جناب آقای دکتر

مجتبی شویابی به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در پایان از زحمات خانواده عزیزم که در این مدت یاری‌گرم و مشوق اینجانب بوده‌اند، سپاس‌گزار هستم.

تعهد نامه

اینجانب سیدمسعود لعل موسوی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی در ترانسفورماتورهای قدرت با کمک الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته تحت راهنمایی دکتر محسن اصیلی و دکتر یاسر دامچی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 آن ها) 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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها 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.

چکیده

حفاظت دیفرانسیل یکی از پرکاربردترین حفاظت‌های ترانسفورماتورهای قدرت است. یکی از چالش‌های مرتبط با این حفاظت، تشخیص جریان‌های هجومی، اضافه تحریک و خطای خارجی از سایر اغتشاشات داخلی می‌باشد. تاکنون، روش‌های مختلفی به منظور جلوگیری از عملکرد نابجای حفاظت دیفرانسیل در شرایط ذکر شده ارائه شده است، که لزوماً به راحتی قابل اجرا نیستند یا نمی‌توانند عملکرد مناسب را در همه سناریوها تضمین کنند. در این پایان‌نامه، یک روش جدید مبتنی بر الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته برای تشخیص جریان‌های هجومی، اضافه تحریک و خطای خارجی از خطاهای داخلی و سیم‌پیچ پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی دارای دو بخش است. بخش اول خطاهای خارجی را از اغتشاشات داخلی تفکیک می‌کند و بخش دوم جریان‌های هجومی و اضافه تحریک را از خطاهای داخلی و سیم‌پیچ تشخیص می‌دهد. از جمله مزیت‌های این روش، به کارگیری موازی این دو بخش در منطق الگوریتم می‌باشد که منجر به کاهش زمان تشخیص می‌شود. همچنین مزایایی از قبیل؛ سرعت بالای تشخیص ($1/5$ میلی ثانیه)، پیاده‌سازی ساده و بار محاسباتی کم؛ پیاده‌سازی روش پیشنهادی را به صورت زمان واقعی امکان‌پذیر می‌کند. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، انواع اغتشاشات با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان و شرایط نویزی در نرم‌افزار EMTP شبیه‌سازی و در نرم‌افزار MATLAB تحلیل می‌شوند. نتایج به دست آمده حاکی از کارایی مطلوب روش پیشنهادی در تشخیص جریان هجومی، اضافه تحریک و خطای خارجی از خطاهای داخلی و سیم‌پیچ، حتی در شرایط نویزی و اشباع ترانسفورماتور جریان می‌باشد. همچنین، مطابق با نتایج به دست آمده، روش پیشنهادی سرعت و دقت بهتری را در مقایسه با روش بازدارنده هارمونیک که روشی متداول و پرکاربرد در صنعت می‌باشد، دارد.

کلمات کلیدی: حفاظت دیفرانسیل، الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته، جریان هجومی، اضافه تحریک، ترانسفورماتور قدرت.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

S.M. Lal Moosavi, Y. Damchi and M. Assili, "A New Fast Method for Improvement of Power Transformer Differential Protection Based on Discrete Energy Separation Algorithm" *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* (Revised)

فهرست مطالب

۱- فصل اول : پیشگفتار	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- بیان مسئله	۲
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق	۴
۴-۱- روش تحقیق	۵
۵-۱- ساختار پایان نامه	۵
۲- فصل دوم: حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت و مفاهیم مرتبط	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۱-۲- حفاظت دیفرانسیل	۸
۲-۲- یکسان سازی جریان های اندازه گیری شده	۱۲
۱-۲-۲- ضریب یکسان سازی اندازه جریان ها	۱۲
۲-۲-۲- جبران سازی گروه برداری	۱۲
۳-۲-۲- حذف جریان توالی صفر	۱۴
۴-۲-۲- نظارت بر موقعیت تپ چنجر	۱۴
۳-۲- انواع اغتشاشات مرتبط با حفاظت دیفرانسیل	۱۴
۳- فصل سوم: مروری بر مطالعات انجام شده	۲۱
۱-۳- مقدمه	۲۲
۲-۳- روش های مبتنی بر هارمونیک	۲۲
۳-۳- روش های هوشمند	۲۴
۴-۳- روش های مبتنی بر فرکانس-زمان	۲۷
۵-۳- روش های مبتنی بر مدل سازی و مقایسه	۳۰
۶-۳- روش های مبتنی بر اندازه گیری ولتاژ و شار	۳۳
۷-۳- سایر روش های ابتکاری	۳۶
۸-۳- جمع بندی مطالعات انجام شده	۳۸
۴- فصل چهارم: روش پیشنهادی برای تشخیص انواع اغتشاشات مبتنی بر الگوریتم جداسازی انرژی	
زمان-گسسته	۴۱
۱-۴- مقدمه	۴۲
۲-۴- الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته	۴۲
۳-۴- روش پیشنهادی برای بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت	۴۶
۴-۴- بررسی موردی روش پیشنهادی در تشخیص انواع اغتشاشات	۴۹

۵- فصل پنجم: شبیه‌سازی و نتایج.....	۶۱
۵-۱- مقدمه.....	۶۲
۵-۲- نتایج شبیه‌سازی.....	۶۲
۵-۲-۱- کارایی روش پیشنهادی بدون در نظر گرفتن نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان.....	۶۴
۵-۲-۲- کارایی روش پیشنهادی در حضور نویز و بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان.....	۶۵
۵-۲-۳- کارایی روش پیشنهادی با در نظر گرفتن نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان.....	۶۷
۵-۲-۴- مقایسه روش پیشنهادی با روش بازدارنده هارمونیکي.....	۶۹
۶- فصل ششم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۶۷
۶-۱- جمع‌بندی.....	۶۸
۶-۲- نتیجه‌گیری.....	۶۸
۶-۳- پیشنهادات.....	۷۰
۷- ضمیمه:.....	۷۱
۸- مراجع.....	۷۳

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) ساختار و اتصالات حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ۸
- شکل (۲-۲) جریان دیفرانسیل برای کارکرد عادی ترانسفورماتور قدرت ۹
- شکل (۳-۲) جریان دیفرانسیل برای خطای خارجی ترانسفورماتور قدرت ۱۰
- شکل (۴-۲) جریان دیفرانسیل برای خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت ۱۰
- شکل (۵-۲) منحنی مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل درصدی ۱۱
- شکل (۶-۲) اتصال Yd05 ترانسفورماتور قدرت و اختلاف فاز ایجاد شده بین جریان‌ها [۴۹] ۱۳
- شکل (۷-۲) جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت ۱۶
- شکل (۸-۲) جریان دیفرانسیل در شرایط اضافه تحریک ۱۷
- شکل (۱-۳) دسته‌بندی روش‌های تشخیص اغتشاشات مرتبط با حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت. ۲۲
- شکل (۲-۳) مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی مرجع [۴] ۲۳
- شکل (۱-۴) تعداد نمونه‌های مورد نیاز در محاسبه هر بخش ۴۶
- شکل (۲-۴) روندنما روش پیشنهادی برای بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ۴۷
- شکل (۳-۴) منحنی مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل ۴۸
- شکل (۴-۴) عملکرد روش پیشنهادی در حالت نرمال ؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۰
- شکل (۵-۴) عملکرد روش پیشنهادی در حالت خطای خارجی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۱
- شکل (۶-۴) عملکرد روش پیشنهادی در خطای داخلی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۲
- شکل (۷-۴) عملکرد روش پیشنهادی در خطای حلقه به زمین؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۳
- شکل (۸-۴) عملکرد روش پیشنهادی در خطای حلقه به حلقه؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۴
- شکل (۹-۴) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۵
- شکل (۱۰-۴) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی به همراه خطای داخلی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۶
- شکل (۱۱-۴) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی همراه با خطای حلقه به زمین؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۷
- شکل (۱۲-۴) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی همراه با خطای حلقه به حلقه؛ (الف) جریان

- دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۸
- شکل (۴-۱۳) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی بازیابی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای ۵۸
- شکل (۴-۱۴) عملکرد روش پیشنهادی در اضافه تحریک؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع ۵۹
- شکل (۵-۱) نمودار تک‌خطی سیستم قدرت مورد مطالعه ۶۴
- شکل (۵-۲) جریان هجومی با نویز سفید گوسی ۲۰ دسی‌بل برای ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ مگاوات آمپر ۶۶
- شکل (۵-۳) جریان خطای داخلی با نویز سفید گوسی ۲۰ دسی‌بل برای ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ مگاوات آمپر ۶۶
- شکل (۵-۴) اشباع CT در حضور خطای خارجی و جریان هجومی. خط ممتد $|id|$ و خطچین i_r ۶۸
- شکل (۵-۵) خطای تشخیص روش پیشنهادی (خط تو پر) و روش بازدارنده هارمونیک (خط نقطه‌چین) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر بدون حضور نویز ۷۱
- شکل (۵-۶) متوسط زمان تشخیص روش پیشنهادی (خط تو پر) و روش بازدارنده هارمونیک (خط نقطه‌چین) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر بدون حضور نویز ۷۱
- شکل (۵-۷) خطای تشخیص روش پیشنهادی (خط تو پر) و روش بازدارنده هارمونیک (خط نقطه‌چین) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر با حضور نویز ۷۲
- شکل (۵-۸) متوسط زمان تشخیص روش پیشنهادی (خط تو پر) و روش بازدارنده هارمونیک (خط نقطه‌چین) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر با حضور نویز ۷۲

فهرست جداول

جدول (۱-۲) انواع مختلف گروه برداری ترانسفورماتور قدرت دو سیم پیچه	۱۳
جدول (۱-۳) ویژگی ها و انواع اغتشاشات بررسی شده در روش های پیشنهادی مقالات بررسی شده	۳۸
جدول (۱-۵): انواع شرایط و اغتشاشات ممکن برای ترانسفورماتور قدرت، به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی	۶۳
جدول (۲-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگا ولت آمپر بدون در نظر گرفتن نویز و اشباع CT	۶۵
جدول (۳-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۳۰ مگا ولت آمپر بدون در نظر گرفتن نویز و اشباع CT	۶۵
جدول (۴-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگا ولت آمپر با در نظر گرفتن نویز سفید گوسی و بدون اشباع CT	۶۷
جدول (۵-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۳۰ مگا ولت آمپر با در نظر گرفتن نویز سفید گوسی و بدون اشباع CT	۶۷
جدول (۶-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگا ولت آمپر همراه با اشباع CT	۶۹
جدول (۷-۵): نتایج روش بازدارنده هارمونیک برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگا ولت آمپر بدون در نظر گرفتن اشباع CT	۷۰
جدول (ض-۱) اطلاعات ترانسفورماتورهای قدرت	۷۱
جدول (ض-۲) اطلاعات اجزای شبکه قدرت	۷۱
جدول (ض-۳) مقادیر ضرایب روش پیشنهادی در تست های صورت گرفته	۷۲

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از جمله تجهیزات گران قیمت و حیاتی در شبکه قدرت می باشند. این تجهیزات نقش کلیدی در برقراری ارتباط و انتقال انرژی بین شبکه های با سطوح ولتاژ الکتریکی متفاوت، ایفا می کنند. هزینه تعمیرات یک ترانسفورماتور قدرت آسیب دیده ممکن است بسیار زیاد باشد و همچنین، صدمه دیدن این تجهیزات می تواند منجر به خاموشی های گسترده در شبکه شده و موجب تحمیل خسارت های سنگینی به شرکت های برق شود. از این رو حفاظت از این تجهیزات امری ضروری می باشد. در صورت وقوع خطا در یک ترانسفورماتور قدرت به منظور به حداقل رساندن خسارت وارده، باید هرچه سریع تر خطای رخ داده پاک سازی شود؛ بنابراین سیستم حفاظتی بکار گرفته شده برای این تجهیزات باید از دقت و سرعت بالایی در تشخیص خطا برخوردار باشد. حفاظت دیفرانسیل^۱ از سریع ترین، مهم ترین و متداول ترین حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت به شمار می رود [۱]. از چالش های اساسی در این حفاظت تشخیص شرایط جریان هجومی^۲، جریان هجومی بازبایی^۳، اضافه تحریک^۴ و خطاهای خارجی از سایر خطاهای داخلی و خطاهای سیم پیچ می باشد. تاکنون روش های بسیاری برای جلوگیری از عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل پیشنهاد شده که الزاماً قابل پیاده سازی نبوده یا تمامی اغتشاشات را تشخیص نمی دهند. بنابراین، در این پایان نامه روش جدیدی بر اساس الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته، برای بهبود عملکرد حفاظت دیفرانسیل ارائه می شود.

۱-۲- بیان مسئله

در ترانسفورماتورهای قدرت با توان ۱۰ مگا ولت آمپر و بیشتر، یکی از کارآمدترین حفاظت های الکتریکی، حفاظت دیفرانسیل می باشد [۱]. حفاظت دیفرانسیل به عنوان یک حفاظت واحد^۵، عملکردی آنی و مستقل از سایر سیستم های حفاظتی دارد؛ بنابراین، در صورت تشخیص خطا در ناحیه حفاظتی، بخش آسیب دیده به سرعت از سایر بخش های سالم جدا می گردد. در این میان برخی از اغتشاشات می تواند سبب عملکرد نابجای

^۱ Differential protection

^۲ Inrush current

^۳ Recovery inrush current

^۴ Overexcitation

^۵ Unit

حفاظت دیفرانسیل و به دنبال آن خروج ترانسفورماتور قدرت شود. از مهم‌ترین چالش‌های این حفاظت، عدم عملکرد در صورت وقوع شرایطی مانند، جریان هجومی، جریان هجومی بازیابی، اضافه تحریک و خطاهای خارجی می‌باشد. جریان هجومی با برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت پدیدار می‌شود و سبب جاری شدن جریان دیفرانسیل زیادی در حفاظت دیفرانسیل می‌شود. این جریان که بزرگی آن ممکن است تا ۱۰ برابر جریان نامی ترانسفورماتور باشد، وضعیتی مشابه خطای داخلی به وجود می‌آورد و می‌تواند سبب عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل شود. جریان هجومی بازیابی شکل موجی مشابه جریان هجومی دارد و در اثر بازیابی ولتاژ ترانسفورماتور، پس از رفع خطا (معمولاً خطاهای دوفاز و سه‌فاز) در سمت منبع تغذیه ایجاد می‌شود. در صورت وقوع اضافه ولتاژهای گذرا یا کاهش فرکانس، ممکن است هسته ترانسفورماتور قدرت اشباع شود و شرایط اضافه تحریک به وجود آید. در این شرایط تعادل جریان در اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت بر هم خورده و سبب جاری شدن جریان دیفرانسیل می‌شود که می‌تواند باعث عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل شود. بنابراین باید راهکاری برای جلوگیری از عملکرد اشتباه این حفاظت در مقابل تمامی اغتشاشاتی که ممکن است برای ترانسفورماتور قدرت رخ دهد ارائه شود تا امنیت و پایداری ترانسفورماتور قدرت را فراهم کند. تاکنون روش‌های مختلفی برای جلوگیری از عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در شرایط ذکر شده ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به انواع روش‌های مبتنی بر هارمونیک [۲]، روش‌های هوشمند [۳]، روش‌های مبتنی بر فرکانس-زمان [۴]، روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی^۱ [۵]، استفاده از سیگنال ولتاژ [۶] و سایر روش‌های ابتکاری [۷] اشاره کرد. اخیراً به‌منظور کاهش تلفات هسته ترانسفورماتورهای قدرت، از مواد جدیدی در تولید هسته استفاده می‌شود که این امر سبب کاهش مقادیر هارمونیک دوم در جریان هجومی شده است [۸] و [۹]. از طرف دیگر در برخی از شرایط مانند، اشباع ترانسفورماتورهای جریان در جریان‌های اتصال کوتاه، استفاده از خازن‌های سری و همچنین اثر خازنی خطوط طولی EHV، مؤلفه هارمونیک دوم بزرگی در جریان خطای داخلی ایجاد می‌شود [۱۰]، [۱۱] و [۸]. بنابراین،

¹ Model base

چنین مسائلی سبب کاهش دقت و کارایی روش‌های مبتنی بر هارمونیک شده است. همچنین، آموزش روش‌های هوشمند به طیف گسترده‌ای از داده در حالت‌های مختلف نیاز دارد که این آموزش‌ها معمولاً زمان‌بر بوده و ممکن است برخی از حالت‌های پیچیده مورد توجه قرار نگیرند. با توجه به اینکه آموزش روش‌های هوشمند وابسته به مشخصات ترانسفورماتور قدرت و اجزای شبکه می‌باشد، بنابراین با تغییر ساختار شبکه یا تغییر ترانسفورماتور قدرت، تمامی آموزش‌ها باید مجدداً انجام شوند. علاوه بر این، روش‌های هوشمند اکثراً بار محاسباتی سنگینی دارند، [۱۲]، [۱۱] و [۱۳]. روش‌های مبتنی بر فرکانس-زمان مانند روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک و تبدیل S معمولاً به فرکانس نمونه برداری بالا و پنجره نمونه برداری بزرگی نیاز دارند، به نوبت حساس هستند و محاسبات سنگینی دارند [۱۴]، [۱۱] و [۱۵]. روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی برای داشتن دقت کافی، به اطلاعات دقیقی از ترانسفورماتور قدرت و منحنی مشخصه هسته این تجهیز نیاز دارند. بنابراین در این روش‌ها، با تغییر ترانسفورماتور قدرت، تمامی پارامترها باید مجدداً تنظیم شوند [۱۶]. روش‌هایی که علاوه بر اندازه‌گیری جریان دو طرف ترانسفورماتور قدرت، نیاز به اندازه‌گیری ولتاژ دارند، هزینه سیستم حفاظتی را افزایش می‌دهند. همچنین، در این روش‌ها به دلیل اضافه شدن یک جزء دیگر احتمال خرابی سیستم افزایش می‌یابد.

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

برای غلبه بر مشکلات ذکر شده، در این پایان‌نامه روشی مبتنی بر الگوریتم جداسازی زمان-گسسته به منظور بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد می‌شود. الگوریتم جداسازی انرژی زمان گسسته به دلیل پنجره نمونه برداری کوچک و محاسبات ساده، سرعت بالایی در تحلیل سیگنال‌ها در حوزه زمان دارد [۱۷]. همچنین در روش پیشنهادی از تحلیل هارمونیک استفاده نمی‌گردد، که این موضوع سبب می‌شود تا روش پیشنهادی دارای سرعت بالایی باشد و مشکلات روش‌های هارمونیک را نداشته باشد. علاوه بر این، روش ارائه شده عملکرد قابل قبولی را در محیط‌های نویزی دارد [۱۸]. این روش برای تشخیص انواع اغتشاشات حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت از دو بخش تشکیل می‌شود. بخش اول خطاهای خارجی را از اغتشاشات داخلی تفکیک می‌کند و بخش دوم جریان هجومی، جریان هجومی بازایی و اضافه تحریک را از

خطاهای داخلی و سیم‌پیچ تشخیص می‌دهد. به کارگیری موازی این دو بخش سبب شده، شرایط جریان هجومی، جریان هجومی بازیابی و اضافه تحریک، حتی پیش از تحریک^۱ حفاظت دیفرانسیل تشخیص داده شوند. در عمل ثابت شده است که ترانسفورماتورهای جریان بلافاصله با بروز خطا وارد اشباع نمی‌شوند [۱۹]. بنابراین، با توجه به سرعت بالای روش پیشنهادی، خطاهای داخلی و سیم‌پیچ پیش از اشباع ترانسفورماتورهای جریان تشخیص داده می‌شوند.

۴-۱- روش تحقیق

برای ارزیابی روش پیشنهادی، انواع اغتشاشات ممکن برای ترانسفورماتور قدرت از جمله؛ جریان هجومی، انواع خطای‌های داخلی و خارجی، خطاهای سیم‌پیچ، خطای سیم‌پیچ همراه با جریان هجومی، اضافه تحریک و جریان هجومی بازیابی؛ در نرم‌افزار EMTP شبیه‌سازی می‌شوند و تحلیل آن در نرم‌افزار MATLAB انجام می‌گیرد. انواع اغتشاشات ذکر شده با در نظر گرفتن اثر نویز و اشباع ترانسفورماتورهای جریان، بر روی دو ترانسفورماتور قدرت (۱۶۰ مگاوات‌آمپر، ۲۳۰/۶۴ کیلوولت، ۵۰ هرتز) و (۳۰ مگاوات‌آمپر، ۶۴/۲۱ کیلوولت، ۵۰ هرتز) که به ترتیب دارای آرایش Ynd01 و Ynyn00 هستند، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. اطلاعات ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات‌آمپر از یک ترانسفورماتور واقعی و اطلاعات ترانسفورماتور ۳۰ مگاوات‌آمپر از نرم‌افزار EMTP-RV گرفته شده است. همچنین در این مطالعه برای شبیه‌سازی خطاهای سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت، از مدل BCTRAN استفاده می‌شود.

۵-۱- ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان‌نامه علاوه بر این فصل شامل پنج فصل دیگر می‌باشد که به شرح زیر می‌باشند:

فصل دوم به مطالعه حفاظت دیفرانسیل، انواع خطاهای ممکن برای ترانسفورماتور قدرت و عملکرد مورد انتظار این حفاظت می‌پردازد.

در فصل سوم به بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه تشخیص انواع اغتشاشات الکتریکی مذکور پرداخته می‌شود. همچنین، یک مطالعه مقایسه‌ای بین پژوهش‌های مذکور جهت درک بهتر نقاط ضعف و قوت روش‌های

¹ Pick-up

تشخیص ارائه شده، انجام می‌شود.

در فصل چهارم، ریاضیات مورد نیاز برای روش پیشنهادی بیان می‌شود و سپس، معیارهای روش پیشنهادی برای تشخیص انواع اغتشاشات ترانسفورماتور قدرت ارائه می‌گردد. در نهایت برای درک بهتر از نحوه عملکرد روش پیشنهادی، سیگنال‌های خروجی روش پیشنهادی برای انواع اغتشاشات تحلیل می‌شود.

در فصل پنجم، کارایی روش پیشنهادی در بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت در حالت‌های مختلف با و بدون وجود نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، مقایسه‌ای بین عملکرد روش پیشنهادی با روش بازدارنده هارمونیک که روشی متداول و مورد استفاده در صنعت می‌باشد، صورت می‌گیرد.

در فصل ششم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود و همچنین پیشنهاداتی برای مطالعات آتی مطرح می‌گردد.

فصل دوم

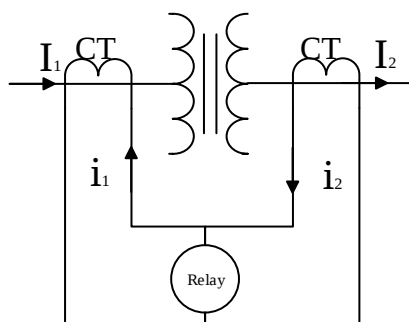
حفاظت دیفرانسیل
ترانسفورماتور قدرت
و مفاهیم مرتبط

۱-۲- مقدمه

با توجه به اهمیت ترانسفورماتور قدرت، این تجهیز حیاتی دارای حفاظت‌های متفاوتی است که به طور کلی به دو دسته مکانیکی و الکتریکی تقسیم می‌شود [۱]. حفاظت‌های مکانیکی شامل؛ رله بوخهتلس^۱، شیر فشار شکن، حفاظت دمایی سیم‌پیچی و روغن و رله جانسون^۲ می‌شود. از حفاظت‌های الکتریکی می‌توان به فیوز، رله اضافه جریان^۳، رله اضافه ولتاژ و کاهش ولتاژ^۴، رله خطای زمین محدود شده^۵ و رله حفاظت دیفرانسیل^۶ اشاره کرد. با توجه به اهمیت حفاظت دیفرانسیل برای ترانسفورماتورهای قدرت، در این فصل به بیان اصول اندازه‌گیری و نحوه عملکرد این حفاظت در مقابل انواع اغتشاشات پرداخته می‌شود و سپس چالش‌های مرتبط با این حفاظت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲- حفاظت دیفرانسیل

حفاظت دیفرانسیل مهم‌ترین حفاظت برای ترانسفورماتورهای قدرت با ظرفیت ۱۰ مگاوات آمپر و بالاتر به شمار می‌رود [۱]. با توجه به اینکه این حفاظت جزء حفاظت‌های واحد است، عملکردی مستقل از سایر حفاظت‌ها دارد. بنابراین سرعت بالایی در تشخیص و رفع خطاهای داخلی دارد. شکل (۱-۲) ساختار حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲) ساختار و اتصالات حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت

¹ Buchholz relay

² Johnson relay

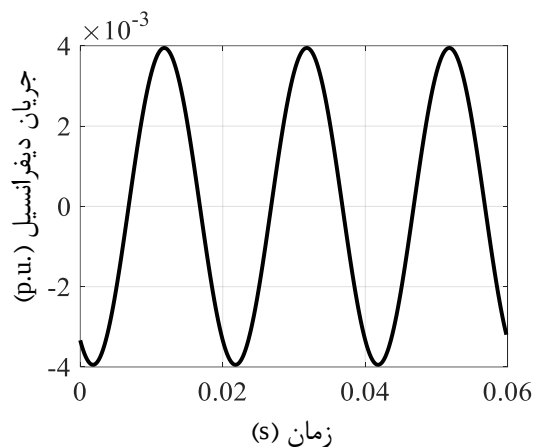
³ Over current relay

⁴ Over voltage relay

⁵ Restricted earth fault relay

⁶ Differential protection relay

مطابق با شکل (۱-۲)، اساس کار حفاظت دیفرانسیل، اندازه‌گیری جریان دو طرف ترانسفورماتور قدرت و مقایسه این جریان‌ها می‌باشد. به منظور مقایسه جریان‌های اولیه و ثانویه، این جریان‌ها توسط ترانسفورماتورهای جریان^۱ (CT)، اندازه‌گیری می‌شوند و اندازه آن‌ها به یک سطح مشترک تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه، حفاظت دیفرانسیل بر اساس اندازه‌گیری جریان CT‌های سمت اولیه و ثانویه عمل می‌کند، بنابراین محدوده حفاظتی^۲ این حفاظت به ناحیه بین CT اولیه و ثانویه محدود می‌شود. اگر نسبت تبدیل CT‌های اولیه و ثانویه عکس نسبت تبدیل ترانسفورماتور قدرت باشد، در حالت کارکرد عادی (با صرف نظر از جریان مغناطیس‌کنندگی^۳ ترانسفورماتور قدرت)، جریان‌های اولیه و ثانویه برابر بوده و طبق اصل جمع جبری جریان‌ها، مقدار جریان دیفرانسیل نزدیک به صفر است (شکل (۲-۲)). همچنین اگر خطایی خارج از محدوده حفاظتی رخ دهد، (در صورت عدم اشباع CT‌ها) جریان اولیه و ثانویه عبوری برابر بوده و جریان دیفرانسیل مقداری نزدیک به صفر خواهد داشت (شکل (۳-۲)). اما اگر خطایی در محدوده حفاظتی (بین CT‌های اولیه و ثانویه) رخ دهد، تعادل جریانی اولیه و ثانویه از بین می‌رود و جریان دیفرانسیل مقداری غیر از صفر دارد (شکل (۴-۲)). بنابراین جاری شدن جریان دیفرانسیل می‌تواند معیاری برای تشخیص وقوع خطای داخلی باشد.



شکل (۲-۲) جریان دیفرانسیل برای کارکرد عادی ترانسفورماتور قدرت

بنا به دلایلی که در ادامه اشاره شده است، همواره مقدار کمی جریان دیفرانسیل در حالت عادی جاری

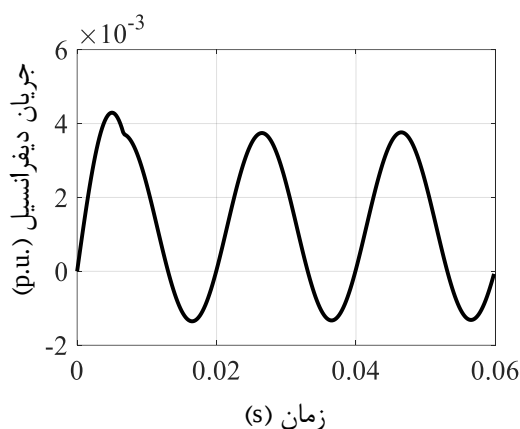
¹ Current transformer

² Protection zone

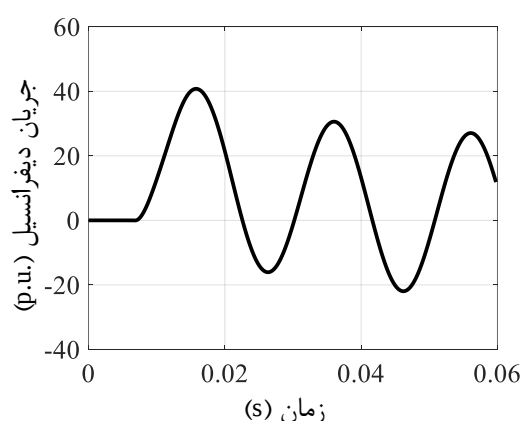
³ Residual magnetic flux

می‌شود.

- عدم در دسترس بودن ترانسفورماتورهای جریان با نسبت تبدیل دلخواه
- عدم یکسان بودن مشخصات هسته ترانسفورماتور جریان با وجود نسبت تبدیل یکسان
- وجود جریان مغناطیس‌کنندگی در ترانسفورماتورهای قدرت در سمت منبع.



شکل (۳-۲) جریان دیفرانسیل برای خطای خارجی ترانسفورماتور قدرت



شکل (۴-۲) جریان دیفرانسیل برای خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت

برای جلوگیری از عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل با توجه به دلایل ذکر شده، از حفاظت دیفرانسیل درصدی^۱ استفاده می‌شود. در این حفاظت پس از اندازه‌گیری جریان‌های اولیه و ثانویه، دو کمیت جریان دیفرانسیل (i_d) و جریان بازدارنده^۲ (i_r) به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$i_d = i_2 - i_1 \quad (۱-۲)$$

$$i_r = (|i_2| + |i_1|)/2 \quad (۲-۲)$$

^۱ Percentage differential relay

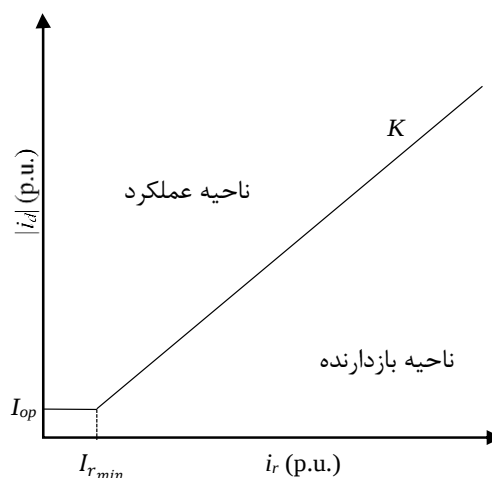
^۲ Restraint \ Restricted current

در روابط فوق i_1 و i_2 به ترتیب جریان اندازه‌گیری شده سمت اولیه و ثانویه می‌باشند. سپس منحنی مشخصه حفاظت دیفرانسیل درصدی با استفاده از قیود (۳-۲) و (۴-۲) به دو قسمت، شامل ناحیه عملکرد و ناحیه بازدارنده تقسیم می‌شود.

$$|i_d| = K(i_r - I_{r_{min}}) + I_{op} \quad (۳-۲)$$

$$|i_d| > I_{op} \quad (۴-۲)$$

در روابط بالا، K ، $I_{r_{min}}$ و I_{op} به ترتیب شیب منحنی مشخصه، حداقل جریان بازدارنده و جریان عملکرد هستند. مقدار ضریب K معمولاً بین ۰/۱ تا ۰/۲ است به طوری که مقدار کوچک‌تر K سبب حساسیت بیشتر در حفاظت دیفرانسیل درصدی می‌شود [۱۹-۲۱]. برای جلوگیری از عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل درصدی به دلیل جریان مغناطیس‌کنندگی، در منحنی مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل یک مقدار عرض از مبدأ (I_{op}) در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن وابسته به جریان مغناطیس‌کنندگی است. شکل (۵-۲) نمونه‌ای از منحنی مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل درصدی را نشان می‌دهد. این منحنی مشخصه می‌تواند دارای چند شیب متفاوت باشد که سبب افزایش پایداری این حفاظت می‌گردد [۲۱]. در شکل (۵-۲)، ناحیه بالای منحنی مشخصه، ناحیه عملکرد و قسمت پایین منحنی، ناحیه بازدارنده نامیده می‌شود. در صورتی که مقادیر محاسبه شده جریان دیفرانسیل و جریان بازدارنده در ناحیه عملکرد قرار بگیرند، حفاظت دیفرانسیل درصدی دستور قطع صادر می‌کند. همچنین هنگامی که جریان‌های مذکور در ناحیه بازدارنده قرار بگیرند، این حفاظت عملکرد نخواهد داشت.



شکل (۵-۲) منحنی مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل درصدی

از جمله مواردی که باید در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت در نظر داشت؛ توجه به نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای جریان، گروه برداری ترانسفورماتور قدرت و حذف جریان‌های توالی صفر است. موارد اشاره شده در رله‌های مکانیکی و استاتیکی با استفاده از اتصالات خاص CTها در اولیه و ثانویه و استفاده از CTهای کمکی قابل رفع می‌باشند؛ اما در رله‌های دیجیتال و عددی نیازی به اتصالات متفاوت و CTهای کمکی نیست. در این رله‌ها با انجام محاسبات داخلی، تطابق لازم برای جریان‌های اولیه و ثانویه فراهم می‌شود [۱۹-۲۱]. در ادامه نحوه یکسان‌سازی جریان‌ها در این رله‌ها به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

۲-۲- یکسان‌سازی جریان‌های اندازه‌گیری شده

یکسان‌سازی جریان‌های اندازه‌گیری شده در رله‌های عددی و دیجیتال در چهار مرحله، ضریب یکسان‌سازی^۱، جبران‌سازی گروه برداری^۲، حذف توالی صفر و نظارت بر موقعیت تپ‌چنجر^۳ صورت می‌گیرد.

۲-۲-۱- ضریب یکسان‌سازی اندازه جریان‌ها

جریان‌های اندازه‌گیری شده توسط CTها تا حد زیادی در یک بازه نزدیک به هم قرار می‌گیرند، اما همچنان دارای اختلاف می‌باشند. در رله‌های مذکور این توانایی وجود دارد که اختلاف جریان حاصل از عدم تطابق ضرایب CTها جبران شود. در این روش جریان‌های اندازه‌گیری شده در ضریب یکسان‌سازی که به صورت رابطه (۲-۵) به دست می‌آید، ضرب می‌شوند.

$$F_{am} = \frac{\sqrt{3}V_{ref}R_{ctc}}{S_{ref}} \quad (۲-۵)$$

در رابطه بالا S_{ref} ، V_{nom} و R_{ctc} به ترتیب، توان مبنا، ولتاژ مبنا و نسبت تبدیل CT هستند [۲۰] و [۲۱]. با استفاده از این روش، جریان هر دو سمت به صورت پریونیت به دست می‌آید و تفاضل جریان در کارکرد عادی سیستم، مقداری نزدیک به صفر خواهد بود.

۲-۲-۲- جبران‌سازی گروه برداری

گروه برداری‌های مختلف در اتصالات ترانسفورماتورهای قدرت می‌تواند سبب اختلاف فاز بین جریان اولیه

^۱ Amplitude-matching factor

^۲ Vector group matching

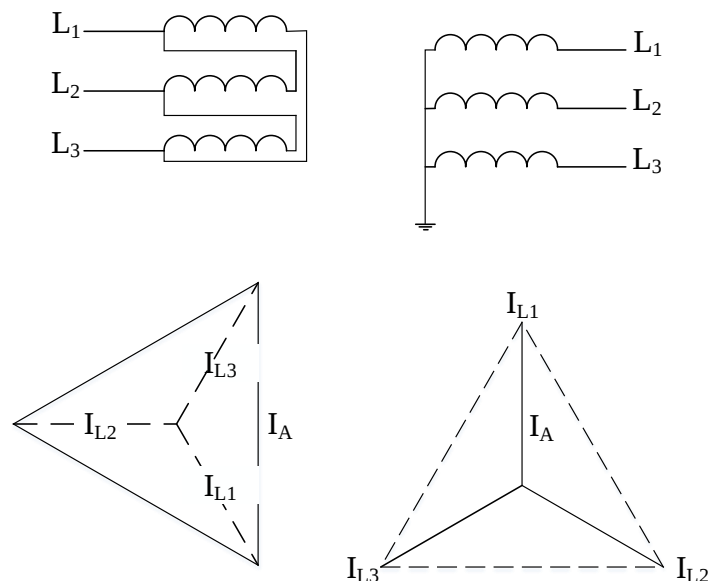
^۳ Tap changer

و ثانویه و جاری شدن جریان دیفرانسیل شود. روش‌هایی که اختلاف فاز حاصل از گروه برداری را حذف می‌کنند، جبران‌سازی گروه برداری نامیده می‌شوند. مطابق با جدول (۱-۲)، ترانسفورماتور قدرت دو سیم‌پیچه می‌تواند دارای گروه برداری‌های مختلفی باشد.

جدول (۱-۲) انواع مختلف گروه برداری ترانسفورماتور قدرت دو سیم‌پیچه [۲۱]

Yy00	Yy02	Yy04	Yy06	Yy08	Yy10
Yd01	Yd03	Yd05	Yd07	Yd09	Yd11
Dy01	Dy03	Dy05	Dy07	Dy09	Dy11
Dd00	Dd02	Dd04	Dd06	Dd08	Dd10

در رله‌های دیجیتال و عددی اختلاف فاز حاصل از گروه برداری با استفاده از روابط ریاضی اصلاح می‌شود. به طور مثال، اگر گروه برداری ترانسفورماتور قدرتی مانند شکل (۶-۲) باشد، با استفاده از رابطه (۶-۲) برای جریان‌های سمت مثلث و رابطه (۷-۲) برای جریان‌های سمت ستاره، اختلاف فاز ایجاد شده اصلاح می‌شود [۲۱].



شکل (۶-۲) اتصال Yd05 ترانسفورماتور قدرت و اختلاف فاز ایجاد شده بین جریان‌ها [۲۱]

$$\begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{pmatrix} \quad (۶-۲)$$

$$\begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = 1 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{pmatrix} \quad (۷-۲)$$

در این روابط مقادیر، I_A ، I_B و I_C جریان‌های تطبیق یافته و I_{L1} ، I_{L2} و I_{L3} جریان‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند.

۲-۲-۳- حذف جریان توالی صفر

در اتصال ستاره زمین شده-مثلت ترانسفورماتور قدرت، در صورت ایجاد خطای زمین در خارج از ناحیه حفاظتی، جریان توالی صفر از سیم‌پیچ‌های سمت ستاره ترانسفورماتور قدرت عبور می‌کند. در حالی که، این جریان در سیم‌پیچ‌های اتصال مثلث حذف می‌شوند. بنابراین، چنین شرایطی می‌تواند سبب عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل برای خطاهای خارج از ناحیه حفاظتی شود. برای جلوگیری از عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل، جریان‌های توالی صفر باید پیش از محاسبه جریان دیفرانسیل حذف شوند. به عنوان مثال جریان-های توالی صفر در اتصال شکل (۶-۲) با استفاده از رابطه (۸-۲) می‌تواند حذف شود [۲۱].

$$(I_{L1} - I_0) = \frac{1}{3}(3I_{L1} - 3I_0) = \frac{1}{3}(3I_{L1} - I_{L1} - 1I_{L2} - 1I_{L3}) = \frac{1}{3}(2I_{L1} - 1I_{L2} - 1I_{L3}) \quad (۸-۲)$$

۲-۲-۴- نظارت بر موقعیت تپ‌چنجر

تغییر موقعیت تپ‌چنجر، باعث تغییر در نسبت تبدیل ترانسفورماتور قدرت و سبب برهم خوردن تعادل جریان‌های اولیه و ثانویه می‌شود که می‌تواند باعث عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل شود. اما رله‌های دیجیتال و عددی این قابلیت را دارند که با دریافت موقعیت تپ‌چنجر به صورت آنلاین و استفاده از ضرایب جبران‌ساز، تعادل جریان‌ها را حفظ کنند [۲۱].

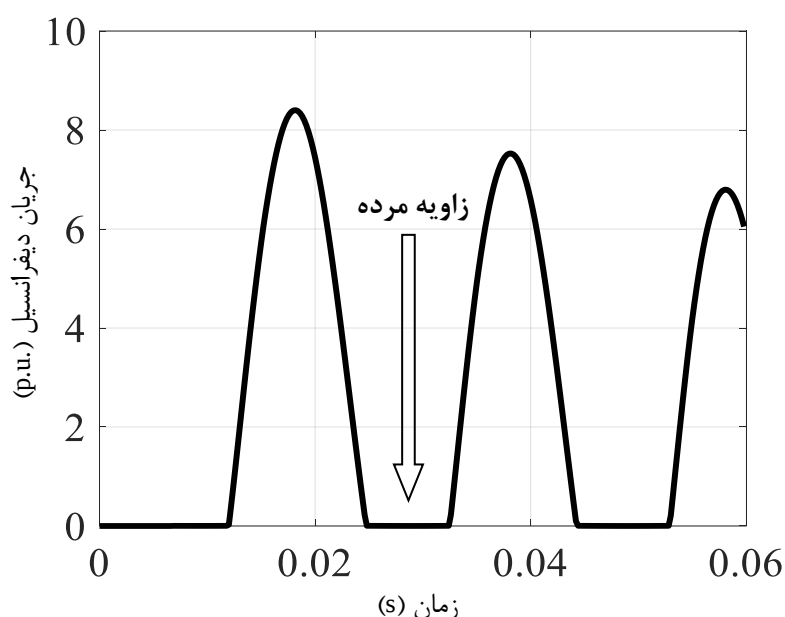
۲-۳- انواع اغتشاشات مرتبط با حفاظت دیفرانسیل

به طور کلی حفاظت دیفرانسیل باید برای تمام خطاهای داخلی عملکرد داشته باشد و برای تمامی خطاهای خارجی و اغتشاشات گذرا نظیر جریان‌های هجومی و شرایط اضافه تحریک عملکرد نداشته باشد. در ادامه انواع اغتشاشات مرتبط با حفاظت دیفرانسیل و عملکرد مورد انتظار از این حفاظت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- **حالت عادی:** منظور از حالت عادی سیستم، کارکرد ترانسفورماتور قدرت در محدوده نامی ولتاژ، فرکانس و جریان می‌باشد، به طوری که هیچ‌گونه خطا و اغتشاشی در سیستم رخ نداده باشد. در این حالت، تمامی جریان‌ها در محدوده مجاز خود قرار دارند و جریان دیفرانسیل مقداری نزدیک به صفر دارد؛ بنابراین، حفاظت دیفرانسیل نباید سیگنال قطعی برای کلیدهای فشار قوی صادر کند.
- **خطای خارجی:** هرگونه اتصال تک‌فاز، دوفاز و سه‌فاز خارج از محدوده حفاظتی به عنوان خطای خارجی شناخته می‌شود. در این حالت اگر چه مقدار جریان‌ها افزایش زیادی دارند، ولی چون مقدار پریونیت جریان ورودی و خروجی ترانسفورماتور قدرت برابر می‌باشد (با صرف‌نظر از اشباع CTها)، لذا جریان دیفرانسیل در شرایط خطای خارجی، مقداری نزدیک به صفر دارد و حفاظت دیفرانسیل نباید دستور قطع صادر کند.
- **خطای داخلی:** وقوع خطاهای تک‌فاز، دوفاز و سه‌فاز در ناحیه حفاظتی و در ترمینال‌های ترانسفورماتور قدرت، به عنوان خطای داخلی شناخته می‌شوند. با وقوع خطای داخلی، تعادل بین جریان اولیه و ثانویه بر هم خورده و جریان دیفرانسیل جاری خواهد شد. در چنین شرایطی انتظار می‌رود حفاظت دیفرانسیل هرچه سریع‌تر عملکرد داشته باشد و دستور قطع را برای کلیدهای فشار قوی صادر کند.
- **جریان هجومی:** در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت به دلیل خاصیت غیرخطی هسته، برهم‌کنشی بین شار پسماند مغناطیسی و زاویه ولتاژ در لحظه کلیدزنی ترانسفورماتور قدرت پدید می‌آید. با توجه به قانون بقای شار در حوزه زمان و اصل قانون فارادی، در برخی شرایط سبب می‌شود، شار مغناطیسی مقدار متوسطی غیر صفر داشته باشد. این مقدار می‌تواند سبب عدم تقارن در جهت‌گیری شار مغناطیسی شود. این عدم تقارن سبب می‌شود شار مغناطیسی فقط در یک جهت وارد ناحیه اشباع شود و در جهت دیگر در ناحیه خطی باقی بماند. در صورت اشباع شدن هسته، جریان مغناطیس‌کننده شدیدتری ایجاد می‌شود که به آن جریان هجومی گویند. این جریان یک‌سویه که به صورت شکل (۲-۷) است، دارای نواحی با اندازه نزدیک به صفر است که اصطلاحاً به این نواحی، زاویه مرده^۱ می‌گویند. این جریان تنها در سیم‌پیچ اولیه (سمت منبع) جاری می‌شود و سبب جاری شدن جریان دیفرانسیل شدیدی می‌شود، بنابراین باید توسط

¹ Dead angel

حفاظت دیفرانسیل تشخیص داده شود و از عملکرد آن جلوگیری شود.



شکل (۷-۲) جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت

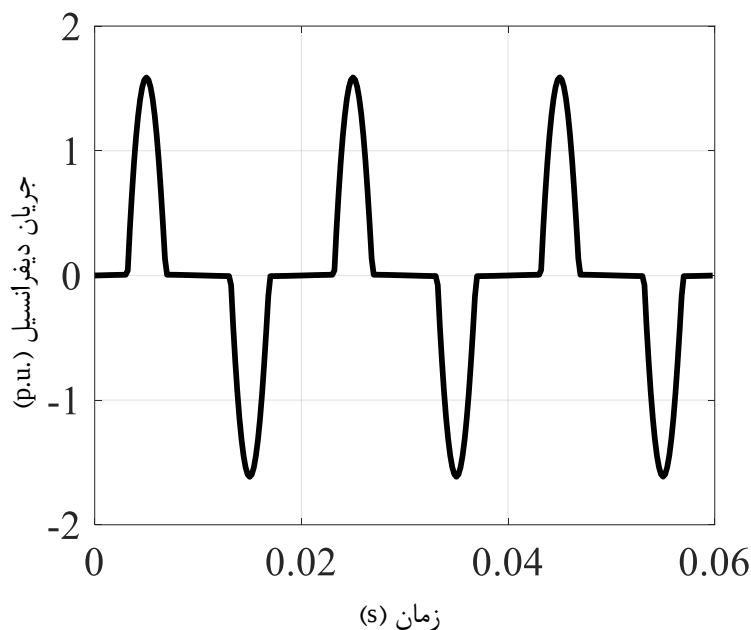
مقدار جریان هجومی و زمان میرا شدن آن وابسته به مشخصات ترانسفورماتور قدرت، امپدانس بین منبع ولتاژ و ترانسفورماتور قدرت، زاویه کلیدزنی و شار پسماند^۱ هسته است و با تغییر این پارامترها، اندازه جریان هجومی و زمان میرایی می تواند متفاوت باشد. اندازه جریان هجومی گاهی می تواند تا ۱۰ برابر جریان نامی باشد و میرایی آن تا چند سیکل می تواند طول بکشد. هرچه امپدانس سیستم مقدار کمتری داشته باشد، اندازه جریان هجومی بزرگ تر و میرایی آن کندتر خواهد بود. همچنین وجود شار پسماند می تواند سبب افزایش جریان هجومی شود. در کلیدزنی ترانسفورماتور قدرت بیشترین جریان هجومی زمانی پدیدار می شود که کلیدزنی در صفر ولتاژ رخ دهد. با توجه به تقارن جریان هجومی نسبت به محور عمودی، شکل موج این پدیده همانند یک تابع زوج است و بیشتر دارای هارمونیک های زوج می باشد. با توجه به بررسی های صورت گرفته جریان هجومی دارای هارمونیک دوم زیادی می باشد [۲] که در عمل از همین ویژگی برای تشخیص جریان هجومی استفاده می گردد.

- **جریان هجومی همراه با خطای داخلی:** این حالت زمانی اتفاق می افتد که در حین برق دار شدن

¹ Residual flux

ترانسفورماتور قدرت همراه با خطا در محدوده حفاظتی باشد. بنابراین به دلیل وجود خطا در این حالت، حفاظت دیفرانسیل باید دستور قطع را صادر کند.

- **اضافه تحریک:** ترانسفورماتورهای قدرت به طور معمول در نقطه زانویی منحنی مغناطیس‌شوندگی بهره‌برداری می‌شوند، بنابراین در صورت وقوع اضافه ولتاژهای گذرا یا افت فرکانس، ممکن است هسته ترانسفورماتور قدرت اشباع شود. در چنین شرایطی نامتعادلی جریان‌های اولیه و ثانویه سبب جاری شدن جریان دیفرانسیل شود. جریان دیفرانسیل در چنین شرایطی مشابه شکل (۸-۲) خواهد بود و دارای زوایای مرده می‌باشد. با توجه به اینکه شکل موج اضافه تحریک به تابع فرد شباهت دارد، سبب می‌شود تبدیل فوریه آن دارای هارمونیک‌های فرد باشد. اگرچه اضافه تحریک سبب جاری شدن جریان دیفرانسیل و تحریک حفاظت دیفرانسیل می‌شود، اما حفاظت مذکور نباید در این شرایط عملکردی داشته باشد.



شکل (۸-۲) جریان دیفرانسیل در شرایط اضافه تحریک

- **جریان هجومی بازیابی:** این حالت زمانی رخ می‌دهد که ولتاژ ترانسفورماتور قدرت پس از رفع یک خطای خارجی (معمولاً دو فاز و سه فاز) بازیابی شود. جریان هجومی بازیابی، شرایطی مشابه جریان هجومی را به وجود می‌آورد، اما دامنه کوچکتری دارد. در چنین شرایطی نیز باید از عملکرد حفاظت دیفرانسیل جلوگیری نمود.

- **خطاهای سیم‌پیچی:** عوامل متفاوتی می‌توانند سبب آسیب رساندن یا از بین رفتن عایق سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور قدرت شوند. از جمله این عوامل می‌توان به اضافه ولتاژهای گذرا، فرسودگی عایقی، افزایش بیش از حد دمای ترانسفورماتور قدرت و حمل نادرست آن در جابه‌جایی‌ها اشاره کرد. خطاهایی که به دلیل از بین رفتن عایق سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور قدرت به وجود می‌آید، به خطاهای سیم‌پیچ معروف هستند. از بین رفتن عایق می‌تواند سبب اتصال کوتاه بین سیم‌پیچ‌ها یا سیم‌پیچ و بدنه شود که این نوع از خطاها را به ترتیب خطای حلقه به حلقه^۱ و حلقه به زمین^۲ می‌نامند. مطابق مطالعات انجام شده، ۷۰ تا ۸۰ درصد خطاهای ترانسفورماتور قدرت از نوع خطاهای حلقه به حلقه و حلقه به زمین است [۱۱]. در صورت وقوع این خطاها، حفاظت دیفرانسیل باید دارای عملکرد سریع و مناسبی باشد.
- **خطاهای سیم‌پیچ همراه با جریان هجومی:** یکی از حالت‌های مهم و چالش‌برانگیز در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت، زمانی است که بین سیم‌پیچ‌ها یا سیم‌پیچ با بدنه ترانسفورماتور قدرت خطایی رخ داده باشد و تحت این شرایط ترانسفورماتور قدرت برق‌دار شود. از آنجایی که معمولاً دامنه جریان خطاهای سیم‌پیچ کمتر از خطاهای وارده بر ترمینال‌های ترانسفورماتور قدرت می‌باشد، ممکن است حفاظت دیفرانسیل به دلیل دامنه بالا جریان هجومی، به اشتباه بلاک^۳ شود. در حالی که در چنین شرایطی، حفاظت مذکور باید سریعاً عملکرد داشته باشد.
- **اشباع ترانسفورماتور جریان:** همان‌طور که اشاره شد اغتشاشات زیادی می‌تواند بر روی ترانسفورماتور قدرت رخ دهد. تشخیص درست و به موقع سیستم‌های حفاظتی وابسته به دریافت اطلاعاتی است که توسط سیستم‌های اندازه‌گیری انجام می‌شود. با توجه به اینکه در حفاظت دیفرانسیل، داده‌های مورد نیاز از جریان‌های هر دو سمت ترانسفورماتور قدرت، توسط ترانسفورماتورها اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین انتخاب ترانسفورماتور جریان مناسب یکی از مهم‌ترین شرایط در دستیابی به دقت بالا و عملکرد مناسب سیستم‌های حفاظتی است. با این حال در صورت وقوع برخی شرایط مانند خطاهایی با اندازه جریان بسیار

¹ Turn to turn

² Turn to ground

³ Block

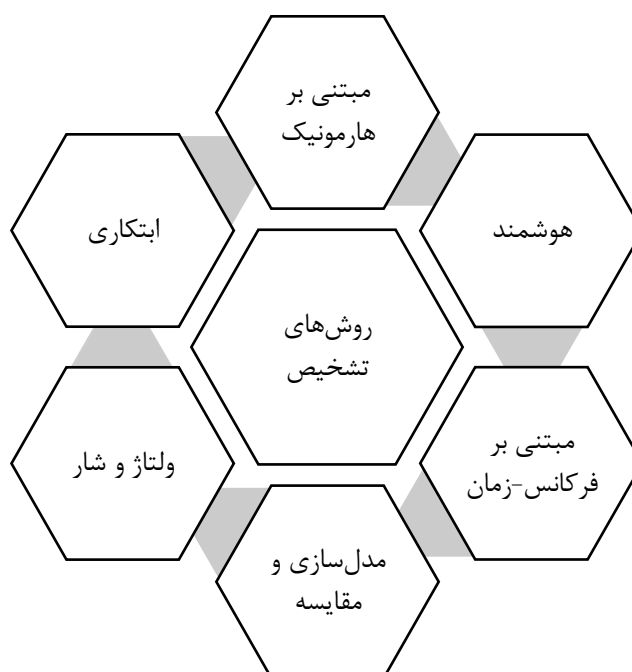
بالا، برخورد صاعقه به خطوط یا تجهیزات سیستم قدرت و همچنین پدیده‌هایی مانند جریان هجومی که مؤلفه DC بزرگی دارند، ممکن است باعث اشباع هسته ترانسفورماتور جریان شده و دقت اندازه‌گیری را کاهش دهد. این کاهش دقت در اندازه‌گیری ممکن است سبب عملکرد ناخواسته یا عدم عملکرد حفاظت دیفرانسیل در شرایط خطا شود؛ بنابراین، باید اشباع ترانسفورماتورهای جریان در شرایط خطاهای شدید در نظر گرفته شود.

فصل سوم

مروری بر مطالعات انجام شده

۳-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی سایر مطالعات انجام شده در تشخیص انواع اغتشاشات مرتبط با حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت پرداخته می‌شود. با توجه به این که تاکنون روش‌های زیادی برای تشخیص انواع اغتشاشات ارائه شده است، بنابراین دسته‌بندی تمامی روش‌ها به طور دقیق کار مشکلی است. با این حال دسته‌بندی ارائه شده در شکل (۳-۱) برای این روش‌ها در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این شکل، روش‌های شناسایی اغتشاشات به شش دسته، روش‌های مبتنی بر هارمونیک، روش‌های هوشمند، روش‌های مبتنی بر فرکانس-زمان، روش‌های مدل‌سازی، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری ولتاژ و شار، و روش‌های ابتکاری تقسیم‌بندی می‌شوند. در ادامه انواع روش‌های هر دسته به صورت مختصر مورد بررسی قرار می‌گیرند.



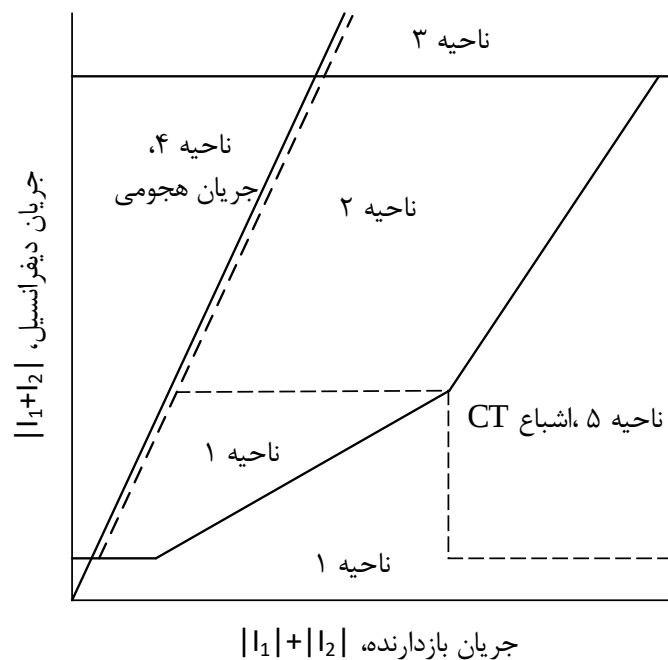
شکل (۳-۱) دسته‌بندی روش‌های تشخیص اغتشاشات مرتبط با حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت

۳-۲- روش‌های مبتنی بر هارمونیک

روش‌های مبتنی بر هارمونیک، از قدیمی‌ترین و متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای تفکیک جریان هجومی و خطای اضافه تحریک از خطاهای داخلی و سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت می‌باشند. در این روش در صورتی که نسبت هارمونیک دوم و هارمونیک پنجم به مؤلفه اصلی از آستانه از پیش تعیین شده فراتر رود، به

ترتیب جریان هجومی و اضافه تحریک تشخیص داده می‌شوند و از عملکرد حفاظت دیفرانسیل جلوگیری می‌شود [۱۰]. برخی از مقالات راه‌حلهایی برای افزایش کارایی روش بازدارنده هارمونیک^۱ ارائه داده‌اند [۱۴] و [۲۲-۲۴]. در [۱۴]، روش حفاظت دیفرانسیل تطبیقی چند منطقه‌ای ارائه شده که نسبت به روش قدیمی‌تر، در میزان تشخیص خطاهای داخلی از سایر اغتشاشات، بهبود حاصل شده است. در این مرجع، منحنی مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل درصدی مطابق شکل (۲-۳) به پنج ناحیه به صورت زیر تقسیم شده است:

- ناحیه ۱: خطاهای امپدانس بالا با جریان کم
- ناحیه ۲: خطاهای شدید با جریان بالا
- ناحیه ۳: خطاهای بسیار شدید
- ناحیه ۴: جریان هجومی
- ناحیه ۵: اشباع ترانسفورماتورهای جریان



شکل (۲-۳) مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل پیشنهادی مرجع [۱۴]

در این روش با توجه به نوع اغتشاش و منحنی مشخصه، نوع خطا و شدت آن تشخیص داده می‌شود و

¹ Harmonic restraint method

متناسب با آن مدت زمان تأخیر معین می‌شود. حداکثر زمان تشخیص در این روش ۱۷ میلی‌ثانیه است.

مرجع [۲۲] برای بهبود عملکرد حفاظت دیفرانسیل از تبدیل فوریه تجربی^۱ که از تبدیل فوریه گسسته گرفته شده، استفاده نموده است. مزیت این تبدیل اصلاحاتی است که بر اساس طبیعت شکل موج جریان‌ها، بر روی الگوریتم اعمال می‌شود و سبب می‌شود عملکرد بهتری را نسبت به تبدیل فوریه گسسته داشته باشد. سرعت تشخیص در این روش سه چهارم سیکل گزارش است.

برخی از مقالات روش‌های متفاوتی را برای استخراج هارمونیک‌های جریان دیفرانسیل ارائه کرده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از فیلتر کالمن چند حالتی و تحلیل فوریه و برازش با کمترین مربعات به منظور استخراج هارمونیک جریان دیفرانسیل اشاره کرد. مطابق با نتایج به دست آمده در [۲۳]، فیلتر کالمن پنج حالتی سرعت بیشتری را در تصمیم‌گیری حفاظت دیفرانسیل فراهم نموده است، به طوری که سرعت تشخیص در این روش نیم سیکل می‌باشد. نویسندگان این مقاله، با تغییر فیلتر کالمن پنج حالتی به یازده حالتی و استفاده هم‌زمان از هارمونیک‌های دوم و چهارم روش قبلی خود را بهبود داده‌اند و در این مطالعه، شرایط اضافه تحریک و اشباع ترانسفورماتور جریان نیز بررسی شده است [۲۴].

در حالی که روش‌های مبتنی بر معیارهای هارمونیک بسیار زیاد بوده و روش‌های متنوعی در این زمینه مطرح شده، با این وجود عواملی سبب کاهش دقت و کارایی روش‌های مبتنی بر هارمونیک شده است. اخیراً با استفاده از مواد جدید در تولید هسته ترانسفورماتورهای قدرت به منظور کاهش تلفات هسته، مقادیر هارمونیک دوم در جریان هجومی کاهش یافته است [۹]. از طرف دیگر برخی از شرایط مانند، اشباع ترانسفورماتورهای جریان در جریان‌های اتصال کوتاه، استفاده از خازن‌های سری و اثر خازنی خطوط طولی EHV، مؤلفه هارمونیک دوم بزرگی در جریان خطای داخلی ایجاد می‌کنند [۱۱] و [۳۳] که دقت این روش‌ها را کاهش می‌دهد.

۳-۳- روش‌های هوشمند

از جمله روش‌هایی که اخیراً با پیشرفت رله‌های دیجیتال و عددی و افزایش سرعت پردازنده‌ها برای تفکیک

¹ Empirical Fourier transform

اغتشاشات در حفاظت دیفرانسیل پیشنهاد شده، روش‌های هوش مصنوعی می‌باشند. این روش‌ها توانایی یادگیری حالت‌های مختلف سیستم را دارند. از جمله این روش‌ها می‌توان به شبکه عصبی مصنوعی^۱ [۳] و [۲۵-۲۷]، منطق فازی^۲ [۲۸] و [۲۹]، درخت تصمیم^۳ [۳۰] و ماشین بردار پشتیبانی^۴ [۳۱] اشاره کرد. پژوهش و نوآوری محققین در این فضا بیشتر معطوف به انتخاب ابزار تصمیم‌گیری مناسب و بهینه‌سازی ساختار الگوریتم و پارامترهای آن است. نحوه عملکرد روش‌های هوش مصنوعی به این صورت است که وضعیت ترانسفورماتور را بر اساس الگوهای از قبل آموزش دیده، تعیین می‌کنند. این الگوها توسط داده‌های گسترده‌ای که به الگوریتم داده می‌شود و حالت‌های مختلف سیستم را در بر می‌گیرد، حاصل می‌شوند.

در روش‌های شبکه‌های عصبی، ساختار لایه‌ها (تعداد نرون‌ها و ارتباط بین آن‌ها) و ماهیت داده‌های ورودی از جمله نکات مهم در به‌کارگیری این روش‌ها به حساب می‌آید. منظور از ماهیت داده‌های ورودی این است که آیا از سیگنال‌های خام اندازه‌گیری شده به عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده می‌شود یا پردازش‌های خاصی از قبل بر روی داده‌ها صورت می‌گیرد. همچنین، در این روش‌ها باید توجه داشت که، اگرچه با افزایش تعداد نرون‌ها دقت تشخیص بالا می‌رود، اما از سوی دیگر سرعت پاسخ‌دهی کاهش می‌یابد. بنابراین، در انتخاب بهینه تعداد نرون‌ها، باید مصالحه‌ای بین سرعت و دقت تشخیص در نظر گرفته شود.

مرجع [۳] اولین مقاله ارائه‌دهنده شبکه‌های عصبی برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت است. در این پژوهش، ساختارهای لایه‌ای متفاوتی برای شبکه عصبی در نظر گرفته شده که در نهایت ساختار شش ورودی و یک خروجی به عنوان مناسب‌ترین ساختار استفاده شده است. ورودی‌های آن شش نمونه متوالی از جریان دیفرانسیل است که با توجه به فرکانس نمونه‌برداری گزارش شده در مقاله، پنجره‌ای به طول نیم سیکل را در بر می‌گیرد. سرعت پاسخگویی در این روش در حدود یک سیکل بیان شده است و حالت‌هایی نظیر جریان هجومی همراه با خطای داخلی و خارجی، خطاهای سیم‌پیچ، جریان هجومی بازیابی و تحریک بیش‌ازحد در آن بررسی نشده‌اند.

¹ Artificial Neural Network (ANN)

² Fussy logic

³ Decision tree

⁴ Support vector machine (SVM)

همان‌طور که بیان شده، ماهیت داده‌های ورودی از اهمیت بالایی در روش‌های شبکه عصبی برخوردار می‌باشند. اگرچه استفاده از داده‌های خام جریان دیفرانسیل ساده‌ترین روش در به‌کارگیری شبکه‌های عصبی است، اما انتخاب بهینه‌ای به حساب نمی‌آید؛ بنابراین محققین به ارائه پیش‌پردازش‌هایی برای بهینه کردن سرعت و دقت شبکه‌های عصبی پرداخته‌اند. از جمله این موارد، در مرجع [۲۵] از خروجی‌های تبدیل موجک برای پیش‌پردازش شبکه‌های عصبی استفاده شده و به طور مشابه در مرجع [۲۶]، به منظور پیش‌پردازش داده‌ها، از تبدیل S استفاده شده است. همچنین برخی از مقالات از ترکیب روش‌های مختلف با شبکه‌های عصبی برای تشخیص جریان هجومی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال در مرجع [۲۷] از ترکیب الگوریتم ژنتیک^۱ و شبکه‌های عصبی استفاده شده است. اگرچه مرجع [۲۵] دقت بالایی (۹۹٪) دارد اما شرایطی مانند جریان هجومی بازبایی، اضافه تحریک و اثر نویز در آن بررسی نشده است. همچنین فرکانس نمونه‌برداری در این مقاله ۲۵ کیلوهرتز در نظر گرفته شده که این مقدار بیش از حد فرکانس نمونه برداری در رله‌های صنعتی می‌باشد.

روش هوشمند دیگری که به آن اشاره شد، روش‌های تشخیص بر اساس الگوریتم‌های فازی هستند. با توجه به اینکه سرعت روش‌های فازی نسبت به شبکه‌های عصبی پایین‌تر است، بنابراین در مقایسه با شبکه‌های عصبی از این روش کمتر در این زمینه استفاده شده است. در مرجع [۲۸] از تبدیل موجک برای پیش‌پردازش سیگنال استفاده شده است و منطق فازی برای تصمیم‌گیری نهایی بکار گرفته شده است. در این روش ابتدا تبدیل موجک بر جریان دیفرانسیل اعمال می‌شود و پس از عملیات جبری، سه سیگنال به عنوان ورودی‌های سیستم فازی تولید می‌شوند. نتایج این مقاله، سرعت عملکرد این روش را کمتر از نیم سیکل نشان می‌دهد. همچنین در مرجع [۲۹]، با عملکردی مشابه، از هارمونیک دوم برای ورودی الگوریتم فازی استفاده شده است. دقت تشخیص خطا در این مقالات مشخص نشده همچنین اکثر حالت‌های پیچیده مانند شرایط اضافه تحریک، جریان هجومی بازبایی، اثر اشباع ترانسفورماتور جریان و اثر نویز در این مقالات بررسی نشده‌اند. مرجع [۳۰] از الگوریتم درخت تصمیم برای تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی استفاده کرده است.

¹ Genetic algorithm

مطابق با نتایج این مقاله، روش پیشنهادی دارای دقت بالاتری نسبت به روش مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان می‌باشد و بار پردازشی کمتری دارد. با این حال مدت زمان عملکرد این روش کمی بیشتر از یک سیکل است. در مرجع [۳۱]، از ترکیب ماشین بردار پشتیبان و تبدیل موجک برای تشخیص اغتشاشات استفاده شده است. در این روش، ابتدا از تبدیل موجک برای پیش‌پردازش را بر روی جریان دیفرانسیل هر سه فاز استفاده شده و سیگنال‌های جزئیات سطح اول را محاسبه می‌کند، سپس سیگنال‌های انحراف از معیار روی پنجره نمونه‌برداری متحرک محاسبه می‌شوند. در نهایت برداری با ۲۴۰ مؤلفه تشکیل می‌شود که از آن به عنوان ورودی ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. در این مقاله پنجره نمونه‌برداری یک سیکل در نظر گرفته شده، اما اشاره‌ای به سرعت تشخیص نشده است. همچنین، بیشتر حالت‌های پیچیده غیر از جریان هجومی بازبایی مورد بررسی قرار گرفته و دقت تصمیم‌گیری بالای ۹۹٪ گزارش شده است.

روش‌های هوشمند اگرچه دقت تشخیص بسیار بالا می‌باشد و قابلیت یادگیری و تعمیم‌پذیری خوبی دارند، اما فرآیند آموزش در این گونه از روش‌ها به طیف گسترده‌ای از داده در حالت‌های مختلف نیاز دارد و همچنین آموزش‌های مورد نیاز در روش‌های هوش مصنوعی اکثراً وقت‌گیر است و ممکن است برخی از حالت‌های پیچیده مورد توجه قرار نگیرد. علاوه بر این، با توجه به اینکه آموزش‌ها بر اساس داده‌های ورودی صورت می‌گیرند و این داده‌ها به مشخصات ترانسفورماتور قدرت و اجزای شبکه وابسته می‌باشند؛ بنابراین آموزش‌های صورت گرفته برای هر مورد باید از ابتدا صورت گیرند. همچنین در صورت تغییر ساختار شبکه قدرت، آموزش-های انجام شده باید مجدداً انجام شود. از طرف دیگر روش‌های هوش مصنوعی، بار محاسباتی سنگینی دارند و نیازمند پردازنده‌های قدرتمند می‌باشند که سبب افزایش قیمت تمام شده سیستم حفاظتی می‌شود، [۱۲]، [۱۱] و [۱۳].

۳-۴- روش‌های مبتنی بر فرکانس-زمان

در برخی مطالعات از روش‌هایی مبتنی بر فرکانس و زمان برای تشخیص شرایط حفاظت دیفرانسیل پیشنهاد شده است که از مشهورترین آن‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک^۱ [۴]، [۱۱-۱۲] و [۳۱-۳۲]،

^۱ Wavelet transform

روش تبدیل S [۳۳]، تبدیل زمان-زمان^۱ [۸] و چرپلت^۲ [۳۴] اشاره کرد.

یکی از روش‌های پردازش سیگنال که کاربرد فراوانی در زمینه مسائل سیستم‌های قدرت دارد، تبدیل موجک است. از جمله ویژگی‌های قابل توجه تبدیل موجک، تشخیص گذراهای با دوره حضور است. همچنین با استفاده از تبدیل موجک، لحظه وقوع این گذراها قابل تشخیص است. بررسی پژوهش‌های انجام شده بر اساس تبدیل موجک، سرعت مناسب این روش را در تشخیص خطاها نشان می‌دهد. با این حال روش‌هایی که بر پایه تبدیل موجک می‌باشند معمولاً به فرکانس نمونه‌برداری بالا و پنجره‌های نمونه‌برداری بزرگ احتیاج دارند و از سوی دیگر حساسیت زیادی به نویز نشان می‌دهند [۱۴].

اولین بار ایده استفاده از تبدیل موجک در حفاظت دیفرانسیل در مرجع [۴] بیان شده است. روش تشخیص در این روش به این صورت است که تبدیل موجک بر روی داده‌های جریان دیفرانسیل اعمال می‌شود و سپس بر اساس مقایسه آماری مؤلفه‌های انرژی به دست آمده، تفکیک جریان هجومی از خطای داخلی صورت می‌گیرد. نویسندگان این مقاله معیار تصمیم‌گیری را با استفاده از یک تحلیل آماری انجام داده‌اند و تلاشی برای تشخیص جریان هجومی از شرایط خطا با استفاده از مؤلفه‌های به دست آمده از تبدیل موجک صورت نگرفته است. اما چندی بعد محققین با مشخص شدن نقاط قوت این تبدیل، مطالعات سودمندی را با محوریت این تبدیل قدرتمند انجام دادند. از جمله این مطالعات مرجع [۳۲] است که از تبدیل بسته‌های موجک^۳ برای شناسایی جریان هجومی استفاده می‌کند. تفاوت تبدیل بسته‌های موجک با تبدیل موجک گسسته، در عبور دادن سیگنال‌ها از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر است. به این صورت که در تبدیل بسته‌های موجک پس از عبور سیگنال‌ها از فیلتر و حذف نیمی از نمونه‌ها، سیگنال به دست آمده مجدداً در مرحله بعد از هر دو فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر عبور می‌کند. این در حالی است که در تبدیل موجک گسسته، تنها سیگنالی که از فیلتر پایین‌گذر عبور می‌کند وارد فیلترهای مرحله بعد می‌گردد. این مقاله پس از اعمال تبدیل بسته‌های موجک به جریان دیفرانسیل، معیار مناسبی برای تفکیک جریان هجومی از خطای داخلی در جزئیات سیگنال سطح دو

¹ Time-time transform

² Chirplet transform

³ Wavelet packet transform

ارائه داده است. به این صورت که در صورت وقوع خطای داخلی، ضرایب سیگنال سطح دو غیر صفر خواهد بود و در شرایط عادی یا وقوع جریان هجومی این ضرایب صفر یا مقداری نزدیک به صفر می‌باشند. مدت زمان عملکرد این روش یک‌چهارم سیکل است. اگرچه مرجع [۳۲] نسبت به مرجع [۴] شرایط اشباع ترانسفورماتور جریان را در نظر گرفته اما هر دو مرجع بیشتر شرایط پیچیده در حفاظت دیفرانسیل را بررسی نکرده‌اند.

مراجع [۱۲] و [۱۱] از تبدیل موجک گسسته مرزی^۱ برای تشخیص جریان هجومی استفاده کرده‌اند. مرجع [۱۲] به طور خاص به تشخیص خطاهای داخلی و خارجی هنگام اشباع CT پرداخته است. با این حال بررسی تشخیص جریان هجومی همراه با وقوع خطای داخلی در این مقاله صورت نگرفته است. در حالی که مرجع [۱۱] با بهره‌گیری از راهکار مقاله [۱۲] و استفاده از ابزار RT-BSWT مشکل آن را در تشخیص خطای داخلی همراه با جریان هجومی حل کرده و عملکرد قابل قبولی را در این زمینه ارائه داده است. سرعت تشخیص در این مراجع یک سیکل می‌باشد و فرکانس نمونه‌برداری ۱۵/۳۶ کیلوهرتز، که مقدار بالایی است. همچنین، شرایط اضافه تحریک و جریان هجومی بازبایی بررسی نشده است.

همان‌طور که اشاره شد، یکی دیگر از روش‌های تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی در این دسته‌بندی استفاده از تبدیل S است. تبدیل S یکی دیگر از روش‌های تحلیل در حوزه فرکانس و زمان است که الگوریتمی نزدیک به الگوریتم تبدیل موجک دارد. با این حال اگرچه تبدیل S نسبت به تبدیل موجک در مقابل نویز مقاوم‌تر است، اما همچنان محاسبات سنگینی دارد [۱۱] و [۱۵].

در مقاله [۳۳]، از تبدیل S هذلولی^۲ برای تشخیص اغتشاشات استفاده شده است. در این روش در مرحله اول حفاظت دیفرانسیل درصدی، وقوع اغتشاش را تشخیص می‌دهد و در مرحله بعد تبدیل S هذلولی بر جریان دیفرانسیل اعمال می‌شود. سپس بر اساس قدر مطلق ضرایب به دست آمده، جریان هجومی از خطای داخلی تفکیک می‌گردد. از ویژگی‌های این مقاله می‌توان به در نظر گرفتن خطاهای سیم‌پیچ و بررسی اثر نویز اشاره کرد که نتایج عملکرد بهتری را نسبت به روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک نشان می‌دهد. سرعت تشخیص خطا در این مقاله مشخص نشده، همچنین شرایط اضافه تحریک و جریان هجومی بازبایی مورد مطالعه قرار

¹ Boundary discrete wavelet transform

² Hyperbolic

نگرفته است.

مرجع [۸] تبدیل زمان-زمان را برای تشخیص اغتشاشات پیشنهاد داده است. در این روش در ابتدا اغتشاشات داخلی و خارجی توسط حفاظت دیفرانسیل درصدی تشخیص داده می‌شود. در صورتی که اغتشاش رخ داده در خارج از ناحیه حفاظتی باشد، حفاظت دیفرانسیل عملکردی نخواهد داشت. اما چنانچه اغتشاش پیش آمده در داخل ناحیه حفاظتی تشخیص داده شود، از تبدیل زمان-زمان بر روی جریان دیفرانسیل برای تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی استفاده می‌شود. سرعت تشخیص در این مرجع اعلام نشده است و انواع اغتشاشات خطای سیم‌پیچ، جریان هجومی بازیابی و اضافه تحریک بررسی نشده است.

تبدیل چرپلت تبدیلی برای تخمین فرکانس و طبقه‌بندی شکل موج‌های سینوسی است که یک سیگنال یک بعدی را به یک تابع چهار بعدی زمان^۱، مقیاس^۲، نرخ چرپ در فرکانس^۳ و نرخ چرپ در زمان^۴ تبدیل می‌کند. در روش پیشنهادی مرجع [۳۴]، در ابتدا جریان‌های اولیه و ثانویه توسط CTها اندازه‌گیری می‌شود، سپس جریان دیفرانسیل و متوسط جریان عبوری محاسبه می‌شوند و بر اساس این دو جریان حالت عملکردی به سه ناحیه بازدارنده، عملکرد و ناحیه آسیب‌پذیر تقسیم می‌شود. در صورتی که شرایط رخ داده در ناحیه بازدارنده باشد به معنای حالت کارکرد عادی است و از عملکرد حفاظت جلوگیری می‌شود. اما با ورود به ناحیه عملکرد، با تشخیص خطای داخلی باید دستور قطع ارسال شود. اگر شرایط رخ داده در ناحیه آسیب‌پذیر باشد، تبدیل چرپلت به جریان‌های اندازه گرفته شده اعمال می‌شود تا جریان خطا از جریان هجومی تشخیص داده شود. در این روش با استفاده از میانگین و انحراف معیار خروجی‌های تبدیل چرپلت و انتخاب آستانه مناسب، جریان هجومی تشخیص داده می‌شود. سرعت تشخیص این روش سه چهارم سیکل اعلام شده، اما اکثر اغتشاشات پیچیده و اثر نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان مورد مطالعه قرار نگرفته است.

۳-۵- روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و مقایسه

روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و مقایسه بر مدل ترانسفورماتور قدرت تکیه دارند. این روش‌ها بیشتر به

¹ Time

² Scaling

³ Chirping in frequency

⁴ Chirping in time

معادلات و روابط حاکم بر مدل‌های ترانسفورماتور قدرت توجه دارند تا به دنبال ویژگی‌ها در سیگنال‌های جریان و ولتاژ باشند. به طور کلی، در این گونه از روش‌ها، مدلی برای ترانسفورماتور قدرت در نظر گرفته می‌شود، سپس برای تشخیص خطاهای داخلی، سیگنال شبیه‌سازی شده با سیگنال اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. در حالت عادی، سیگنال شبیه‌سازی با سیگنال اندازه‌گیری شده برابر است. وجود تفاوت بین این دو سیگنال، نشان‌دهنده عدم کارکرد درست ترانسفورماتور قدرت است.

در مرجع [۵] پس از مدل‌سازی ترانسفورماتور قدرت، هم‌زمان با دریافت سیگنال‌های ولتاژ از اولیه و ثانویه، مقادیر شبیه‌سازی ولتاژ با استفاده از مدل ترانسفورماتور قدرت محاسبه می‌شود. سپس مقادیر نظری و واقعی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. چنانچه اختلاف بین این مقادیر از آستانه از پیش تعیین شده فراتر رود، نشان‌دهنده خطای داخلی خواهد بود. مدل ارائه شده در این پژوهش به امیدانس‌های توالی مثبت، منفی، صفر، نسبت تبدیل و داده‌های ولتاژ هر دو سمت ترانسفورماتور قدرت نیاز دارد. طبق نتایج، سرعت تشخیص در این روش پنج چهارم سیکل است و اکثر اغتشاشات مانند جریان هجومی بازبایی، اضافه تحریک و خطای سیم‌پیچ و همچنین، اثر نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان در نظر گرفته نشده است. مرجع [۳۵]، روشی مشابه با مرجع قبلی برای تشخیص اغتشاشات استفاده کرده با این تفاوت که از تغییرات شار پیوندی به جای سنجش ولتاژی استفاده نموده است. همچنین مراجع [۳۶] و [۳۷] از اندوکتانس نشتی به عنوان سیگنال مقایسه‌کننده استفاده نموده‌اند. در مراجع [۳۵] و [۳۶] خطاهای سیم‌پیچ مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما شرایط جریان هجومی بازبایی، اثر نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان مطالعه نشده است. مطابق با ادعای نویسندگان مرجع [۱۳]، یکی از شرایطی که تشخیص آن برای الگوریتم‌های حفاظتی می‌تواند سخت باشد، وقوع جریان هجومی همراه با خطا در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور قدرت است. در این مقاله از مدل جیلز اترتون^۱ برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی هسته ترانسفورماتور قدرت استفاده شده. سپس بر اساس ضرایب همگرایی سیگنال شبیه‌سازی شده و سیگنال اندازه‌گیری شده برای تشخیص جریان هجومی استفاده نموده است. در این مرجع دقت و سرعت تشخیص مشخص نشده است و همچنین اکثر حالت‌های پیچیده مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. مرجع [۳۸] از

¹ Jiles-Atherton model

مدل سازی هسته آنلاین^۱ و چندجمله‌ای‌های متعامد^۲ برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی هسته ترانسفورماتور قدرت و تشخیص جریان هجومی استفاده کرده است. چندجمله‌ای‌های متعامد دنباله‌هایی نامتناهی متشکل از چندجمله‌ای‌های حقیقی و عمود بر هم هستند. در این روش با استفاده از چندجمله‌ای‌های متعامد، شبه مشخصه مغناطیسی به دست می‌آید که برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی هسته و تحلیل وضعیت سیستم استفاده می‌شود. در روش مذکور، در مرحله اول اختلاف جریان اولیه و ثانویه توسط یک رله اضافه جریان اندازه‌گیری می‌شود، چنانچه این مقدار از آستانه تعیین شده بیشتر شود، شبه مشخصه متناظر از پنجره داده‌های جریان به طول نیم سیکل استخراج می‌شود و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. غیرخطی بودن شبه مشخصه، نشان‌دهنده وقوع اشباع مغناطیسی است و باید از عملکرد حفاظت جلوگیری شود؛ اما در صورت وقوع خطای داخلی، جریان دیفرانسیل با جریان مغناطیس‌کنندگی برابر نیست و در این شرایط به دلیل غلبه جریان خطا بر جریان مغناطیس‌کنندگی و همچنین شکل موج سینوسی، شبه مشخصه به دست آمده به صورت خطی خواهد بود. سرعت تشخیص در این روش به‌طور متوسط ۱۷ میلی‌ثانیه گزارش شده است. با این وجود، در این مقاله خطاهای سیم‌پیچ، جریان هجومی بازیابی، اضافه تحریک و اثر اشباع ترانسفورماتور جریان بررسی نشده است. همچنین، در روش چندجمله‌ای متعامد، پیش‌بینی ضرایب در شرایط ناخواسته دشوار است و نیاز به نمونه‌برداری با فرکانس بالا در باند مرده دارد که از عمده‌ترین محدودیت‌های این روش می‌باشد. در مرجع [۳۹] برای تخمین سیگنال‌های ترانسفورماتور قدرت از فیلتر کالمن استفاده شده است. در این روش نیز مانند روش‌های قبل، با مقایسه سیگنال شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، وضعیت ترانسفورماتور قدرت تشخیص داده می‌شود. چنانچه ترانسفورماتور قدرت در حالت کارکرد عادی یا جریان هجومی باشد، مقدار شبیه‌سازی شده با مقدار اندازه‌گیری شده برابر است و تفاضل این دو سیگنال تقریباً برابر صفر است. درحالی‌که با وقوع خطای داخلی این تعادل بر هم خورده و تفاضل جریان شبیه‌سازی و جریان اندازه‌گیری شده مقداری غیرصفر را نشان می‌دهد. چنانچه این تفاوت بیش از مقدار آستانه مشخص شده باشد، شرایط پیش آمده به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود و رله دستور قطع را صادر می‌کند. از توانمندی‌های این روش، تشخیص خطای داخلی

¹ Online Core Modeling

² Orthogonal Polynomials

از جریان هجومی در یک چهارم سیکل و همچنین مقاوم بودن در برابر نویز است. با این حال خطای سیم‌پیچ، شرایط اضافه تحریک و جریان هجومی بازیابی در این مقاله بررسی نشده است. از مشکلات این روش، نیاز به مدل دقیق ترانسفورماتور قدرت می‌باشد و برای هر ترانسفورماتور تنظیمات به صورت کلی تغییر می‌کند و مجدداً باید تغییرات اعمال شوند و همچنین دقت الگوریتم بسیار وابسته به انتخاب مقادیر آستانه است؛ که در صورت انتخاب مقدار نامناسب، ممکن است رله درست عمل نکند یا زمان عملکرد طولانی شود. [۴۰]

از روشی مبتنی بر تابع همبستگی^۱ برای تشخیص جریان خطا از جریان هجومی استفاده نموده است. مطابق با روش ارائه شده، ضریب همبستگی جریان‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده محاسبه می‌شود. در صورتی که مقادیر ضریب همبستگی از مقدار آستانه بیشتر باشد، نشان‌دهنده خطای داخلی است. سرعت تشخیص در این روش در حدود یک سیکل می‌باشد. اما، شرایطی مانند خطای سیم‌پیچ، جریان هجومی بازیابی و اثر نویز مورد مطالعه قرار نگرفته است.

به‌طور کلی می‌توان در مورد روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی به این نکته توجه کرد که برای حاصل شدن دقت کافی در تصمیم‌گیری، به اطلاعات دقیقی از ترانسفورماتور قدرت و منحنی مغناطیسی نیاز است. همچنین در صورت پیاده‌سازی آن بر روی یک ترانسفورماتور دیگر، نیاز به مدل‌سازی مجدد می‌باشد [۱۶].

۳-۶- روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری ولتاژ و شار

در این بخش مقالاتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که با توجه به نوع تحلیل ولتاژی، توانی یا تحلیل بر اساس شار مغناطیسی، نیاز به اندازه‌گیری ولتاژ ترانسفورماتور قدرت دارند.

از جمله مقالاتی که از اطلاعات ولتاژ ترانسفورماتور قدرت در حفاظت دیفرانسیل استفاده نموده مرجع [۶] است. در این مقاله علاوه بر جریان دیفرانسیل، از بررسی ولتاژ دو طرف اولیه و ثانویه ترانسفورماتور برای تشخیص خطا استفاده شده است. در ابتدا اغتشاشات داخلی و خارجی توسط منطق حفاظت دیفرانسیل درصدی از یکدیگر تفکیک می‌شوند. سپس در صورت تشخیص اغتشاش در داخل ناحیه حفاظتی معیاری به نام نرخ جریان به صورت رابطه (۳-۱) تعریف می‌شود.

¹ Correlation

$$\varepsilon = \left| |I_1| - |I_2| \right| / (|I_1| + |I_2|) \quad (۱-۳)$$

که در آن $|I_1|$ و $|I_2|$ به ترتیب اندازه مؤلفه اصلی و پریونیت شده جریان سمت اولیه و ثانویه هستند. در شرایط کار عادی ترانسفورماتور چون جریان‌های پریونیت اولیه و ثانویه برابر می‌باشند، بنابراین معیار نرخ جریان مقدار تقریبی صفر دارد؛ اما در هنگام وقوع جریان هجومی، مقدار این معیار بزرگتر از ۰/۹ و بسیار نزدیک به یک است. همچنین در صورت وقوع خطاهای داخلی یا خارجی با توجه به نسبت جریان‌ها، مقدار نرخ جریان بیش از صفر و کمتر از ۰/۹ می‌باشد. در صورتی که معیار ε مقداری بین صفر و ۰/۹ باشد، اختلاف زاویه جریان اولیه و ثانویه محاسبه می‌شود. بر اساس اختلاف زاویه به دست آمده، چنانچه جریان‌ها همسو باشد، خطای خارجی رخ داده است و حفاظت عملکردی نخواهد داشت. چنانچه جریان‌ها در جهت مخالف باشد خطای داخلی رخ داده و این حفاظت دستور قطع را برای کلیدهای فشارقوی ارسال می‌کند. اما در صورتی که معیار ε بیش از ۰/۹ باشد برای تشخیص شرایط جریان هجومی از جریان هجومی به همراه خطای داخلی معیار دیگری به نام نرخ ولتاژ تصمیم‌گیری به صورت رابطه (۲-۳) استفاده می‌شود.

$$\lambda = \left| |V_1| - |V_2| \right| / (|V_1| + |V_2|) \quad (۲-۳)$$

معیار نرخ ولتاژ با توجه به اندازه‌گیری ولتاژ دو سمت ترانسفورماتور قدرت محاسبه می‌شود. در حالت عادی چون ولتاژ دو سمت ترانسفورماتور برابر یک پریونیت است، این معیار تقریباً برابر با صفر خواهد بود. در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت نیز ولتاژ هر دو سمت ترانسفورماتور قدرت برابر یک پریونیت می‌باشد، لذا در این شرایط نیز معیار مذکور مقداری برابر با صفر دارد و جریان هجومی تشخیص داده می‌شود؛ اما در هنگام وقوع خطا به دلیل افت ولتاژ، معیار λ مقداری غیر صفر خواهد داشت و شرایط خطا تشخیص داده می‌شود. سرعت این روش تقریباً نیم سیکل گزارش شده، اما با توجه به استفاده از تبدیل فوریه گسسته تمام سیکل برای محاسبه مؤلفه اصلی جریان‌های اندازه‌گیری شده، این الگوریتم برای تشخیص خطا در صورت وقوع خطا در لحظه صفر، بیش از یک سیکل زمان نیاز دارد. در این مقاله، شرایطی مانند اضافه تحریک، جریان هجومی بازیابی و اثر نویز بررسی نشده است.

برخی از مقالات با این استدلال که توان تلف شده یا جذب شده در ترانسفورماتور قدرت در شرایط جریان هجومی و شرایط وقوع خطای داخلی متفاوت است، روش‌هایی برای تشخیص جریان هجومی ارائه داده‌اند. در

واقع توان اندازه‌گیری شده در هنگام وقوع خطای داخلی بسیار بیشتر از هنگامی است که جریان هجومی رخ می‌دهد. بدیهی است که در این روش‌ها به منظور محاسبه توان علاوه بر اندازه‌گیری جریان اولیه و ثانویه، به اندازه‌گیری ولتاژهای متناظر نیز نیاز هست. در ادامه برخی از این پژوهش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. مرجع [۴۱] توان لحظه‌ای هر دو سمت ترانسفورماتور قدرت را اندازه‌گیری می‌کند. سپس متوسط اختلاف توان اولیه و ثانویه در یک سیکل محاسبه می‌شود. چنانچه این مقدار از آستانه از پیش تعیین شده بیشتر باشد، رله تشخیص خطای داخلی می‌دهد. مدت زمان تشخیص در این روش در حدود ۴ سیکل می‌باشد که در مقایسه با سایر روش‌ها زمان زیادی است. در یک راه‌حل مشابه، مرجع [۴۲] متوسط توان جذب شده یک سمت ترانسفورماتور قدرت را اندازه‌گیری می‌کند و مشابه روش قبلی برای تشخیص خطای داخلی، توان متوسط به دست آمده با مقدار آستانه مقایسه می‌شود. سرعت روش پیشنهادی شده یک سیکل است. در مراجع [۴۱] و [۴۲] انواع اغتشاشات پیچیده و اثر نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان در نظر گرفته نشده است.

مرجع [۴۳] به جای تصمیم‌گیری بر اساس تلفات توان، از معیاری بر اساس تغییرات فرکانس لحظه‌ای استفاده کرده است. در این روش توان دیفرانسیل، از حاصل ضرب جریان دیفرانسیل در ولتاژ القایی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از تبدیل هیلبرت^۱ فرکانس لحظه‌ای محاسبه می‌شود. چنانچه این فرکانس لحظه‌ای بیش از حد آستانه باشد، به عنوان وقوع جریان هجومی در نظر گرفته می‌شود. زمان عملکرد این روش در حدود یک چهارم سیکل گزارش شده است. اثر نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان در این مطالعه در نظر گرفته شده است، اما شرایطی مانند جریان هجومی بازیابی و اضافه تحریک بررسی نشده‌اند.

مرجع [۴۴] با اندازه‌گیری مقادیر ولتاژ و جریان و استفاده از الگوریتم شار سریع^۲، شار مغناطیسی را محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از تغییرات شار مغناطیسی هسته ترانسفورماتور قدرت، حالت اشباع هسته تشخیص داده می‌شود. سرعت روش ارائه شده یک سیکل می‌باشد، اما بیشتر اغتشاشات پیچیده، اثر نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان بررسی نشده است.

به طور کلی در روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ، علاوه بر ترانسفورماتورهای جریان، به دستگاه‌های اندازه‌گیری

¹ Hilbert transform

² Fast flux

ولتاژ القایی یا ولتاژ خازنی نیز نیاز است. این موضوع سبب افزایش هزینه سیستم حفاظتی و افزایش احتمال میزان خرابی سیستم می‌شود. همچنین در روش اندازه‌گیری شار، تخمین اشتباه شار اولیه و خطا در اندازه‌گیری شار منجر به کاهش دقت حفاظت دیفرانسیل می‌شود [۱۵].

۳-۷- سایر روش‌های ابتکاری

مراجع [۷]، [۴۵] و [۱۵] از روش مورفولوژی ریاضی^۱ برای تشخیص خطای داخلی و جریان هجومی استفاده کرده‌اند. مرجع [۷] دو عملکرد مورفولوژی ریاضی را ترکیب کرده است و سیگنال جدیدی برای هر یک از جریان‌های دیفرانسیل تولید کرده است. با بررسی این سیگنال‌ها، رخداد گذراهای ناگهانی تشخیص داده شده و شمارش می‌گردد. در صورتی که تعداد گذرهای رخ داده در یک و نیم سیکل بیش از دو مورد باشد، الگوریتم تشخیص جریان هجومی خواهد داد. طبق نتایج مقاله، روش پیشنهادی مقاومت خوبی در مقابل نویز و اشباع ترانسفورماتورهای جریان دارد. همچنین در این مرجع، سرعت تشخیص خطا مشخص نشده و شرایط جریان هجومی بازیابی و اضافه جریان مورد بررسی قرار نگرفته است. در مقاله [۴۵] با استفاده از مورفولوژی ریاضی، معیار جدیدی به صورت، نسبت انرژی سیگنال جریان دیفرانسیل به انرژی طیفی برای تشخیص جریان هجومی پیشنهاد شده است. در صورتی که این معیار از مقدار آستانه فراتر رود، بیانگر آن است که جریان هجومی رخ داده است. زمان عملکرد این روش بین ۱۵ تا ۲۰ میلی‌ثانیه گزارش شده است. مرجع [۱۵] از روشی مشابه با مقاله قبلی استفاده کرده و علاوه بر آن عملکرد الگوریتم را برای شرایط اشباع CT توسعه داده است، اما دقت تشخیص این روش کمتر از ۸۰٪ می‌باشد. در یک نگاه کلی، در روش‌های مورفولوژی، عملکرد رله به مقادیر آستانه بسیار حساس است. در حقیقت، یافتن مقدار مناسب برای مقادیر آستانه در این روش برای حالت‌های مختلف کاری دشوار است [۵۰].

مرجع [۴۶] از سنجش تغییرات جریان دیفرانسیل، به عنوان معیار شناسایی استفاده نموده است. مطابق با نتایج این مقاله، تغییرات دامنه مؤلفه جریان دیفرانسیل در هنگام وقوع جریان هجومی بیشتر از زمان وقوع خطای داخلی است. در حالی که، می‌توان دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل را در هنگام خطای داخلی، ثابت

¹ Mathematical Morphology

دانست؛ بنابراین میزان تغییرات دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل به عنوان معیاری برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی بکار گرفته شده است. چنانچه معیار محاسبه شده از مقدار مشخصی فراتر رود به معنای وقوع جریان هجومی است و عملکرد حفاظت دیفرانسیل بلاک خواهد شد. مدت زمان عملکرد این روش در حدود یک سیکل است. از مزایای این مقاله بررسی خطای سیم‌پیچ و خطای سیم‌پیچ همراه با جریان می‌باشد، اما اثر نویز، اشباع ترانسفورماتور جریان، شرایط جریان هجومی بازیابی و اضافه تحریک مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در مرجع [۱۶] از نسبت توالی مثبت و منفی برای شناسایی شرایط مختلف کارکرد ترانسفورماتور قدرت استفاده شد. از نقاط قوت این مقاله، عملکرد بهتر آن نسبت به روش هارمونیک در تشخیص خطاهای حلقه است. همچنین برای تشخیص شرایط اضافه تحریک از راهکار جداگانه‌ای بهره گرفته شده که این راهکار با توجه به مقادیر حداکثر و حداقل توالی‌های مثبت و منفی در یک بازه ۵ میلی ثانیه عمل می‌کند. مشکل این روش، عدم تشخیص خطاهای سه‌فاز و سه‌فاز به زمین به دلیل مقدار کم توالی منفی در این خطاها است.

همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، جریان هجومی دارای قسمتی‌هایی با اندازه صفر است که به آن زاویه مرده گفته می‌شود. مرجع [۴۷] روشی را برای تشخیص جریان هجومی براساس این خاصیت شکل موج زاویه مرده پیشنهاد داده است. در این روش، با اندازه‌گیری زمان صفر بودن جریان دیفرانسیل در یک سیکل، جریان هجومی تشخیص داده می‌شود. بنابراین زمان تشخیص در این روش یک سیکل است. همچنین مراجع [۴۸] و [۴۹] از روشی مشابه مرجع قبل استفاده کرده‌اند با این تفاوت که از یک معیار دیگر بر اساس فاصله زمانی بین دو اکسترمم متوالی، برای تشخیص شرایط جریان هجومی کمک گرفته‌اند. مطابق با روش بیان شده، چنانچه فاصله بین دو اکسترمم متوالی کمتر از مقدار مشخصی باشد، به عنوان شرایط جریان هجومی شناخته می‌شود و از عملکرد حفاظت دیفرانسیل جلوگیری می‌شود. سرعت تشخیص در این روش‌ها نیز یک سیکل است. با توجه به اینکه در صورت وجود شار پسماند در ترانسفورماتور قدرت، طول زاویه مرده کاهش می‌یابد و یا در صورت اشباع CT اندازه زاویه مرده تغییر می‌کند؛ بنابراین چنین شرایطی می‌توان عملکرد این روش‌ها را دچار مشکل کند.

۳-۸- جمع‌بندی مطالعات انجام شده

جدول (۱-۳) به منظور مقایسه بهتر و جمع‌بندی مقالات بررسی شده، ارائه شده است. در این جدول خلاصه‌ای از ویژگی‌های مهم مانند، سرعت، دقت و طول پنجره نمونه‌برداری، و انواع حالت‌های در نظر گرفته شده در ارزیابی روش‌های مطالعه شده، ارائه شده است.

جدول (۱-۳) ویژگی‌ها و انواع اغتشاشات بررسی شده در روش‌های پیشنهادی مقالات بررسی شده

شماره مرجع	ویژگی‌های روش				حالت‌های در نظر گرفته شده										
	سرعت الگوریتم (سیکل)	فرکانس نمونه‌برداری (kHz)	دقت الگوریتم (/)	پنجره نمونه‌برداری (سیکل)	بار	خطای داخلی	خطای خارجی	جریان هجومی	جریان هجومی همراه با خطا	خطای سیم‌پیچ	جریان هجومی بازیابی	اضافه تحریک	اشباع CT	خطای سیم‌پیچ و جریان هجومی	نویز
[۳]		۴/۲			*	*		*		*					*
[۴]	۱	۲			*	*	*	*	*	*			*		
[۵]	۰/۷۵	۹۹/۵				*		*							
[۶]	۱/۲۵	۱/۲		۱	*	*		*	*	*					
[۷]	۱	۱/۹۲		۱	*	*		*		*		*			
[۹]	۰/۵					*	*	*	*	*					
[۱۰]	۱	۲۰		۰/۱۶		*	*	*		*					
[۱۱]						*		*		*				*	
[۱۲]	۰/۷۵	۵	۹۷	۰/۵	*	*	*	*	*	*				*	
[۱۳]	۰/۲۵	۱۰	۹۵/۵			*	*	*	*	*			*	*	
[۱۴]	۱	۲۰		۰/۱۶	*	*	*	*	*	*		*	*		
[۱۵]	۰/۵	۲		۱		*	*	*	*	*		*	*	*	
[۱۶]	۰/۷۵	۱			*	*	*	*	*	*		*	*	*	
[۱۷]	۴	۱۰		۱		*		*		*					
[۱۸]	۰/۵	۱		۰/۸		*		*		*					
[۱۹]			۹۸/۴۴			*	*	*	*	*		*	*		
[۲۰]	۱			۱		*		*		*					
[۲۱]		۰/۷۲		۱		*		*		*					
[۲۲]	۰/۲۵	۶			*	*	*	*	*	*			*	*	
[۲۳]	۰/۷۵	۱/۶			*	*	*	*	*	*			*		
[۲۴]	۱			۱	*	*		*	*	*					

ادامه جدول (۱-۳)

حالت‌های در نظر گرفته شده											ویژگی‌های روش				شماره مرجع
نویز	خطای سیم‌پیچ و جریان هجومی	اشباع CT	اضافه تحریک	جریان هجومی بازتابی	خطای سیم‌پیچ	جریان هجومی همراه با خطا	جریان هجومی	خطای خارجی	خطای داخلی	بار	پنجره نمونه برداری (سیکل)	دقت الگوریتم (/)	فرکانس نمونه برداری (kHz)	سرعت الگوریتم (سیکل)	
*		*			*	*	*	*	*		۰/۵		۵		[۲۵]
*					*	*	*		*		۰/۲۵		۵	۱	[۲۶]
						*	*		*		۱				[۲۷]
*		*				*	*	*	*		۱	۷۹/۵	۴	۱	[۲۸]
	*				*		*		*					۱	[۲۹]
		*	*	*	*		*	*	*	*	۱		۴	۰/۲۵	[۳۰]
						*	*		*				۰/۹۶	۰/۵	[۳۱]
		*			*		*	*	*				۱/۲	۱	[۳۲]
			*				*	*	*		۱		۲/۴	۱	[۳۳]
		*	*				*	*	*		۱		۲/۴	۱	[۳۴]
		*	*				*	*	*				۰/۹۶	۰/۵	[۳۶]
*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	۱	۹۹	۴		[۳۸]
							*		*	*			۱۰		[۴۰]
		*			*		*	*	*		۱	۹۹	۲۵		[۴۴]
		*					*	*	*	*			۱۰	۰/۲۵	[۴۵]
*		*			*		*	*	*			۹۸/۵	۱۵/۳۶	۱	[۴۶]
	*	*			*		*	*	*	*		۹۳/۰۷	۱۵/۳۶	۱	[۴۷]
*	*	*			*	*	*	*	*	*	۱	۹۸/۶۴	۵		[۴۸]
*		*				*	*	*	*	*	۲		۵		[۴۹]

فصل چهارم

روش پیشنهادی برای
تشخیص انواع اغتشاشات
مبتنی بر الگوریتم جداسازی
انرژی زمان-گسسته

۴-۱- مقدمه

در این مطالعه از الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته^۱ برای تشخیص اغتشاشات مرتبط با حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت و بهبود عملکرد این حفاظت استفاده می‌شود. اخیراً در پژوهش‌های علمی زیادی از این الگوریتم برای تحلیل سیگنال‌ها استفاده شده است [۵۱-۵۵]. این الگوریتم می‌تواند فرکانس لحظه‌ای^۲ سیگنال را تخمین بزند [۱۸] و به دلیل پنجره نمونه‌برداری کوچک، سرعت بالایی در تحلیل سیگنال‌ها در حوزه زمان دارد [۱۷]. در این فصل، در ابتدا الگوریتم مذکور و نحوه استخراج فرکانس لحظه‌ای سیگنال به‌وسیله آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس روش پیشنهادی برای تشخیص انواع اغتشاشات تشریح می‌گردد و کارایی روش پیشنهادی در ارتباط با هر یک از انواع اغتشاشات با جزئیات بررسی می‌شود.

۴-۲- الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته

به منظور تفهیم بهتر، ابتدا الگوریتم جداسازی انرژی برای حالت زمان-پیوسته توضیح داده می‌شود و سپس برای حالت زمان-گسسته بسط داده می‌شود. الگوریتم جداسازی انرژی از یک اپراتور غیرخطی به نام اپراتور انرژی تیگر-کیسیر^۳ برای تخمین فرکانس لحظه‌ای استفاده می‌کند. این اپراتور برای حالت زمان-پیوسته به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Psi(x(t)) \triangleq \dot{x}^2(t) - x(t)\ddot{x}(t) \quad (1-4)$$

که در این رابطه $\dot{x}(t)$ و $\ddot{x}(t)$ به ترتیب مشتقات مرتبه اول و دوم $x(t)$ می‌باشند. به منظور درک بیشتر مفهوم انرژی، فرض می‌شود، یک نوسانگر بدون اصطکاک با جرم m و سختی فنر k در حال نوسان باشد؛ بنابراین معادله حرکت این سیستم مطابق با رابطه (۲-۴) می‌باشد.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (2-4)$$

که جواب این معادله دیفرانسیل به صورت زیر است.

$$x(t) = A \cos(\omega t + \theta) \quad (3-4)$$

در رابطه (۳-۴)، A پوش دامنه نوسان، θ فاز اولیه و ω فرکانس زاویه‌ای و برابر با $\sqrt{k/m}$ است؛ بنابراین

¹ Discrete energy separation algorithm

² Instantaneous frequency

³ Teager-Kaiser

انرژی کل سیستم (E) برابر است با مجموع انرژی ذخیره شده در فنر و انرژی جنبشی جسم نوسانگر که به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$E = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mA^2\omega^2 \quad (4-4)$$

همان طور که از رابطه (4-4) مشخص است، انرژی کل با مجذور دامنه نوسان و مجذور فرکانس نوسان رابطه مستقیم دارد. حال اگر انرژی سیگنال (4-3) با استفاده از رابطه (4-1) محاسبه شود، انرژی سیگنال به صورت زیر خواهد بود.

$$\Psi[A\cos(\omega t + \theta)] = (A\omega)^2 \quad (5-4)$$

بنابراین می توان نتیجه گرفته که با استفاده از اپراتور Ψ می توان انرژی سیگنال را (بخش بر نیم جرم¹) محاسبه کرد و تغییرات آن را در هر لحظه دنبال کرد.

• الگوریتم جداسازی انرژی برای سیگنال های زمان-پیوسته

اگر سیگنال کسینوسی $x(t)$ و مشتق آن به ترتیب به صورت روابط (4-6) و (4-7) باشند.

$$x(t) = a\cos(\omega t + \theta) \quad (6-4)$$

$$\dot{x}(t) = a\omega\sin(\omega t + \theta) \quad (7-4)$$

که در روابط فوق، a اندازه دامنه، ω فرکانس زاویه ای و θ مقدار ثابت فاز هستند. انرژی سیگنال $x(t)$ و مشتق آن توسط اپراتور انرژی Ψ به ترتیب با روابط (4-8) و (4-9) محاسبه می شود.

$$\Psi[x(t)] = a^2\omega^2 \quad (8-4)$$

$$\Psi[\dot{x}(t)] = a^2\omega^4 \quad (9-4)$$

با تعریف فرکانس زاویه ای لحظه ای به صورت رابطه (4-10)، که در آن $\varphi(t)$ فاز سیگنال نوسانی بر حسب زمان است؛ می توان فرکانس زاویه ای لحظه ای را با توجه به روابط (4-8) و (4-9) به صورت (4-11) محاسبه کرد [18].

$$\omega(t) \triangleq \frac{d}{dt}\varphi(t) \quad (10-4)$$

$$\omega(t) = \sqrt{\frac{\Psi(\dot{x}(t))}{\Psi(x(t))}} \quad (11-4)$$

¹ Per half-unit mass

در نهایت می‌توان با استفاده از رابطه (۴-۱۲) فرکانس لحظه‌ای (F_I) را برحسب هرتز برای یک سیگنال پیوسته به دست آورد.

$$F_I(t) = \omega(t)/2\pi \quad (۴-۱۲)$$

با توجه به اینکه رله‌های عددی از داده‌های گسسته برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کنند؛ بنابراین الگوریتم جداسازی انرژی برای حالت زمان-گسسته بسط داده می‌شود. بر اساس نوع تخمین مشتق در حالت زمان-گسسته، الگوریتم جداسازی انرژی دارای سه نوع اصلی است که عبارت‌اند از: DESA-1، DESA-1a و DESA-2، که دو نوع اول از تفاضل دو نقطه‌ای استفاده می‌کنند و نوع آخری از تفاضل سه نقطه‌ای متقارن بهره می‌برد. مطابق با مطالعات صورت گرفته مشاهده می‌شود که در بسیاری از موارد DESA-1 و DESA-2 از DESA-1a بهتر می‌باشند، علاوه بر این DESA-1 اندکی برتر از DESA-2 است [۱۸]. بنابراین در این پایان‌نامه از الگوریتم DESA-1 برای تخمین فرکانس لحظه‌ای استفاده شده که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود.

• الگوریتم جداسازی انرژی برای سیگنال‌های زمان-گسسته-۱ (DESA-1)

در صورتی که تفاضل عددی پس‌رو ($z(n)$) و پیش‌رو ($y(n)$) به صورت زیر تعریف شود [۵۶]:

$$z(n-1) = y(n) = \frac{x(n) - x(n-1)}{T} \quad (۴-۱۳)$$

که در این رابطه، T پریود نمونه برداری می‌باشد. با استفاده از تقریب تفاضل دو نقطه‌ای پیش‌رو، می‌توان اپراتور انرژی را در حالت زمان-گسسته به صورت زیر تعریف کرد.

$$\Psi[x(n)] = \frac{x^2(n) - x(n+1)x(n-1)}{T^2} \quad (۴-۱۴)$$

معادل زمان-گسسته سیگنال (۴-۶) را می‌توان به صورت رابطه (۴-۱۵) نشان داد.

$$x(n) = a \cos(\Omega n + \theta) \quad (۴-۱۵)$$

که n شاخص زمان-گسسته و $\Omega = \omega T$ فرکانس زاویه‌ای زمان-گسسته، برحسب رادیان بر نمونه است. با

جایگذاری رابطه (۴-۱۵) در رابطه (۴-۱۴)، انرژی آن به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\Psi[x(n)] = \frac{a^2 \cos^2(\Omega d + \theta) - a^2 \cos(\Omega(n+1) + \theta) \cos(\Omega(n-1) + \theta)}{T^2} \quad (۴-۱۶)$$

با استفاده از تبدیل جمع به ضرب، رابطه مذکور به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\Psi[x(n)] = \frac{a^2 \cos^2(\Omega d + \theta) - \frac{a^2}{2} (\cos^2(2\Omega d + 2\theta) + \cos(2\Omega))}{T^2} \quad (۱۷-۴)$$

حال با توجه به رابطه $(\cos(2a) = \cos^2(a) - \sin^2(a))$ ، رابطه (۱۷-۴) به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\Psi[x(n)] = \frac{a^2 \cos^2(\Omega d + \theta) - \frac{a^2}{2} (\cos^2(\Omega d + \theta) - \sin^2(\Omega d + \theta) + \cos(2\Omega))}{T^2} \quad (۱۸-۴)$$

که پس از ساده‌سازی و استفاده از رابطه $(\cos^2(a) + \sin^2(a) = 1)$ ، رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \Psi[x(n)] &= \frac{\frac{a^2}{2} \cos^2(\Omega d + \theta) + \frac{a^2}{2} \sin^2(\Omega d + \theta) + \frac{a^2}{2} \cos(2\Omega)}{T^2} \\ &= \frac{a^2}{2T^2} - \frac{a^2}{2T^2} \cos(2\Omega) = \frac{a^2}{2T^2} (1 - \cos(2\Omega)) = \frac{a^2}{2T^2} (2 \sin^2(\Omega)) \end{aligned} \quad (۱۹-۴)$$

در نهایت، انرژی سیگنال (۱۵-۴) مطابق رابطه (۲۰-۴) به دست می‌آید.

$$\Psi[x(n)] = \frac{A^2 \sin^2(\Omega n)}{T^2} \quad (۲۰-۴)$$

به همین صورت انرژی $y(n)$ و $z(n)$ به ترتیب به کمک روابط (۲۱-۴) و (۲۲-۴) محاسبه می‌شوند.

$$\Psi[y(n)] = \frac{4A^2}{T^4} \sin^2\left(\frac{\Omega n}{2}\right) \sin^2(\Omega n) \quad (۲۱-۴)$$

$$\Psi[z(n)] = \frac{4A^2}{T^4} \sin^2\left(\frac{\Omega(n+1)}{2}\right) \sin^2(\Omega(n+1)) \quad (۲۲-۴)$$

با میانگین گرفتن از انرژی تفاضل پیش‌رو و پس‌رو به صورت زیر، می‌توان انرژی تفاضل را به صورت متقارن

محاسبه کرد.

$$\text{انرژی تفاضل متقارن} = \frac{\Psi[y(n)] + \Psi[z(n)]}{2} \quad (۲۳-۴)$$

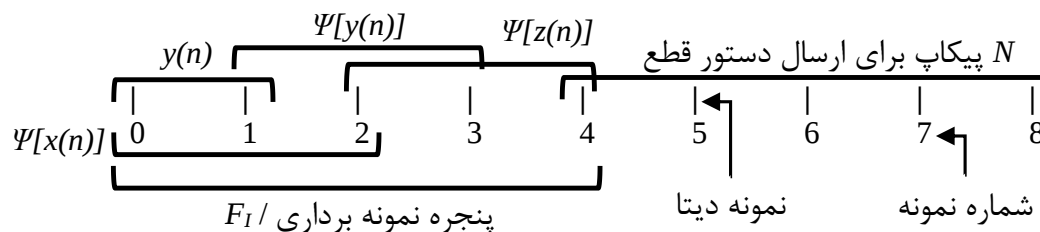
می‌توان اثبات کرد که فرکانس زاویه‌ای لحظه‌ای به صورت رابطه (۲۴-۴) به دست می‌آید [۱۸].

$$\Omega(n) \approx \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Psi[y(n)] + \Psi[z(n)]}{4\Psi[x(n)]/T^2} \right) \quad (۲۴-۴)$$

می‌توان رابطه (۲۴-۴) را بر اساس نمونه‌های سیگنال $x(n)$ به صورت رابطه (۲۵-۴) نوشت.

$$\Omega(n) \approx \cos^{-1} \left(1 - \frac{\begin{aligned} &x(n)x(n-3) - x(n)x(n-2) + x^2(n-1) - x(n-1)x(n-2) \\ &- 2x(n-1)x(n-3) + x(n-1)x(n-4) + 2x^2(n-2) \\ &- x(n-2)x(n-3) - x(n-2)x(n-4) + x^2(n-3) \end{aligned}}{4(x^2(n) - x(n+1)x(n-1))} \right) \quad (۲۵-۴)$$

با توجه به رابطه (۴-۲۵) برای محاسبه فرکانس زاویه لحظه‌ای تنها به ۵ نمونه (n , $n-1$, $n-2$, $n-3$ و $n-4$) از $x(n)$ نیاز است. بنابراین، پنجره نمونه برداری برای تخمین فرکانس لحظه‌ای در این روش ۵ نمونه است. شکل (۴-۱) تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای محاسبه هر قسمت از محاسبات را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱) تعداد نمونه‌های مورد نیاز در محاسبه هر بخش

در نهایت، فرکانس لحظه‌ای را بر حسب هرتز با استفاده از رابطه (۴-۲۶) محاسبه می‌شود.

$$F_I = \Omega / (2\pi T) \quad (۴-۲۶)$$

در استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده در حالت زمان-گسسته باید به نکات زیر توجه داشت.

- باید توجه داشت که در الگوریتم ذکر شده، تغییرات فرکانس باید در محدوده $0 < \Omega_i(n) < \pi$ قرار گیرد و همچنین طبق قضیه نایکوئیست، فرکانس نمونه برداری باید حداقل دو برابر فرکانس سیگنال باشد.

- در مواردی که مقدار انرژی سیگنال یا مشتق آن صفر می‌شود، امکان تخمین فرکانس لحظه‌ای و اندازه پوش سیگنال وجود ندارد. بنابراین، در چنین مواردی اندازه سیگنال برابر صفر ($a(n_0) \approx 0$) و فرکانس لحظه‌ای برابر نمونه قبلی ($\Omega_i(n_0) = \Omega_i(n_0 - 1)$) در نظر گرفته می‌شود.

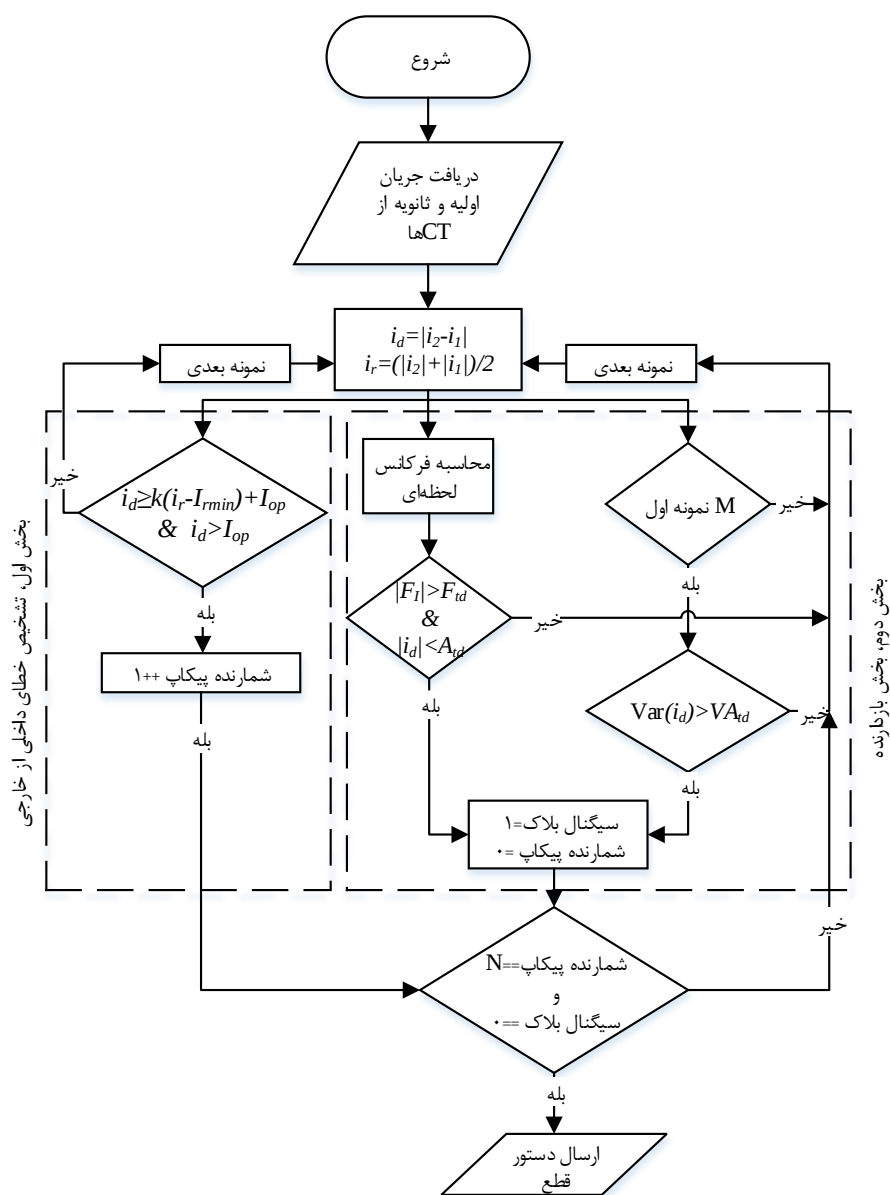
۴-۳- روش پیشنهادی برای بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت

در این بخش برای تمایز جریان هجومی، اضافه تحریک و خطای خارجی از خطاهای داخلی و سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت، روشی بر اساس الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته ارائه می‌شود.

شکل (۴-۲) روندنمای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در ابتدا جریان‌های اولیه (i_1) و ثانویه (i_2) مطابق با شکل (۲-۱) توسط ترانسفورماتورهای جریان اندازه‌گیری می‌شوند، سپس جریان دیفرانسیل (i_d) و جریان بازدارنده (i_r) به ترتیب با کمک روابط (۴-۲۷) و (۴-۲۸) تعریف می‌شوند.

$$i_d = i_2 - i_1 \quad (27-4)$$

$$i_r = (|i_2| + |i_1|)/2 \quad (28-4)$$



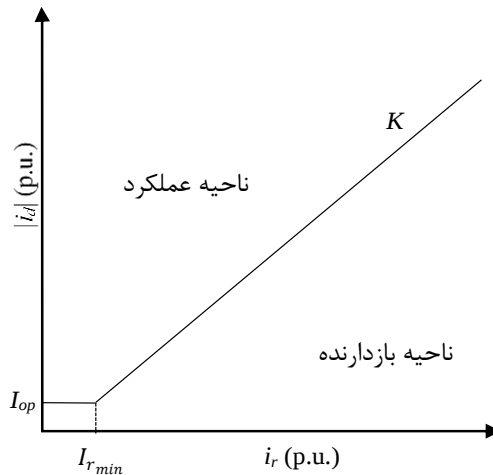
شکل (۲-۴) روندنما روش پیشنهادی برای بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت

مطابق با شکل (۲-۴)، فرآیند تصمیم‌گیری در روش پیشنهادی دارای دو بخش اصلی می‌باشد. بخش اول بر اساس قیود (۲۹-۴) و (۳۰-۴)، اغتشاشات داخلی را از خطای‌های خارجی تفکیک می‌کند. همان‌طور که شکل (۳-۴) نشان می‌دهد، این قیود منحنی مشخصه حفاظت دیفرانسیل را به دو قسمت ناحیه عملکرد و ناحیه بازدارنده تقسیم می‌کند. با افزایش i_d منحنی مشخصه وارد ناحیه عملکرد می‌شود و در پی آن، شمارنده تحریک یک واحد افزایش می‌یابد.

$$|i_d| = K(i_r - I_{r_{min}}) + I_{op} \quad (29-4)$$

$$|i_d| > I_{op} \quad (30-4)$$

در روابط ذکر شده K ، $I_{r_{min}}$ و I_{op} به ترتیب شیب منحنی مشخصه، حداقل مقدار جریان بازدارنده و جریان عملکرد می‌باشند. ضریب K معمولاً عددی بین ۰/۱ تا ۰/۴ است که مقدار کمتر آن، سبب حساسیت بیشتر حفاظت دیفرانسیل می‌شود [۴۷-۴۹].



شکل (۳-۴) منحنی مشخصه عملکرد حفاظت دیفرانسیل

بخش دوم که بخش بازدارنده نامیده می‌شود، شرایط جریان‌های هجومی، جریان هجومی بازیابی و اضافه تحریک را از سایر خطاهای داخلی و سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت تشخیص می‌دهد. این بخش شامل دو زیربخش، اصلی و کمکی می‌شود. زیربخش اصلی بر اساس فرکانس لحظه‌ای جریان دیفرانسیل $(FI(i_d))$ و اندازه جریان دیفرانسیل $(|i_d|)$ عمل می‌نماید و همواره این دو سیگنال را بررسی می‌کند. زیربخش کمکی بر اساس واریانس جریان دیفرانسیل و تنها برای M نمونه اول پس از کیلدزنی ترانسفورماتور قدرت است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی برای شکل موج‌های جریان هجومی (شکل (۹-۴))، جریان هجومی بازیابی شکل (۱۳-۴) و اضافه تحریک (شکل (۱۴-۴))، مشاهده می‌شود که در تخمین فرکانس لحظه‌ای این سیگنال‌ها، چندین اسپایک وجود دارد. این اسپایک‌های به دلیل تغییرات شدید جریان دیفرانسیل در زاویه مرده به وجود می‌آیند. بنابراین از دو معیار، ظاهر شدن اسپایک در تخمین فرکانس لحظه‌ای و اندازه نزدیک به صفر جریان دیفرانسیل، برای تشخیص شرایط جریان هجومی، جریان هجومی بازیابی و اضافه تحریک استفاده

می‌شود. بر اساس این مشاهدات، قیود (۳۱-۴) و (۳۲-۴) تعریف می‌شوند. مطابق با قیدهای ذکر شده، در صورتی که $|F_I|$ بزرگ‌تر از مقدار آستانه F_{td} و به طور هم‌زمان $|i_d|$ کمتر از آستانه I_{td} باشد، روش پیشنهادی یک سیگنال بلاک ارسال می‌کند و از عملکرد حفاظت دیفرانسیل جلوگیری می‌کند.

$$|F_I| > F_{td} \quad (۳۱-۴)$$

$$|i_d| < I_{td} \quad (۳۲-۴)$$

در بررسی‌ها مشاهده می‌شود که، جریان دیفرانسیل در برخی شرایط کلیدزنی ترانسفورماتور قدرت در زوایای خاص (مانند، ۹۰ درجه) همراه با شار پسماند بالا (مانند، ۰.۸٪) و نویز، در چند نمونه اول رفتاری مشابه با برخی از حالت‌های خطای تک‌فاز دارد. بنابراین برای تفکیک این حالت‌ها، از یک معیار کمکی استفاده می‌شود. در این معیار واریانس M نمونه اول جریان دیفرانسیل (i_d) پس از کلیدزنی محاسبه می‌شود. این مقدار در جریان هجومی به دلیل ویژگی زاویه مرده، مقدار کوچک‌تری نسبت به جریان خطا دارد. بنابراین با مقایسه واریانس M نمونه اول جریان دیفرانسیل با مقدار آستانه VA_{td} ، این حالت‌های خاص نیز تفکیک می‌شوند.

$$\text{Var}(i_d(1:M)) > VA_{td} \quad (۳۳-۴)$$

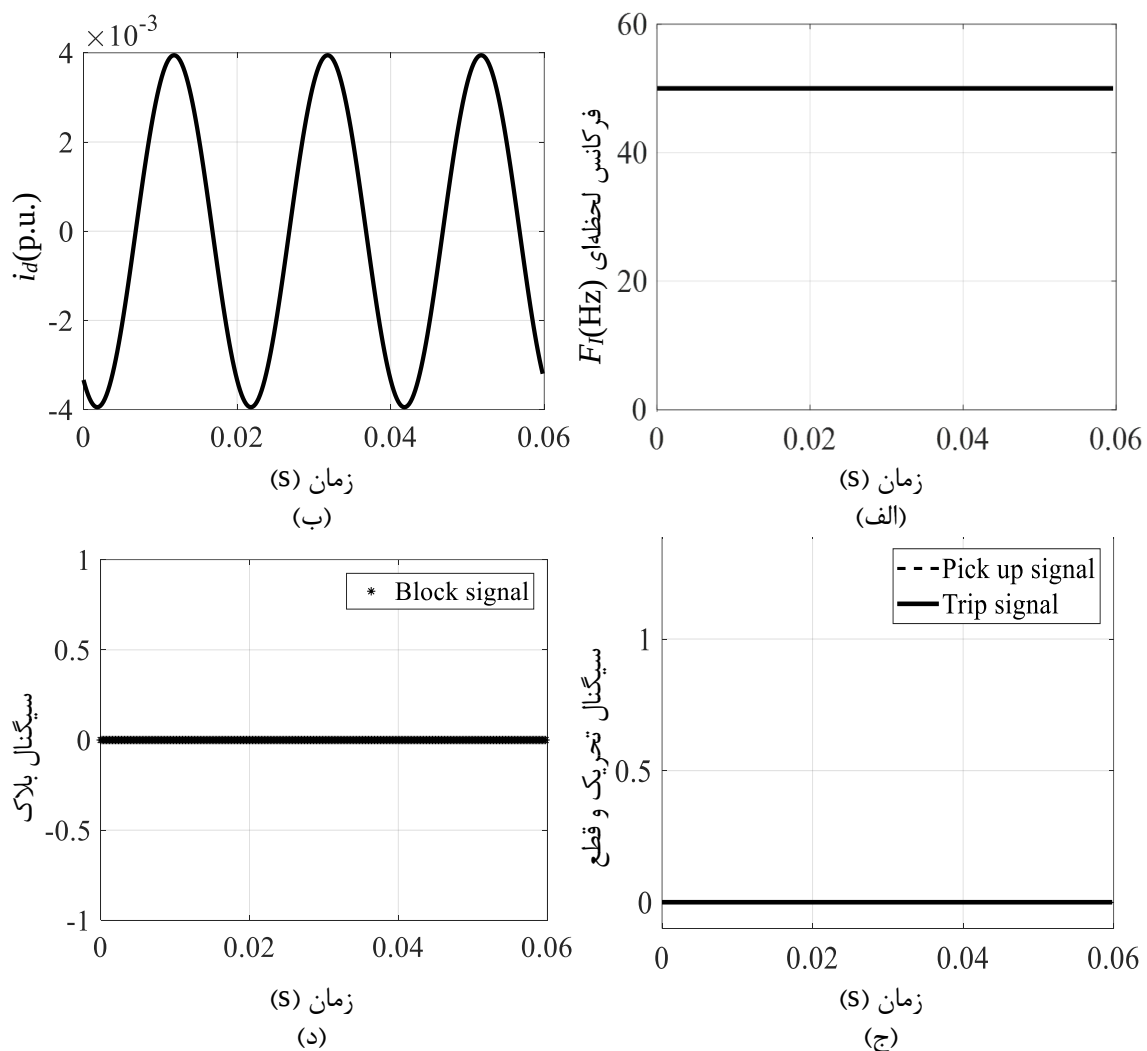
همان‌طور که اشاره شد، اگر بخش اول تشخیص اغتشاش داخلی دهد، شمارنده تحریک یک واحد افزایش می‌یابد. سپس در آخرین بلوک تصمیم‌گیری چنانچه شمارنده تحریک بیش از N باشد و سیگنال بلاک برابر صفر باشد، فرمان قطع به کلیدهای فشارقوی ارسال می‌شود. در غیر این صورت، چنانچه شمارنده تحریک کمتر از N باشد یا سیگنال بلاک برابر ۱ باشد، محاسبات برای نمونه بعدی تکرار می‌شود. مقدار N تحریک، برای ایجاد تأخیر در ارسال سیگنال قطع و جلوگیری از عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در شرایط دیتاهای خراب^۱ است، که باعث می‌شود قابلیت اطمینان روش پیشنهادی افزایش یابد.

۴-۴- بررسی موردی روش پیشنهادی در تشخیص انواع اغتشاشات

به‌منظور درک بهتر نحوه عملکرد الگوریتم، خروجی روش پیشنهادی برای حالت‌های مختلف مورد مطالعه نشان داده می‌شود. انواع حالت‌هایی که برای سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌اند، شامل موارد زیر می‌باشد:

¹ Bad data

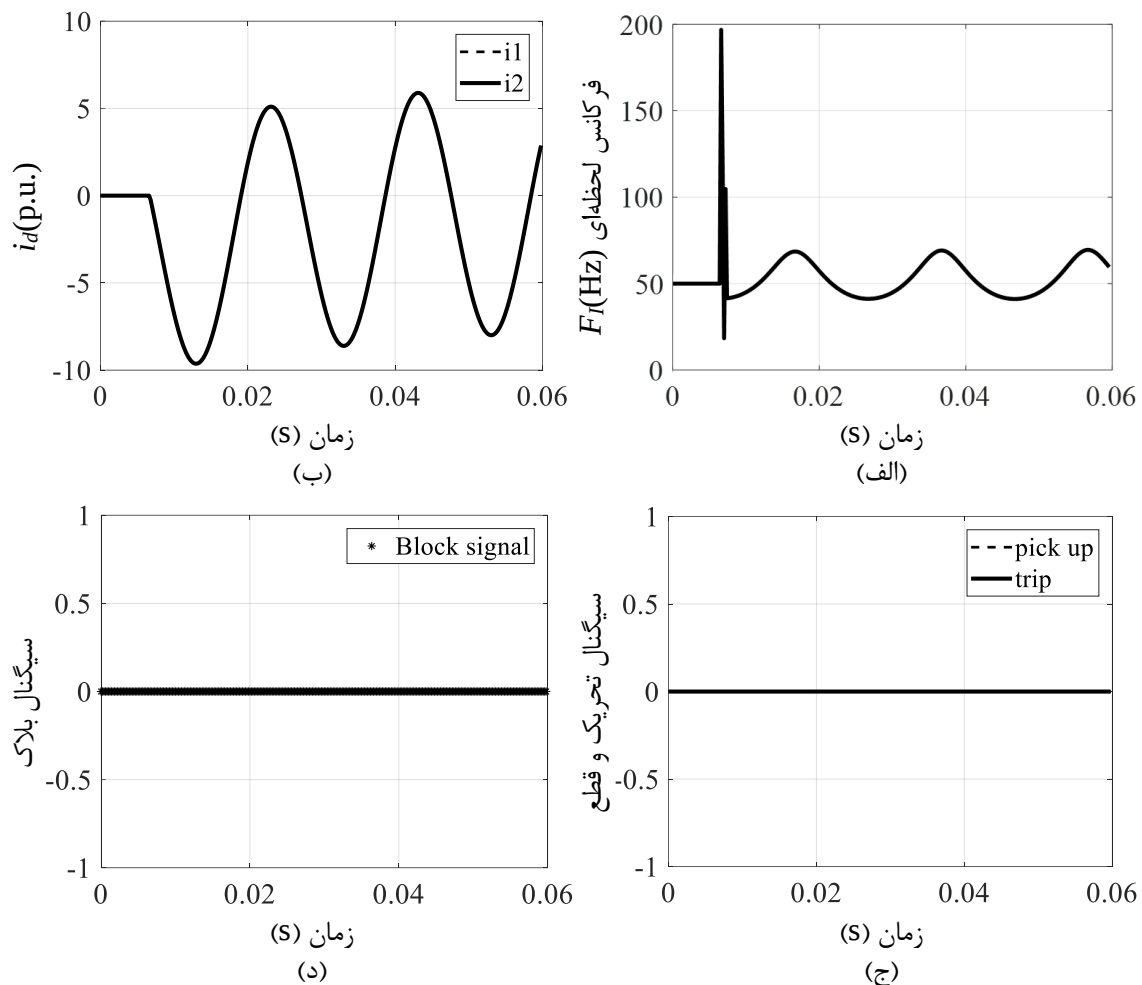
- **حالت نرمال:** در این حالت تمامی جریان‌ها در مقدار نامی خود قرار دارند و جریان دیفرانسیل مقداری نزدیک به صفر دارد؛ بنابراین نباید دستور قطع صادر شود. همان‌طور که در شکل (۴-۴) نشان داده شده، در این حالت فرکانس لحظه‌ای اندازه‌گیری شده متناسب با فرکانس شبکه بوده و دستور بلاکی صادر نمی‌شود.



شکل (۴-۴) عملکرد روش پیشنهادی در حالت نرمال؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع

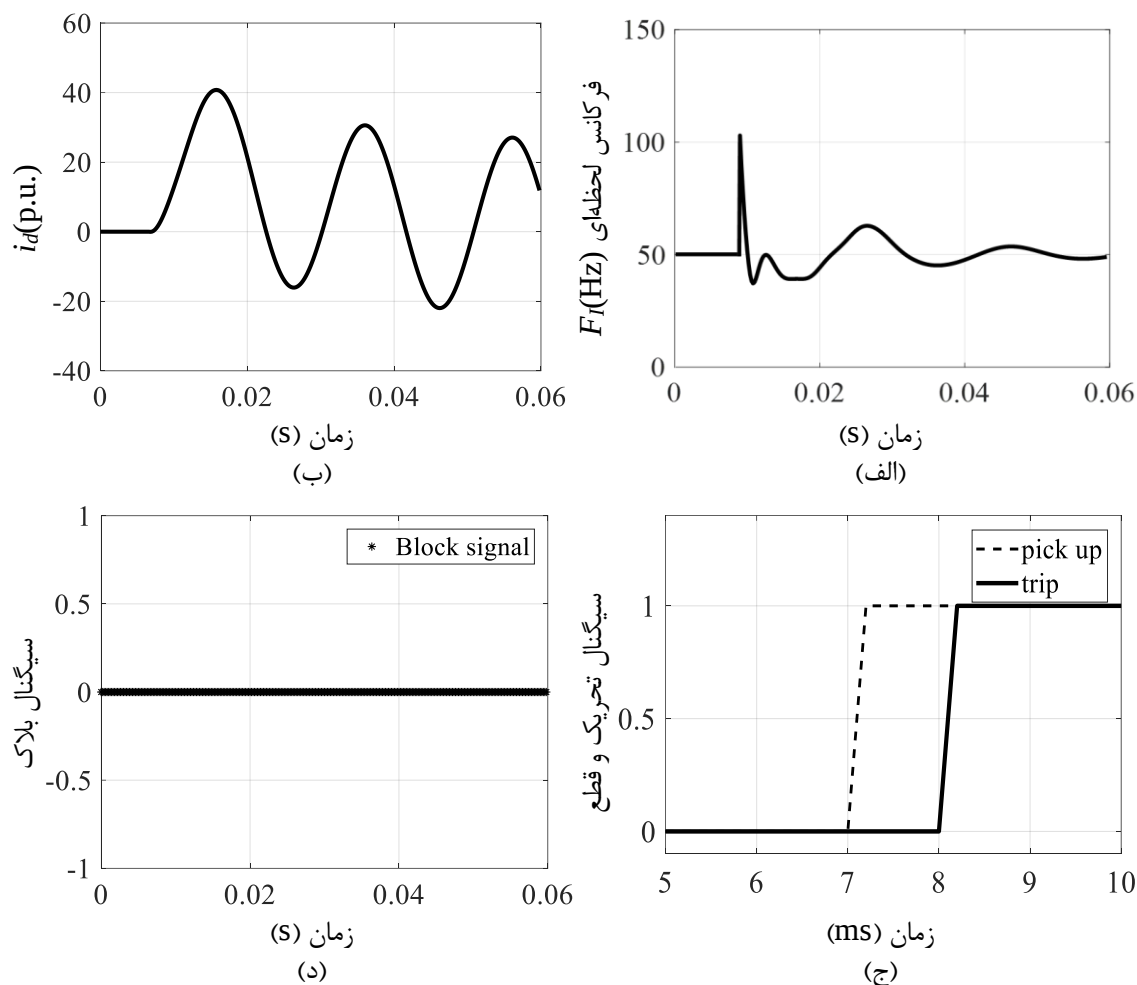
- **خطای خارجی:** در این حالت اگرچه مقدار جریان‌ها افزایش زیادی دارند ولی چون مقدار پریونیت جریان ورودی و خروجی ترانسفورماتور قدرت برابر می‌باشد (بدون اشباع CT)، لذا جریان دیفرانسیل در این حالت نیز مقداری نزدیک به صفر بوده (مطابق شکل (۴-۵)) و دستور تحریک و قطعی از سمت حفاظت دیفرانسیل صادر نمی‌گردد. همچنین فرکانس لحظه‌ای پیرامون فرکانس شبکه نوسان می‌کند، بنابراین سیگنال بلاکی

صادر نمی‌شود.



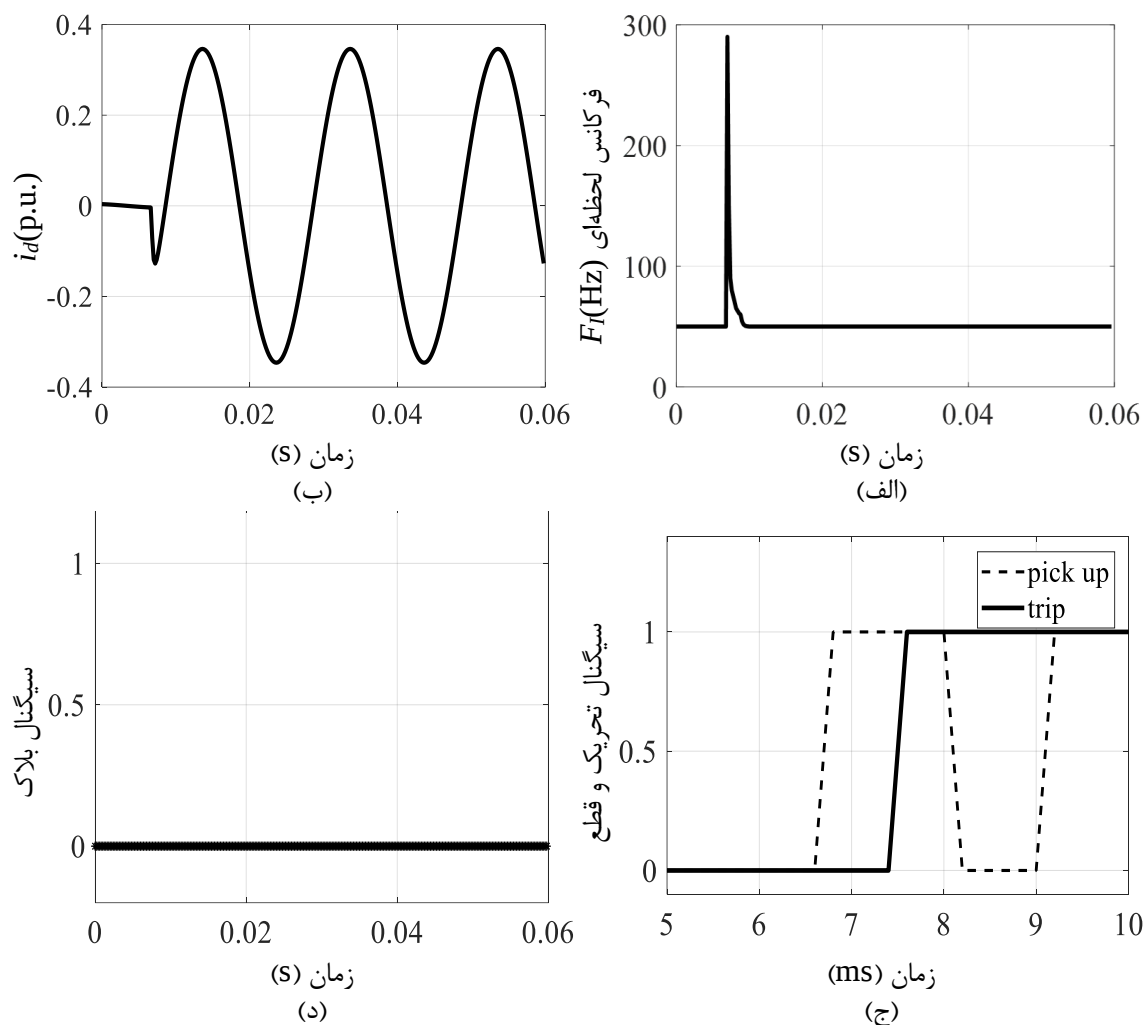
شکل (۴-۵) عملکرد روش پیشنهادی در حالت خطای خارجی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع

- **خطای داخلی:** با وقوع خطا در ترمینال‌های ترانسفورماتور قدرت و بین CT‌های اولیه و ثانویه، تعادل بین جریان اولیه و ثانویه بر هم خورده و جریان دیفرانسیل سبب می‌شود منحنی مشخصه وارد ناحیه عملکرد شود، که در این شرایط حفاظت دیفرانسیل باید دستور قطع را برای کلیدهای فشارقوی صادر کند. در شکل (۴-۶) مشاهده می‌شود که جریان دیفرانسیل اندازه بزرگی برای خطای داخلی دارد و سیگنال تحریک ارسال می‌شود. همچنین فرکانس لحظه‌ای نوسانات کوچک و میرا شونده‌ای پیرامون فرکانس شبکه دارد که سبب می‌شود سیگنال بلاکی ارسال نشود. همچنین واریانس M نمونه اول مقداری بزرگ دارند و زیربخش کمکی، بخش بازدارنده نیز سیگنال بلاکی ارسال نمی‌کند. در نهایت پس از ارسال N سیگنال تحریک، دستور قطع به کلیدهای فشارقوی ارسال می‌شود.



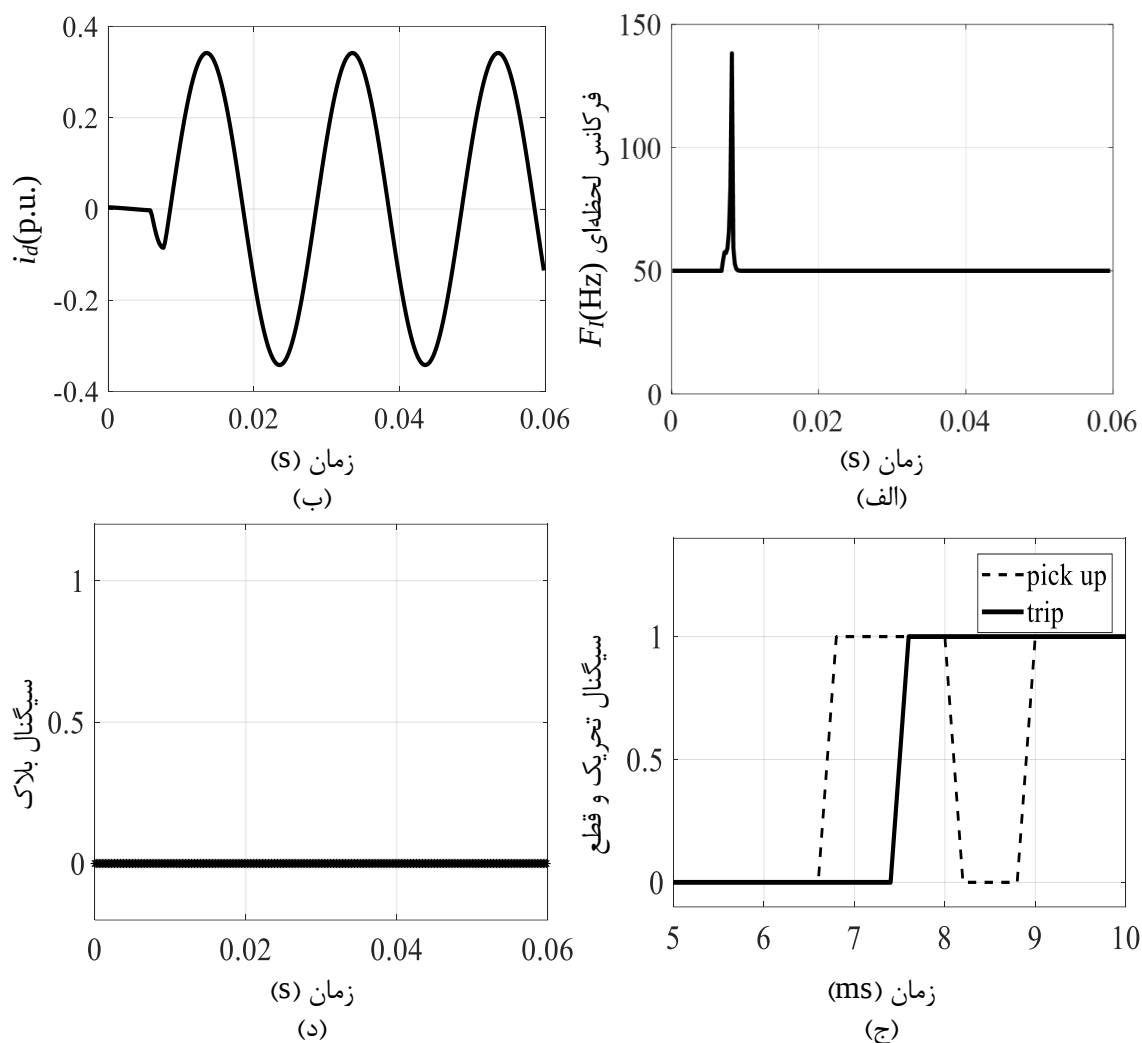
شکل (۴-۶) عملکرد روش پیشنهادی در خطای داخلی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تریپ و قطع

- **خطاهای سیم‌پیچ:** شرایط خطای حلقه به زمین و حلقه به حلقه مشابه خطای داخلی در ترمینال‌های ترانسفورماتور است اما اندازه جریان‌ها بسیار کمتر می‌باشد. در صورت وقوع این خطاها حفاظت دیفرانسیل باید دستور قطع را صادر کند. همان‌طور که از شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸) مشخص است در هر دو شرایط ذکر شده، فرکانس لحظه‌ای پس از یک جهش کوچک، مقدار فرکانس کاری شبکه را نشان می‌دهد لذا سیگنال بلاکی تولید نمی‌شود. همچنین مقدار جریان دیفرانسیل افزایش یافته و وارد ناحیه عملکرد شده است، بنابراین روش پیشنهادی خطا را تشخیص داده و سیگنال قطع را ارسال کرده.



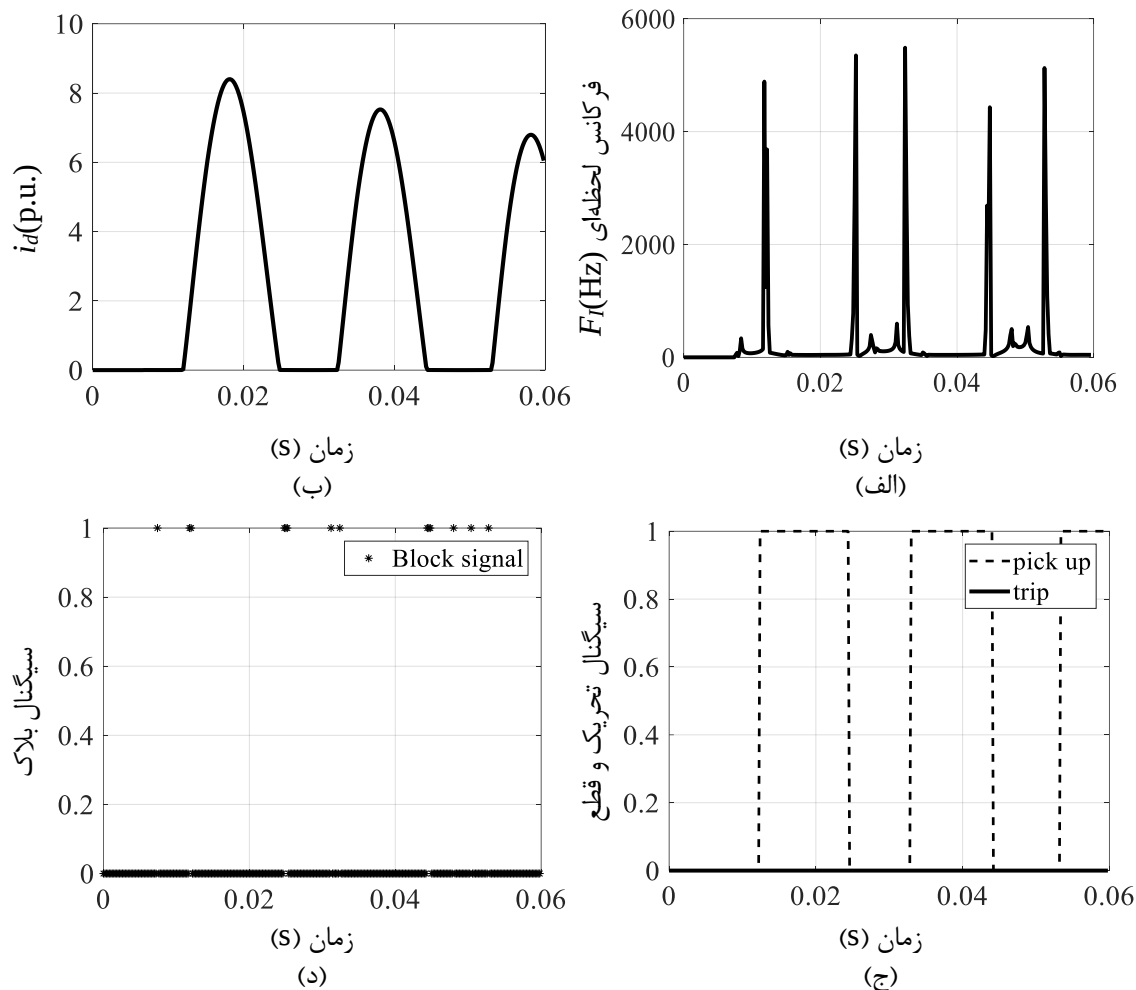
شکل (۷-۴) عملکرد روش پیشنهادی در خطای حلقه به زمین؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع

- **جریان هجومی:** در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت به دلیل خاصیت غیرخطی هسته آن، جریانی در سیم‌پیچ اولیه جاری می‌شود که سبب جاری شدن جریان دیفرانسیل می‌گردد. اما در این شرایط، حفاظت دیفرانسیل نباید عملکرد داشته باشد. با توجه به شکل (۹-۴) نقطه کار منحنی مشخصه به دلیل جاری شدن جریان دیفرانسیل با اندازه بزرگ در ناحیه عملکرد قرار می‌گیرد؛ بنابراین سیگنال تحریک ارسال خواهد شد. اما در این حالت، فرکانس لحظه‌ای دارای اسپایک‌های بزرگتر از مقدار آستانه تعیین شده، است و مقدار متناظر جریان دیفرانسیل، نزدیک به صفر می‌باشد. بنابراین بخش بازدارنده سیگنال بلاک را ارسال می‌کند و از ارسال دستور قطع جلوگیری می‌کند.



شکل (۴-۸) عملکرد روش پیشنهادی در خطای حلقه به حلقه؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع

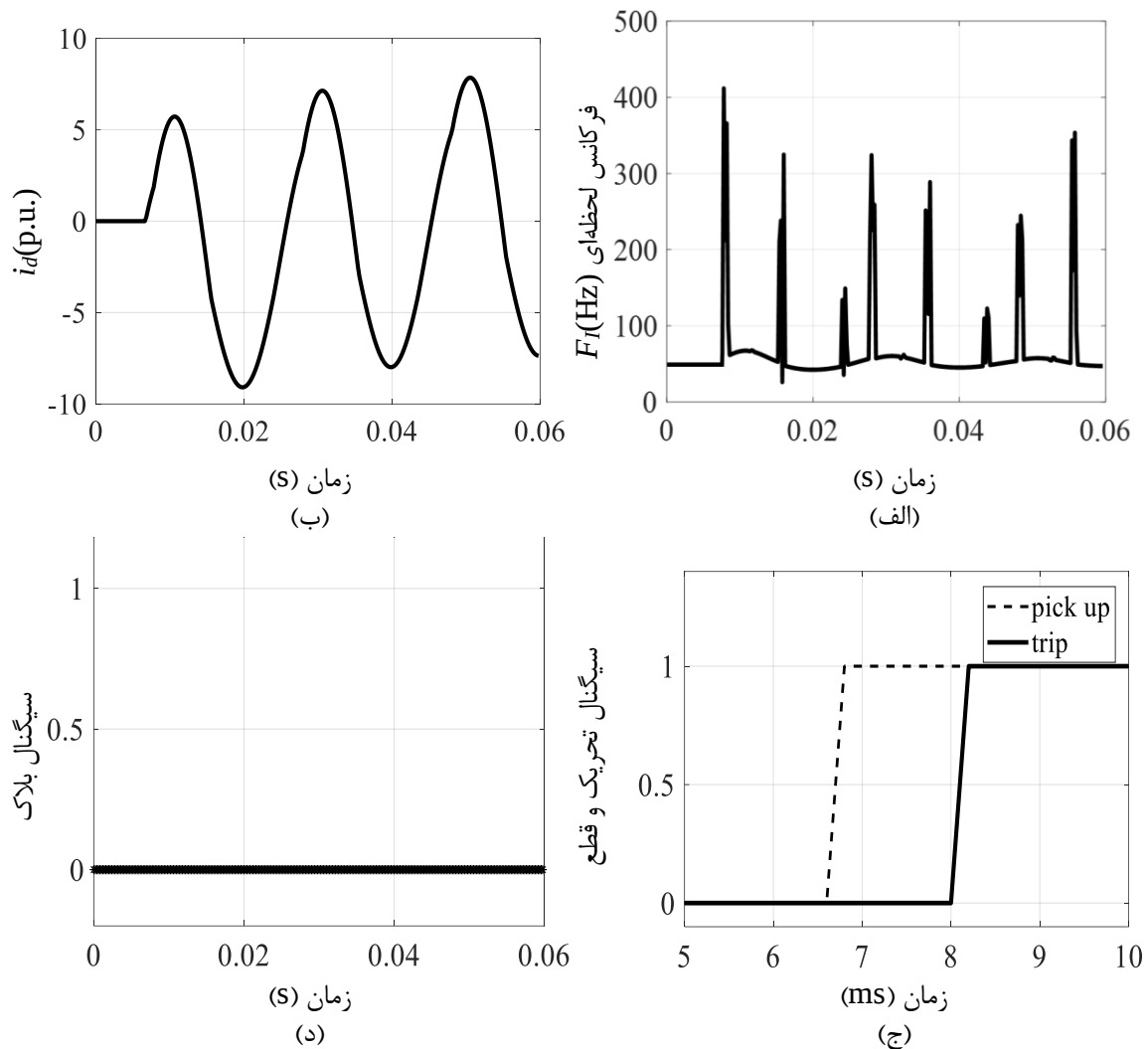
- **جریان هجومی همراه با خطای داخلی:** این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که ترانسفورماتور قدرت در حالی برق‌دار شود که خطا در محدوده حفاظتی وجود داشته باشد. بنابراین، به دلیل وجود خطا در این حالت، باید سریعاً دستور قطع صادر شود. با توجه به شکل (۴-۱۰) در این حالت به دلیل وجود جریان هجومی همراه با جریان خطا، اسپایک‌هایی در فرکانس لحظه‌ای وجود دارد، اما چون اندازه سیگنال در زمان‌های متناظر دارای مقادیر بزرگی هستند سیگنال بلاکی صادر نمی‌شود و پس از N تحریک، دستور قطع صادر شده است.



شکل (۹-۴) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع

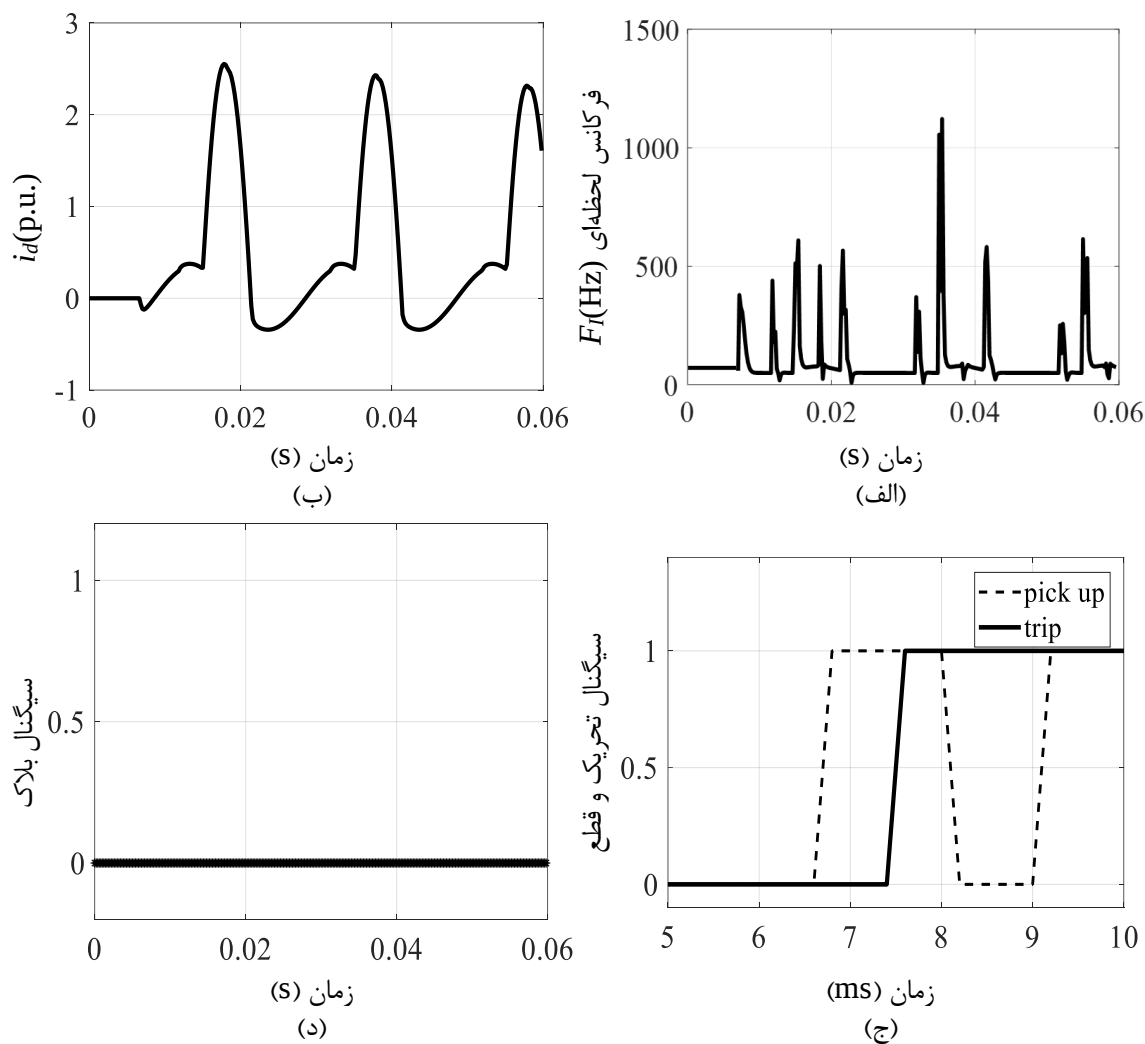
- **خطاهای سیم‌پیچ همراه با جریان هجومی:** این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که بین سیم‌پیچ‌ها یا سیم‌پیچ با بدنه ترانسفورماتور قدرت خطایی رخ داده و تحت این شرایط ترانسفورماتور قدرت برق‌دار می‌شود. از آنجایی که معمولاً دامنه جریان خطاهای سیم‌پیچ کمتر از خطاهای وارده بر ترمینال‌های ترانسفورماتور قدرت می‌باشد، ممکن است حفاظت دیفرانسیل به دلیل دامنه بالا جریان هجومی و دامنه کم خطاهای سیم‌پیچ، به اشتباه بلاک شود. در حالی که در چنین شرایطی حفاظت دیفرانسیل باید سریعاً عملکرد داشته باشد. با توجه به شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) در شرایط جریان هجومی همراه با هر دو نوع خطای حلقه به زمین و حلقه به حلقه اسپایک‌های فرکانس لحظه‌ای به دلیل وجود ماهیت جریان هجومی وجود دارند اما چون مقادیر جریان دیفرانسیل متناظر مقادیر بزرگی هستند روش پیشنهاد شده خطای داخلی را

تشخیص داده و دستور قطع را ارسال می‌کند.



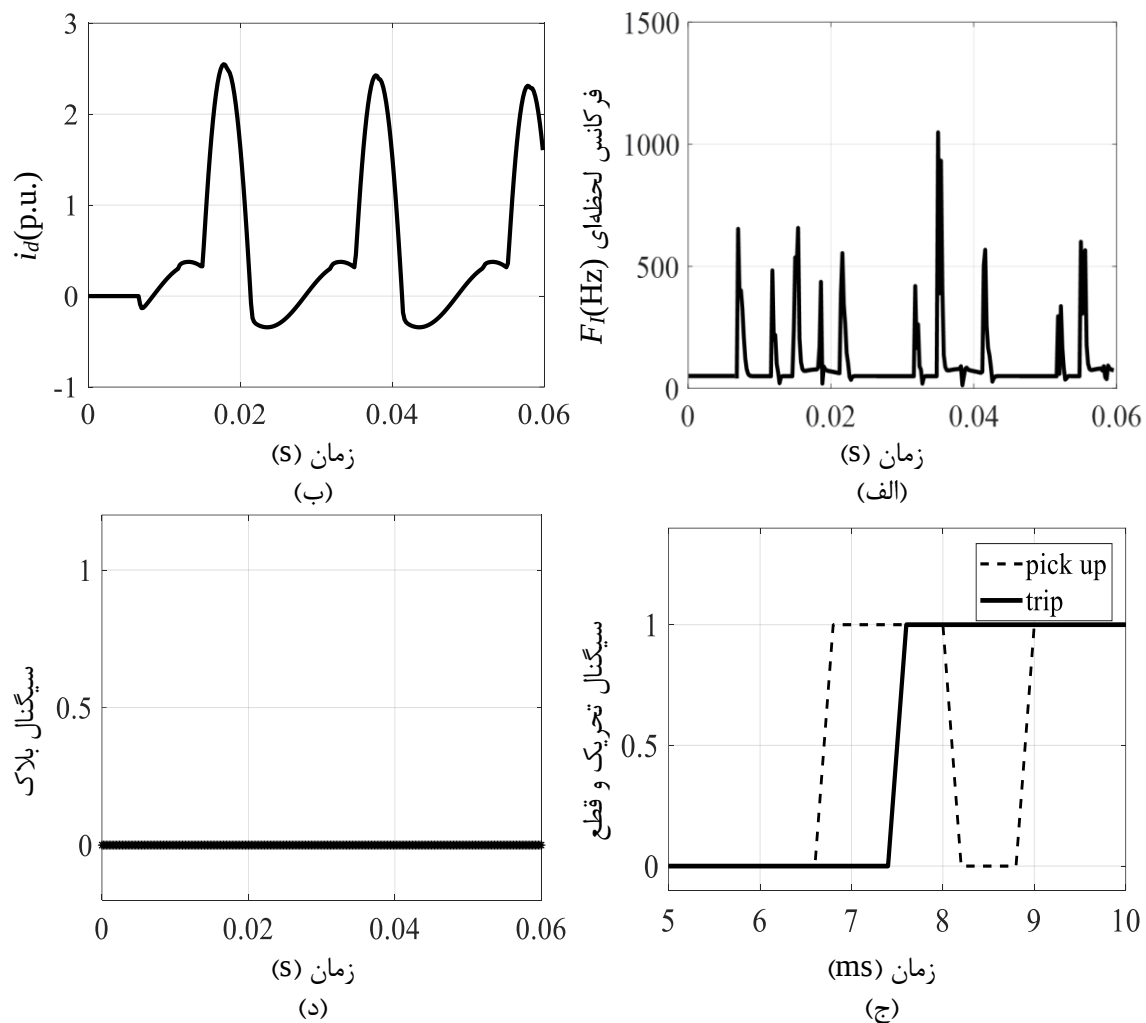
شکل (۴-۱۰) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی به همراه خطای داخلی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع

- **جریان هجومی بازیابی:** این حالت زمانی رخ می‌دهد که ولتاژ ترانسفورماتور قدرت پس از یک خطای خارجی (معمولاً دو فاز و سه فاز) بازیابی شود. جریان هجومی بازیابی مشابه جریان هجومی است اما دامنه کوچک‌تری دارد؛ بنابراین در چنین شرایطی نباید دستور قطع ارسال شود. جریان هجومی بازیابی همانند جریان هجومی برق‌دار کردن، جریان دیفرانسیل بزرگی دارد که سبب ورود منحنی مشخصه به ناحیه عملکرد می‌شود. اما با توجه به شکل (۴-۱۳)، به دلیل وجود اسپایک‌های فرکانس لحظه‌ای و اندازه نزدیک به صفر در نواحی مرده، الگوریتم پیشنهاد شده این شرایط را تشخیص می‌دهد و از عملکرد حفاظت دیفرانسیل جلوگیری می‌کند.

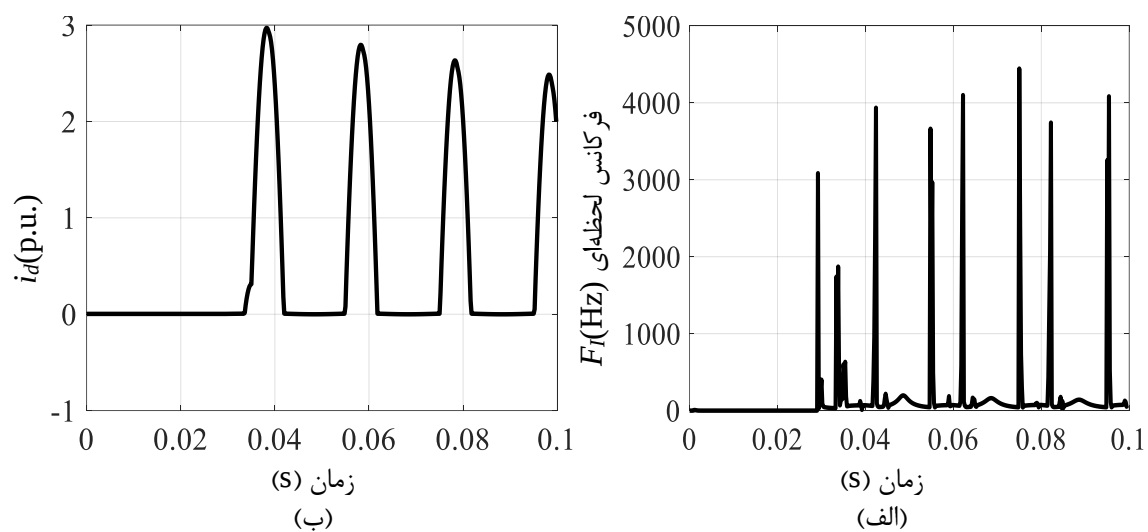


شکل (۴-۱۱) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی همراه با خطای حلقه به زمین؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع

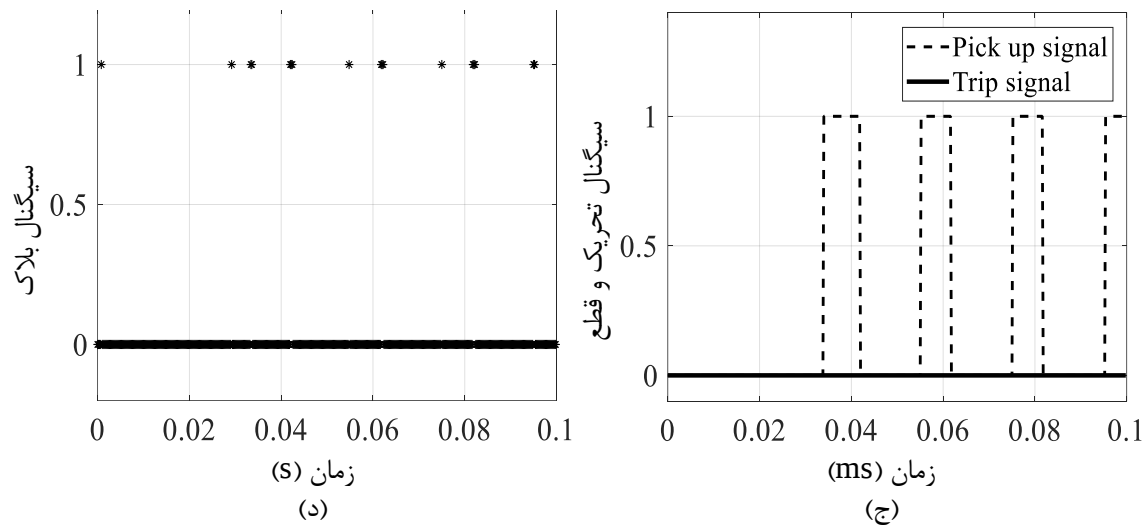
- **اضافه تحریک:** وقوع اضافه ولتاژهای گذرا و افت فرکانس در شبکه، ممکن است سبب به اشباع رفتن هسته ترانسفورماتور قدرت و جاری شدن جریان دیفرانسیل شود. در این شرایط حفاظت دیفرانسیل نباید عملکردی داشته باشد. در شرایط اضافه تحریک با به اشباع رفتن ترانسفورماتور قدرت، جریان دیفرانسیل وارد ناحیه عملکرد می‌شود؛ اما همان‌طور که در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده، در نواحی زاویه مرده فرکانس لحظه‌ای داری اسپایک‌های بزرگی بسیاری است که هم‌زمان با آن مقدار جریان دیفرانسیل نزدیک به صفر می‌باشد؛ بنابراین بخش بازدارنده این شرایط را تشخیص داده و با ارسال سیگنال بلاک از عملکرد حفاظت دیفرانسیل جلوگیری می‌کند.



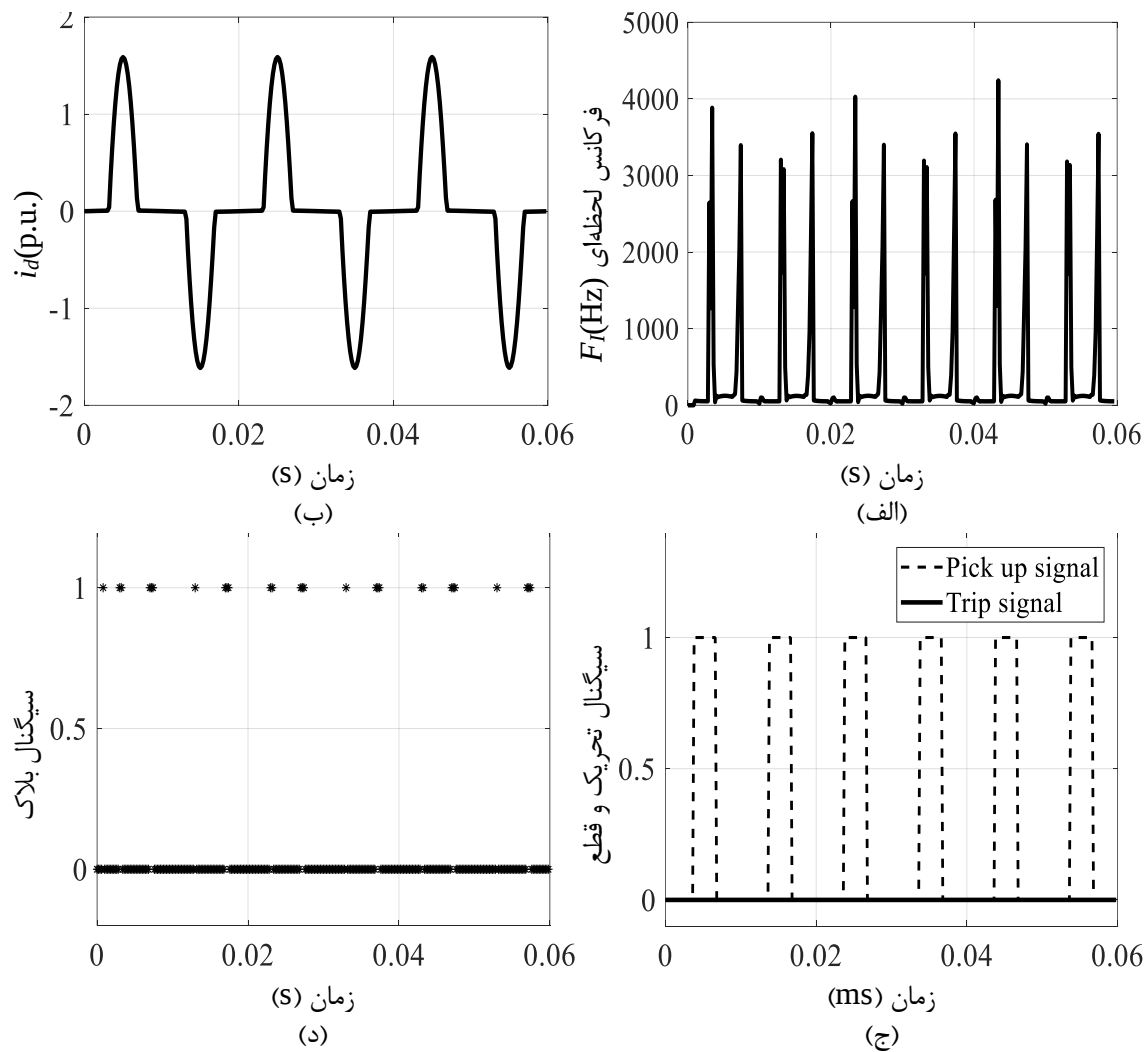
شکل (۴-۱۲) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی همراه با خطای حلقه به حلقه؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع



شکل (۴-۱۳) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی بازیابی؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای



ادامه شکل (۴-۱۳) عملکرد روش پیشنهادی در جریان هجومی بازیابی؛ (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع



شکل (۴-۱۴) عملکرد روش پیشنهادی در اضافه تحریک؛ (الف) جریان دیفرانسیل، (ب) فرکانس لحظه‌ای، (ج) سیگنال بلاک، (د) سیگنال تحریک و قطع

فصل پنجم

شبیه‌سازی و نتایج

۵-۱- مقدمه

در این فصل، روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته برای بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت از نظر سرعت و دقت عملکرد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای انجام این ارزیابی، دو ترانسفورماتور قدرت با اتصال Ynd01 و Ynyn00 در نرم‌افزار EMTP-RV بر اساس مدل BCTRAN مدل‌سازی می‌شوند و شبیه‌سازی‌های مختلفی برای تولید انواع اغتشاشات مرتبط با حفاظت مذکور، با و بدون اشباع ترانسفورماتور جریان انجام می‌گردد. پردازش ارزیابی روش پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود. همچنین تأثیر نویز سفید گوسی بر روی عملکرد روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت کارایی روش ارائه شده با روش بازدارنده هارمونیک، مقایسه می‌شود.

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

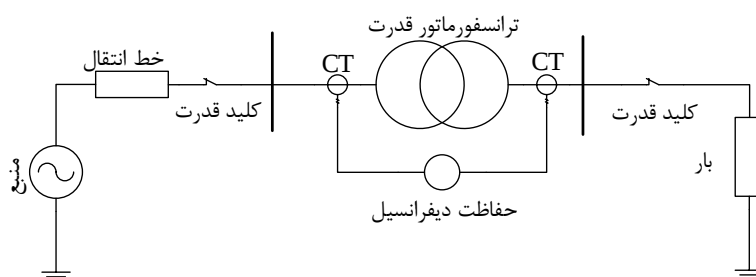
برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، یک سیستم قدرت شامل منبع ولتاژ و امپدانس تونن شبکه، خط انتقال با مدل π ، ترانسفورماتور قدرت و بار در نظر گرفته می‌شود که نمودار تک‌خطی آن در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. شبیه‌سازی سیستم قدرت در نرم‌افزار EMTP-RV انجام می‌شود و پردازش سیگنال‌های خروجی در نرم‌افزار MATLAB صورت می‌پذیرد. در این مطالعه، فرکانس سیستم قدرت ۵۰ هرتز و فرکانس نمونه‌برداری ۵ کیلوهرتز است. برای راستی آزمایی روش پیشنهادی، انواع حالت‌های مشخص شده در جدول (۵-۱) برای دو ترانسفورماتور قدرت (۱۶۰ مگاوات‌آمپر، ۲۳۰/۶۴ کیلوولت، ۵۰ هرتز) و (۳۰ مگاوات‌آمپر، ۶۴/۲۱ کیلوولت، ۵۰ هرتز) مورد مطالعه قرار می‌گیرد که به ترتیب دارای آرایش Ynd01 و Ynyn00 هستند. اطلاعات ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات‌آمپر از یک ترانسفورماتور واقعی و اطلاعات ترانسفورماتور ۳۰ مگاوات‌آمپر از نرم‌افزار EMTP-RV گرفته شده است. همچنین در این مطالعه برای شبیه‌سازی خطاهای سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت، از مدل BCTRAN استفاده شده. مطابق با این مدل، سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور قدرت با استفاده از دو ماتریس مقاومتی و راکتانسی 6×6 مدل می‌شود. با توجه به مرجع [۳۶]، برای ایجاد خطای حلقه به زمین، ماتریس‌های مقاومتی و راکتانسی ترانسفورماتور قدرت به ماتریس‌های 7×7 و برای ایجاد خطاهای حلقه به حلقه ماتریس‌های مذکور به ماتریس‌های 8×8 تبدیل می‌گردند. همچنین خاصیت غیرخطی

هسته توسط سلف‌های غیرخطی، در سمت منبع مدل‌سازی می‌شود. لازم به ذکر است که برای ترانسفورماتور قدرت ۳۰ مگا ولت‌آمپر به دلیل اتصال ستاره-مثلث از روش‌های جبران‌سازی گروه برداری و حذف توالی‌های صفر استفاده می‌شود. بنابراین اتصال ترانسفورماتورهای جریان برای هر دو ترانسفورماتور قدرت مورد مطالعه در هر دو سمت اولیه و ثانویه به صورت ستاره می‌باشد. اطلاعات المان‌های سیستم شبیه‌سازی شده و همچنین ضرایب روش پیشنهادی در شبیه‌سازی‌ها در جداول (ض-۱) تا (ض-۳) در بخش ضمیمه بیان شده است.

جدول (۵-۱): انواع شرایط و اغتشاشات ممکن برای ترانسفورماتور قدرت، به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

شرایط	بار (%)	نوع خطا	مقاومت خطا	طول اتصال کوتاه	سمت خطا	ولتاژ منبع (%)	زاویه کلیدزنی	شار اولیه (% نقطه زانو)	ضریب قدرت بار	مجموع حالت‌ها
N	۵۰:۱۰۰:۱۰۰	-	-	-	-	۹۵،۱۰۰، ۱۰۵	-	-	+۰/۸۵ -۰/۸۵	۳۶
EF	۰،۱۰۰	(aN,bN,cN)	۰،۲۰	-	اولیه ثانویه	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	-	+۰/۸۵	۹۶
		(ab,ac,bc)	۰،۲۰							۹۶
		(abN,acN,bcN)	۰،۲۰							۹۶
		(abc)	-							۱۶
IF	۰،۱۰۰	(aN,bN,cN)	۰،۲۰	-	اولیه ثانویه	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	-	+۰/۸۵	۹۶
		(ab,ac,bc)	۰،۲۰							۹۶
		(abN,acN,bcN)	۰،۲۰							۹۶
		(abc)	-							۱۶
TG	۱۰۰	۶ سیم‌پیچ	-	۰/۹ : ۰/۱ : ۰/۱	-	۱۰۰	-	-	+۰/۸۵	۵۴
TT	۱۰۰	۶ سیم‌پیچ دو جهت*	-	۰/۸ : ۰/۱ : ۰/۱	-	۱۰۰	-	-	+۰/۸۵	۹۶
EIC	۰،۵۰،۱۰۰	-	-	-	-	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	۰:۱۰:۸۰	+۰/۸۵	۱۰۸
IFIC	۰،۸۰	(aN,bN,cN)	۰،۲۰	-	اولیه	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	۰،۱۰،۵۰،۸۰	+۰/۸۵	۱۹۲
	۰،۸۰	(ab,ac,bc)	-							۹۶
	-	(abc)	-							۱۶
EFIC	۰،۸۰	(aN,bN,cN)	۰،۲۰	-	اولیه	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	۰،۱۰،۵۰،۸۰	+۰/۸۵	۱۹۲
	۰،۸۰	(ab,ac,bc)	-							۹۶
	-	(abc)	-							۱۶
TGIC	۱۰۰	۶ سیم‌پیچ	-	۰/۹ ، ۰/۵ ، ۰/۲	-	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	-	+۰/۸۵	۹۶
	۱۰۰	۶ سیم‌پیچ	-	۰/۸ ، ۰/۵ ، ۰/۲	-	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	-	+۰/۸۵	۹۶
TTIC	۱۰۰	۶ سیم‌پیچ	-	۰/۲ ، ۰/۱ ، ۰/۵	-	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	-	+۰/۸۵	۹۶
RIC	۰:۲۰:۱۰۰	(ab,ac,bc) (abc)	-	-	-	۱۰۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	-	+۰/۸۵	۷۲ ۲۴
OE	۱۰،۵۰،۱۰۰	-	-	-	-	۱۴۰:۵:۱۶۰	۰،۴۵،۹۰،۱۲۰	-	+۰/۸۵	۶۰
مجموع تمام حالت‌ها										۱۸۵۸

با توجه به جدول (۵-۱)، شبیه‌سازی‌های مختلفی بر اساس پارامترهای مختلف شبکه مورد مطالعه انجام می‌شود. به عنوان مثال، برای حالت خطای داخلی، بار در دو حالت صفر و صد درصد تغییر می‌کند و انواع خطاهای تک‌فاز به زمین، دو فاز، دوفاز به زمین و سه فاز در نظر گرفته می‌شود. این خطاها برای شرایطی که مسیر خطا بدون مقاومت و دارای مقاومت ۲۰ اهمی باشند و در زوایای کلیدزنی (صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه) برای سمت اولیه و ثانویه تکرار می‌شوند. در انتخاب گام متغیرها سعی شده حالت‌های مهم‌تر مانند خطای داخلی همراه با جریان هجومی، بیشتر مورد توجه قرار گیرد و برای مواردی مانند حالت نرمال شبکه، تنها به چند حالت بسنده شود. در نهایت ۱۸۵۸ حالت مختلف برای ارزیابی روش پیشنهادی شبیه‌سازی می‌شوند.



شکل (۵-۱) نمودار تک‌خطی سیستم قدرت مورد مطالعه

۵-۲-۱- کارایی روش پیشنهادی بدون در نظر گرفتن نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان

در ابتدا عملکرد روش پیشنهادی برای انواع حالت‌های ذکر شده در جدول (۵-۱)، بدون در نظر گرفتن نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. جدول (۵-۲) عملکرد روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ مگاوات‌آمپر را با جزئیات و به صورت مجزا برای هر حالت نشان می‌دهد. همچنین، جدول (۵-۳) نتایج عملکرد روش پیشنهادی را به طور خلاصه برای ترانسفورماتور قدرت ۳۰ مگاوات‌آمپر نشان می‌دهد. مطابق با نتایج به دست آمده، میانگین سرعت تشخیص خطا در این روش ۱/۵ میلی‌ثانیه (کمتر از یک‌دهم سیکل در فرکانس ۵۰ Hz) می‌باشد و تمامی حالت‌های مورد بررسی بدون هیچ خطایی تشخیص داده شده‌اند. همچنین، انحراف معیار کوچک در نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده پراکندگی زمان تشخیص کم در روش پیشنهادی است.

جدول (۲-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاولت آمپر بدون در نظر گرفتن نویز و اشباع CT

شرایط	خطای تشخیص (%)	زمان تشخیص (ms)	
		میانگین	انحراف معیار
N	۰	-	-
EF	۰	-	-
IF	۰	۱/۵	۰/۱۷
TG	۰	۱/۶	۰
TT	۰	۱/۶	۰
EIC	۰	-	-
IFIC	۰	۱/۵	۰/۱۲
EFIC	۰	-	-
TGIC	۰	۱/۵	۰
TTIC	۰	۱/۵	۰
RIC	۰	-	-
OE	۰	-	-
تمامی شرایط	۰	۱/۵	۰/۱۴

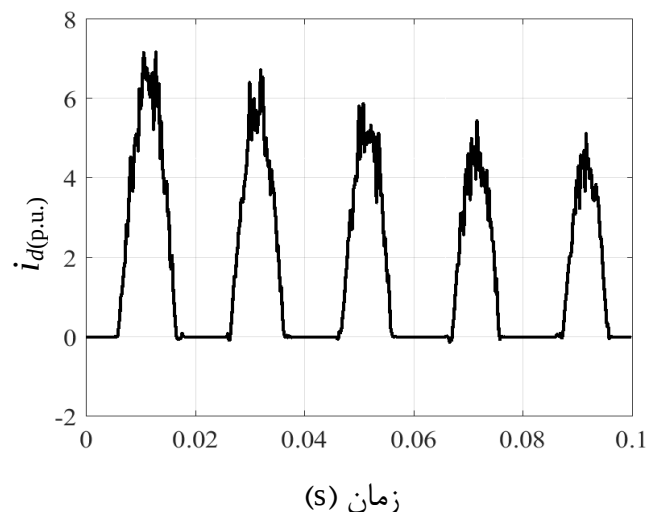
جدول (۳-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۳۰ مگاولت آمپر بدون در نظر گرفتن نویز و اشباع CT

شرایط	خطای تشخیص (%)	بدون نویز	
		زمان تشخیص (ms)	
		میانگین	حداکثر
تمامی شرایط	۰	۱/۵	۲/۳

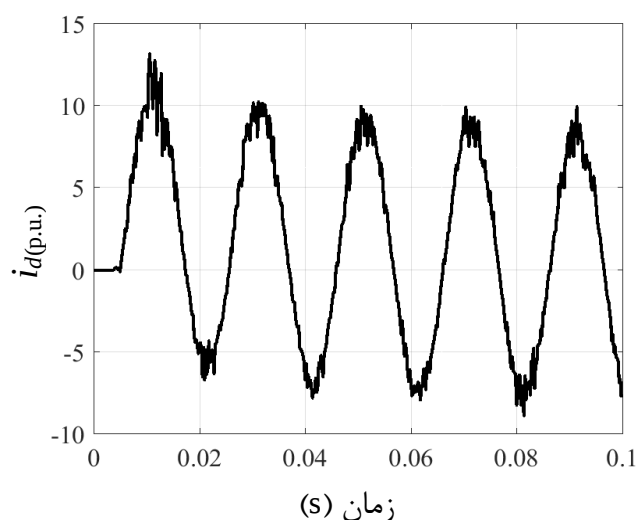
۵-۲-۲- کارایی روش پیشنهادی در حضور نویز و بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

یکی از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد رله‌های دیجیتال و عددی، نویز محیط می‌باشد که ممکن است از هر منبع الکترومغناطیسی تولید شود و عملکرد رله را دچار مشکل کند. بنابراین در این بخش، اثر نویز بر روش پیشنهادی بررسی می‌شود. با توجه به اینکه نویز ۳۰ دسی‌بل یک سطح نویز طبیعی برای سیستم قدرت واقعی است [۱۵]، بنابراین برای انجام این بررسی، نویز سفید گوسی با نسبت سیگنال به نویز (SNR) بین ۲۰ تا ۴۰ دسی‌بل با گام ۱۰ دسی‌بل بر روی تمامی حالت‌های شبیه‌سازی اعمال گردیده است. شکل (۲-۵) و شکل (۳-۵) به ترتیب جریان هجومی و خطای داخلی را همراه با نویز سفید گوسی ۲۰ دسی‌بل برای ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ مگاولت آمپر نشان می‌دهند. با توجه به اینکه نویز سفید ماهیتی تصادفی دارد، تمامی شرایط ذکر

شده در جدول (۵-۱)، ۵۰۰ مرتبه در شرایط نویزی تکرار می‌شوند تا متوسط زمان و دقت عملکرد روش پیشنهادی در شرایط نویزی مشخص شود. نتایج عملکرد روش پیشنهادی در شرایط نویزی برای ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ مگاوات آمپر با جزئیات دقیق در جدول (۵-۶) و برای ترانسفورماتور قدرت ۳۰ مگاوات آمپر به طور خلاصه در جدول (۵-۷) ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، عملکرد روش پیشنهادی حتی در شرایط نویز ۲۰ دسی‌بل که نویزی غیرمتعارف در سیستم قدرت می‌باشد، دقت عملکرد ۹۹/۷۲٪ را نشان می‌دهد. خطای تشخیص در نویز ۳۰ دسی‌بل که سطح نویز طبیعی در سیستم قدرت می‌باشد، ۰/۰۸٪ اندازه‌گیری شده و برای نویز ۴۰ دسی‌بل، خطای تشخیص قابل چشم پوشی است. همچنین متوسط سرعت تشخیص در شرایط نویزی تغییر چندانی نداشته و در تمامی شرایط نویزی برابر ۱/۶ میلی ثانیه می‌باشد.



شکل (۵-۲) جریان هجومی با نویز سفید گوسی ۲۰ دسی‌بل برای ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ مگاوات آمپر



شکل (۵-۳) جریان خطای داخلی با نویز سفید گوسی ۲۰ دسی‌بل برای ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ مگاوات آمپر

جدول (۴-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاولت آمپر با در نظر گرفتن نویز سفید گوسی و بدون اشباع CT

شرایط	نویز ۴۰ دسی بل				نویز ۳۰ دسی بل				نویز ۲۰ دسی بل			
	زمان تشخیص (ms)		خطای تشخیص (%)	خطای	زمان تشخیص (ms)		خطای تشخیص (%)	خطای	زمان تشخیص (ms)		خطای تشخیص (%)	خطای
	میانگین	انحراف معیار			میانگین	انحراف معیار			میانگین	انحراف معیار		
N	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
EF	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
IF	۰/۴۰	۱/۵	۰/۱۷	۲/۲	۰/۲	۱/۵	۰/۱۸	۳/۲	۰/۶۴	۱/۵	۰/۱۸	۲/۳
TG	۰	۱/۸	۰	۱/۸	۰	۱/۸	۰	۱/۸	۰/۰۷	۱/۸	۰	۱/۸
TT	۰/۲۰	۱/۸	۰	۱/۸	۰/۰۶	۱/۸	۰	۱/۸	۰/۱۲	۱/۸	۰	۱/۸
EIC	۰	-	-	-	۰/۲۲	-	-	-	۱/۱۴	-	-	-
IFIC	۰	۱/۵	۰/۲۲	۲/۶	۰/۰۲	۱/۵	۰/۲۲	۲/۶	۰/۷	۱/۵	۰/۲۲	۲/۶
EFIC	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
TGIC	۰	۱/۵	۰/۲۹	۴	۰	۱/۵	۰/۲۹	۴	۰	۱/۵	۰/۲۹	۴
TTIC	۰	۱/۵	۰/۱۳	۱/۶	۰	۱/۵	۰/۱۳	۱/۶	۰	۱/۵	۰/۱۳	۱/۶
RIC	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
OE	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
تمامی شرایط	۰/۰۰۷	۱/۶	۰/۲۲	۴	۰/۰۸	۱/۶	۰/۲۲	۴	۰/۲۹	۱/۶	۰/۲۳	۴

جدول (۵-۵) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۳۰ مگاولت آمپر با در نظر گرفتن نویز سفید گوسی و بدون اشباع CT

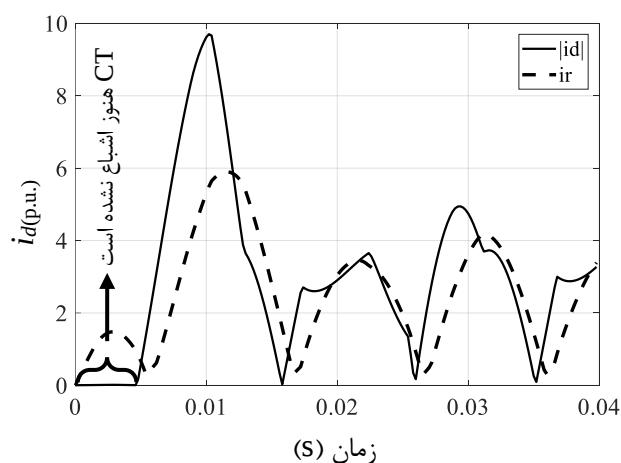
نویز ۲۰ دسی‌بل		نویز ۳۰ دسی‌بل				نویز ۴۰ دسی‌بل		شرایط	
زمان تشخیص (ms)		زمان تشخیص (ms)		زمان تشخیص (ms)		خطای تشخیص (%)			
میانگین	حداکثر	میانگین	حداکثر	میانگین	حداکثر	میانگین	حداکثر		
۱/۶	۴	۰/۳	۱/۶	۰/۰۹	۱/۶	۴	۱/۶	۰/۰۰۶	تمامی شرایط

۵-۲-۳- کارایی روش پیشنهادی با در نظر گرفتن نویز و اشباع ترانسفورماتور جریان

در عمل ثابت شده است که CTها بلافاصله با بروز خطا وارد اشباع نمی شوند [۱۹]. از طرف دیگر، با توجه به سرعت بالای تشخیص روش پیشنهادی (۱/۵ میلی ثانیه)، خطاهای داخلی پیش از اشباع CTها تشخیص داده می شوند. همچنین، با استفاده از منحنی مشخصه های دارای چند شیب و تعیین ضرایب مناسب برای حفاظت دیفرانسیل درصدی تا حدی زیادی می توان از عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل در مقابل اشباع CTها جلوگیری کرد [۲۰] و [۲۱]. با این حال بررسی عملکرد روش پیشنهادی در هنگام اشباع ترانسفورماتور جریان و حالت های گذرای مختلف برای نشان دادن کارایی روش، امری لازم و ضروری است. در این مطالعه از

یک ترانسفورماتور غیرایده‌آل برای مدل‌سازی ترانسفورماتور جریان در نرم‌افزار EMTP-RV استفاده شده است. برای مدل‌سازی؛ رفتار غیرخطی ترانسفورماتور جریان، تلفات هسته و تلفات سیم‌پیچ‌ها به ترتیب از یک سلف غیرخطی موازی، مقاومت موازی و یک مقاومت سری استفاده شده است.

امروزه بیشتر رله‌های دیجیتال و عددی دارای الگوریتم‌های تشخیص اشباع CT می‌باشند. در این پایان‌نامه از روش تشخیص اشباع CT رله صنعتی RET521 از شرکت ABB استفاده می‌شود [۱۹]. این روش دارای سرعت بسیار بالا و ساختار ساده‌ای است که سبب می‌شود حجم محاسبات در حد پایینی باقی بماند. روش تشخیص اشباع CT به این صورت است که پس از هر عبور از صفر جریان i_r الگوریتم تغییرات $|i_d|$ را دنبال می‌کند. در صورت وقوع خطاهای داخلی، i_d به طور هم‌زمان پس از عبور از صفر i_r ظاهر می‌شود و در صورت رخداد خطاهای خارجی i_d پس از گذشت زمان و با اشباع شدن هسته CT ظاهر می‌شود (شکل (۴-۵)). بنابراین مطابق با توضیحات بالا، یک سیگنال بلاک بر این اساس تولید شده و از عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل در هنگام اشباع ترانسفورماتورهای جریان جلوگیری می‌کند.



شکل (۴-۵) اشباع CT در حضور خطای خارجی و جریان هجومی. خط ممتد $|i_d|$ و خط چین i_r

برای بررسی اثر اشباع، تمامی حالت‌های ذکر شده در جدول (۵-۱)، با در نظر گرفتن اشباع CT بر روی ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر مورد بررسی قرار می‌گیرد که نتایج آن در جدول (۵-۶) ارائه می‌شود. در این آزمایش شرایط نویزی نیز به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به جدول (۵-۶)، سرعت تشخیص روش پیشنهادی در حالت بدون نویز ۱/۵ میلی‌ثانیه و با دقت ۱۰۰٪ است و در شرایط

نویزی سرعت تشخیص ۱/۶ میلی ثانیه و خطا تشخیص ۱/۰۲٪ می باشد. بنابراین مشاهده می شود که نتایج به دست آمده در این قسمت تفاوت چندانی با حالت بدون اشباع CT نداشته و روش پیشنهادی عملکرد قابل قبولی را در شرایط اشباع CT نشان می دهد.

جدول (۵-۶) نتایج روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگا ولت آمپر همراه با اشباع CT

شرایط	بدون نویز				نویز ۴۰ دسی بل				نویز ۳۰ دسی بل				نویز ۲۰ دسی بل			
	زمان تشخیص (ms)			خطای	زمان تشخیص (ms)			خطای	زمان تشخیص (ms)			خطای	زمان تشخیص (ms)			خطای
	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	(%)	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	(%)	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	(%)	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	(%)
N	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
EF	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
IF	۰	۱/۵	۰/۱۷	۲/۲	۰	۱/۵	۰/۲۵	۳	۰	۱/۵	۰/۲۴	۳	۰	۱/۵	۰/۲۳	۳
TG	۰	۱/۶	۰	۱/۶	۰	۱/۸	۰	۱/۸	۰	۱/۸	۰	۱/۸	۰	۱/۸	۰	۱/۸
TT	۰	۱/۶	۰	۱/۶	۰/۰۲	۱/۸	۰	۱/۸	۰/۰۶	۱/۸	۰	۱/۸	۰/۱۲	۱/۸	۰	۱/۸
EIC	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰/۹	-	-	-	۲/۰۷	-	-	-
IFIC	۰	۱/۵	۰/۱۲	۲/۳	۰	۱/۵	۰/۲۲	۲/۴	۰/۱۳	۱/۵	۰/۲۲	۲/۴	۰/۴۳	۱/۵	۰/۲۲	۲/۴
EFIC	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۱/۹۲	-	-	-	۳/۶۲	-	-	-
TGIC	۰	۱/۵	۰	۱/۵	۰	۱/۵	۰/۲۹	۴	۰	۱/۵	۲/۹	۴	۰	۱/۵	۰/۳۲	۴
TTIC	۰	۱/۵	۰	۱/۵	۰	۱/۵	۱/۳	۱/۶	۰	۱/۵	۱/۳	۱/۶	۰	۱/۵	۰/۲۸	۱/۶
RIC	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
OE	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-	۰	-	-	-
تمامی شرایط	۰	۱/۵	۰/۱۲	۲/۳	۰/۰۰۱	۱/۶	۰/۲۱	۴	۰/۴۸	۱/۶	۰/۴۳	۴	۱/۰۲	۱/۶	۰/۴۷	۴

۵-۲-۴- مقایسه روش پیشنهادی با روش بازدارنده هارمونیک

روش بازدارنده هارمونیک [۲] از روش های متداول در تشخیص جریان هجومی می باشد که در حال حاضر در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش برای تشخیص جریان هجومی از نسبت هارمونیک دوم به مؤلفه اصلی استفاده می شود و در این بررسی چنانچه این مقدار بیش از حد آستانه ۱۵٪ بیشتر باشد به عنوان شرایط جریان هجومی در نظر گرفته می شود. همچنین برای تشخیص شرایط اضافه تحریک از نسبت هارمونیک پنجم به مؤلفه اصلی استفاده می شود و در این مطالعه چنانچه این مقدار بیش از حد آستانه ۲۰٪ باشد به عنوان شرایط اضافه تحریک در نظر گرفته شده و از عملکرد حفاظت دیفرانسیل جلوگیری می شود [۲۰]، [۲۱]

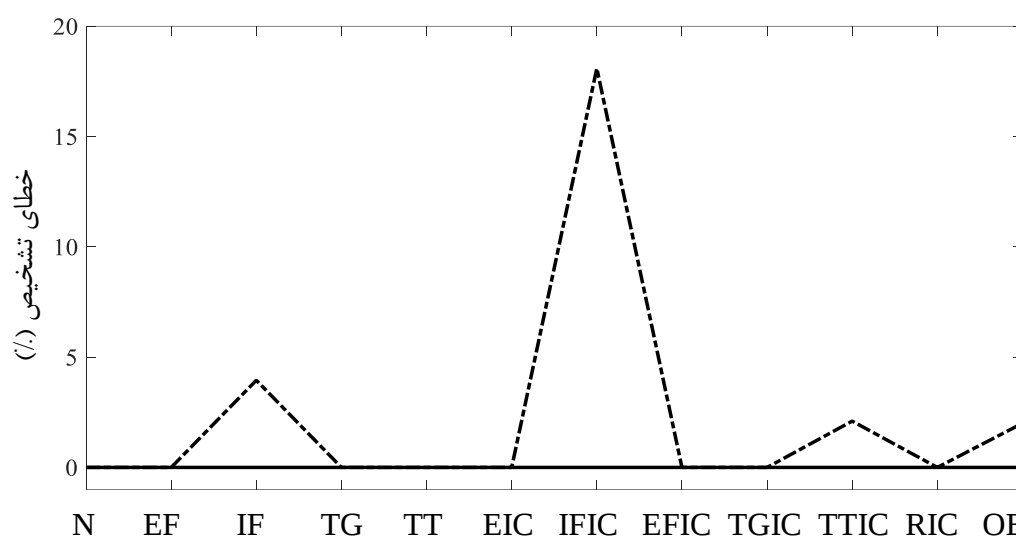
و [۱۹]. برای مقایسه روش پیشنهادی با روش بازدارنده هارمونیک انواع شرایط ذکر شده در جدول (۵-۱) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر آزمایش شده و نتایج عملکرد روش بازدارنده هارمونیک در جدول (۵-۷) ارائه شده است. جدول (۵-۷) نتایج ارزیابی روش بازدارنده هارمونیک را بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان و در حضور نویز و بدون نویز نشان می‌دهد.

جدول (۵-۷): نتایج روش بازدارنده هارمونیک برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر بدون در نظر گرفتن اشباع CT

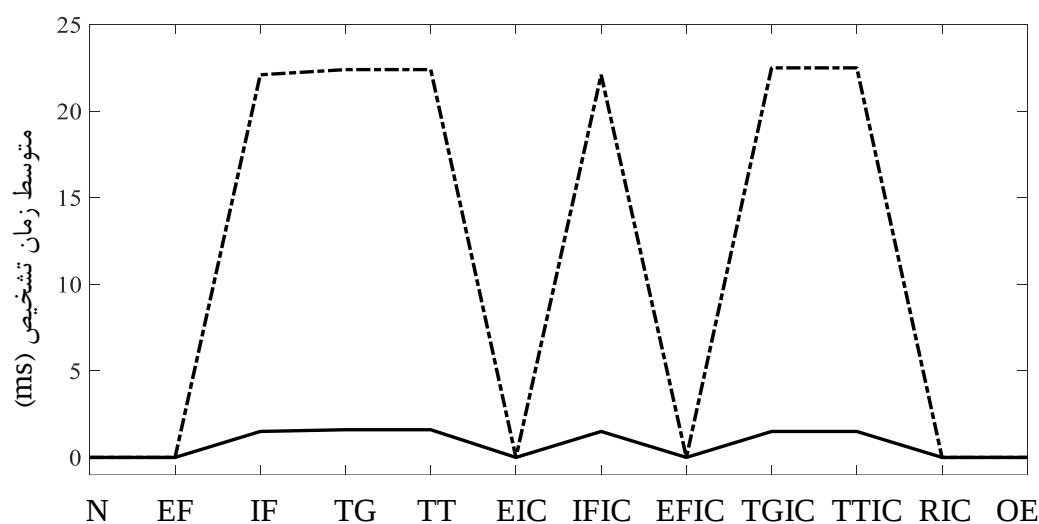
شرایط	بدون نویز			نویز ۲۰ دسی بل		
	زمان تشخیص (ms)		خطای تشخیص (%)	زمان تشخیص (ms)		خطای تشخیص (%)
	میانگین	انحراف معیار		میانگین	انحراف معیار	
N	۰	-	-	۰	-	-
EF	۰	-	-	۰	-	-
IF	۳/۹۵	۲۲/۱	۴	۲۲/۲	۳/۶۴	۲۲/۱
TG	۰	۲۲/۴	۲/۶	۲۲/۷	۰	۲۲/۴
TT	۰	۲۲/۴	۲/۶	۲۲/۷	۰	۲۲/۴
EIC	۰	-	-	۰/۸۰	-	-
IFIC	۱۸/۰۹	۲۲/۱	۸/۱	۲۲/۲	۱۸/۳۸	۲۲/۱
EFIC	۰	-	-	۰	-	-
TGIC	۰	۲۲/۵	۲/۹	۲۲/۳	۰/۰۱	۲۲/۵
TTIC	۲/۱	۲۲/۵	۲/۹	۲۲/۱	۲/۱	۲۲/۵
RIC	۰	-	-	۰	-	-
OE	۲	-	-	۲/۳	-	-
تمامی شرایط	۵	۲۲/۲۳	۴/۹۴	۲۲/۷	۵/۸	۲۲/۲۳

با توجه به نتایج جدول (۵-۷) و مقایسه آن با نتایج جداول (۵-۲) و (۵-۴)، مشخص می‌شود که الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری را در تشخیص اغتشاشات داشته و سرعت آن حدوداً ۱۴ برابر روش بازدارنده هارمونیک می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود روش بازدارنده هارمونیک در تشخیص شرایط جریان هجومی همراه با خطای داخلی خطای زیادی (۱۸/۰۹٪) دارد که روش پیشنهادی این شرایط را بدون خطا تشخیص می‌دهد. علاوه بر آن، روش بازدارنده هارمونیک در تشخیص شرایط خطای داخلی و خطای حلقه به حلقه همراه با جریان هجومی در هر دو حالت با و بدون نویز، خطا دارد، در حالی که روش پیشنهادی برای این نوع

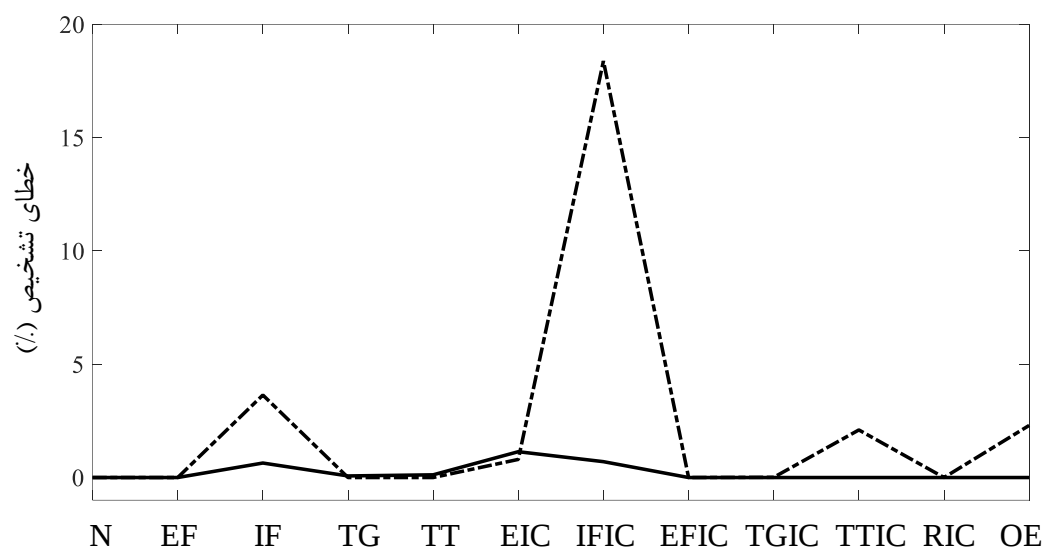
از اغتشاشات در شرایط بدون نویز هیچ خطایی ندارد و در شرایط نویزی عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. شکل‌های (۵-۶) و (۵-۸)، کارایی بهتر روش پیشنهادی را در مقایسه با روش بازدارنده هارمونیک، از نظر دقت تشخیص انواع اغتشاشات ممکن برای ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ مگاولت‌آمپر، با و بدون نویز را نشان می‌دهند. همچنین شکل‌های (۵-۷) و (۵-۹)، بیانگر متوسط زمان کمتر برای تشخیص انواع اغتشاشات روش پیشنهادی در مقایسه با روش مذکور می‌باشند.



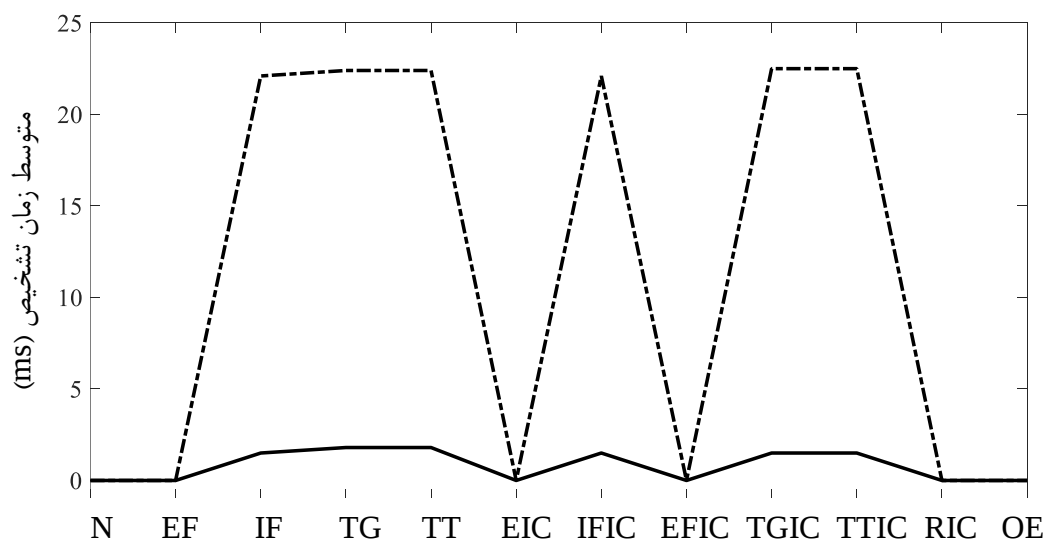
شکل (۵-۵) خطای تشخیص روش پیشنهادی (خط تو پر) و روش بازدارنده هارمونیک (خط نقطه‌چین) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاولت‌آمپر بدون حضور نویز



شکل (۵-۶) متوسط زمان تشخیص روش پیشنهادی (خط تو پر) و روش بازدارنده هارمونیک (خط نقطه‌چین) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاولت‌آمپر بدون حضور نویز



شکل (۷-۵) خطای تشخیص روش پیشنهادی (خط تو پر) و روش بازدارنده هارمونیک (خط نقطه چین) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر با حضور نویز



شکل (۸-۵) متوسط زمان تشخیص روش پیشنهادی (خط تو پر) و روش بازدارنده هارمونیک (خط نقطه چین) برای ترانسفورماتور ۱۶۰ مگاوات آمپر با حضور نویز

فصل ششم

جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- جمع‌بندی

ترانسفورماتور قدرت به عنوان یکی از تجهیزات مهم و حیاتی سیستم قدرت حفاظت‌های زیادی دارد که از مهم‌ترین آن‌ها حفاظت دیفرانسیل است. از مهم‌ترین چالش‌های این حفاظت، تشخیص شرایط جریان هجومی، اضافه تحریک و خطای خارجی از سایر خطاهای داخلی و خطای سیم‌پیچ می‌باشد. در حال حاضر متداول‌ترین روش برای تشخیص اغتشاشات ذکر شده در صنعت، روش بازدارنده هارمونیک است. اخیراً به دلیل استفاده از مواد جدید در هسته ترانسفورماتورهای قدرت، مقادیر هارمونیک دوم در جریان هجومی کاهش یافته است. همچنین در برخی شرایط مانند اشباع ترانسفورماتورهای جریان در خطاهای اتصال کوتاه، مؤلفه هارمونیک دوم بزرگی ایجاد می‌شود. بنابراین، چنین مسائلی سبب کاهش دقت و کارایی روش‌های مبتنی بر هارمونیک شده است. تاکنون روش‌های بسیاری برای جلوگیری از عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل پیشنهاد شده که به طور کلی، الزاماً قابل پیاده‌سازی نبوده یا تمامی اغتشاشات را تشخیص نمی‌دهند. در این پایان‌نامه روش جدیدی بر اساس، الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته، برای بهبود عملکرد حفاظت دیفرانسیل ارائه شده است. برای ارزیابی روش پیشنهادی، انواع اغتشاشات ممکن مرتبط با حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت برای دو ترانسفورماتور قدرت (۱۶۰ مگاوات‌آمپر، ۲۳۰/۶۴ کیلوولت، ۵۰ هرتز، Yyn00) و (۳۰ مگاوات‌آمپر، ۶۴/۲۱ کیلوولت، ۵۰ هرتز، Ynd01) مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی سیستم قدرت در نرم‌افزار EMTP-RV انجام شده و پردازش‌های مورد نیاز در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. همچنین شرایط اشباع ترانسفورماتور جریان و تأثیر نویز سفید گوسی بر روی روش پیشنهادی بررسی شده. در نهایت، عملکرد این روش با عملکرد روش بازدارنده هارمونیک مقایسه شده است.

۶-۲- نتیجه‌گیری

الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته به دلیل پنجره نمونه‌برداری کوچک و محاسبات ساده، سرعت و دقت بالایی در تحلیل سیگنال‌ها در حوزه زمان دارد. بنابراین، روش پیشنهادی در تشخیص شرایط جریان هجومی، اضافه تحریک و خطای خارجی را از سایر خطاهای داخلی و خطای سیم‌پیچ سرعت و دقت بالایی دارد. روش پیشنهادی دارای دو بخش اصلی می‌باشد که بخش اول خطاهای خارجی را از اغتشاشات داخلی

تفکیک می‌کند و بخش دوم جریان هجومی، جریان هجومی بازیابی و اضافه تحریک را از خطاهای داخلی و سیم‌پیچ با و بدون وجود جریان هجومی تشخیص می‌دهد. به کارگیری موازی این دو بخش سبب شده شرایط جریان هجومی، جریان هجومی بازیابی و اضافه تحریک حتی پیش از تحریک حفاظت دیفرانسیل تشخیص داده شوند. با توجه به مطالعات انجام شده، می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

- دقت روش پیشنهادی در شرایط بدون در نظر گرفتن نویز و بدون اشباع ترانسفورماتور جریان، ۱۰۰٪ بوده و متوسط سرعت تشخیص در این شرایط، ۱/۵ میلی‌ثانیه (در فرکانس ۵۰ هرتز) است.
- روش پیشنهادی در بدترین شرایط نویز سفید گوسی (نویز ۲۰ دسی‌بل)، که با توجه به نویز طبیعی در شبکه قدرت مقداری نامتعارف است، عملکرد مناسبی داشته است. به طوری که، دقت تشخیص این روش بیش از ۹۹٪ بوده و متوسط سرعت تشخیص، تغییر زیادی نسبت به حالت بدون نویز نداشته و ۱/۶ میلی‌ثانیه است. همچنین خطای روش پیشنهادی در نویز ۳۰ دسی‌بل ۰/۰۸٪ است و برای نویز ۴۰ دسی‌بل خطای آن قابل چشم‌پوشی است.
- با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتورهای جریان، دقت و سرعت روش پیشنهادی تغییر چندانی نداشته و به طور کلی در بدترین شرایط، دقت آن حدود ۹۹٪ با سرعت ۱/۶ میلی‌ثانیه می‌باشد.
- در شرایط بدون نویز روش بازدارنده هارمونیک، در خطای داخلی، خطای داخلی همراه با جریان هجومی و خطای حلقه به حلقه همراه با جریان هجومی دارای خطا می‌باشد در حالی که روش پیشنهادی تمامی این خطاهای ذکر شده را بدون خطا تشخیص می‌دهد. در شرایط نویز ۲۰ دسی‌بل نیز به طور کلی دقت روش پیشنهادی بهتر از روش بازدارنده هارمونیک است.
- در روش پیشنهاد شده از مؤلفه‌های هارمونیک استفاده نمی‌شود، بنابراین سرعت بالاتری نسبت به روش بازدارنده هارمونیک دارد. به طوری که متوسط سرعت تشخیص این روش حدوداً ۱۴ برابر سریع‌تر از متوسط سرعت تشخیص است.
- امکان پیاده‌سازی روش پیشنهادی به دلیل سادگی و حجم پایین محاسبات به صورت زمان واقعی ممکن است.

۶-۳- پیشنهادات

در پایان، موارد زیر برای انجام مطالعات آتی و بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت بر اساس روش

ارائه شده، پیشنهاد می‌شود:

- یکی دیگر از پدیده‌هایی که ممکن است سبب اختلال در عملکرد حفاظت دیفرانسیل شود، پدیده جریان هجومی همدردی می‌باشد. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که یک ترانسفورماتور قدرت در حال بهره‌برداری باشد و یک ترانسفورماتور قدرت دیگر که به صورت سری یا موازی با آن قرار دارد، برق‌دار شود. در این شرایط، جریانی به شکل جریان هجومی از ترانسفورماتور در حال بهره‌برداری عبور می‌کند که می‌تواند سبب عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل گردد. بنابراین، تشخیص جریان همدردی به کمک روش پیشنهادی جهت جلوگیری از عملکرد حفاظت دیفرانسیل پیشنهاد می‌شود.
- شبکه قدرت دارای المان‌های زیادی می‌باشد که می‌توانند در حالت‌های گذرا بر روی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت تأثیر بگذارند. خازن‌های سری و موازی و همچنین اثر خازنی خطوط طویل از جمله این المان‌ها هستند، که سبب افزایش هارمونیک دوم در شبکه می‌شوند و عملکرد روش‌های هارمونیک را در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت دچار اختلال می‌کنند. بنابراین، بررسی عملکرد روش پیشنهادی با در نظر گرفتن تأثیر المان‌های مذکور می‌تواند برای مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد.

ضمیمه

در این بخش اطلاعات سیستم قدرت مورد مطالعه و مقادیر پارامترهای روش پیشنهادی در شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌شود.

جدول (ض-۱) اطلاعات ترانسفورماتورهای قدرت

۵۰		۵۰		فرکانس شبکه	
Ynd01		Ynyn00		نوع اتصال	
۳۰		۱۶۰		توان نامی	
۰/۴		۰/۱۶		جریان تحریک (/.)	توالی مثبت
۱۴		۱۰۰			
۱۰۰		۰/۱۶		جریان تحریک (/.)	توالی صفر
۴۰۰۰		۱۰۰			
۶۴		۲۳۰		ولتاژ اولیه	
۲۱		۶۴		ولتاژ ثانویه	
۱۵۰		۹۶۰		توان (kW)	
۱۵		۱۲/۴۶		امپدانس توالی مثبت	
۱۵		۱۰/۵		امپدانس توالی منفی	
شار (وبر)		جریان (A)		شار (وبر)	
۱۶۵		۰/۰۰۳		۰	
۱۸۹		۷۱/۳۶		۸۴۱/۷۳۹	
۳۰۰		۱۵۹۱۵		۹۶۷/۳۷۴	
				۶۹۵/۶۵۲	
منحنی اشباع					

جدول (ض-۲) اطلاعات اجزای شبکه قدرت

اجزای شبکه		تست ترانسفورماتور قدرت ۱۶۰ MVA	تست ترانسفورماتور قدرت ۳۰ MVA
اطلاعات خط	Z_0	$۱/۴۵۰۵+۲/۹۶۸۰i$	$۰/۵۲۳۰+۲/۲۸i$
	Z_1	$۲/۶۱۵۰+۲/۲۸i$	$۰/۲۹۰۱+۰/۵۹۳۶i$
اطلاعات بار	ولتاژ	۶۳kV	۲۱kV
	توان	۱۶۰ MVA	۳۰ MVA
		اطلاعات منبع ولتاژ	۲۳۰ kV

جدول (۳-ض) مقادیر ضرایب روش پیشنهادی در تست‌های صورت گرفته

پارامترها	تست ترانسفورماتور قدرت MVA۱۶۰	تست ترانسفورماتور قدرت MVA۳۰
فرکانس نمونه‌برداری	۵ kHz	۵ kHz
K	۰/۴	۰/۴
I_{op}	۰/۰۵	۰/۰۵
F_{td}	۵۰۰	۵۰۰
I_{td}	۰/۰۷	۰/۰۷
VA_{td}	۶e-۴	۶e-۴
N	۵	۵
M	۴	۴

مراجع

- [١] IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers, IEEE Standard C37.91-2008, May 2008
- [٢] Kennedy L, Hayward C. Harmonic-current-restrained relays for differential protection. *Electrical Engineering*. 1938;57:262-71.
- [٣] Perez LG, Flechsig AJ, Meador JL, Obradovic Z. Training an artificial neural network to discriminate between magnetizing inrush and internal faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1994;9:434-41.
- [٤] M. Gómez-Morante and D. W. Nicoletti, "A wavelet-based differential transformer protection," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1351–1358, Oct. 1999.
- [٥] T. S. Sidhu and M. S. Sachdev, "On-line identification of magnetizing inrush and internal faults in three-phase transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 1885–1891, Oct. 1992.
- [٦] Ali E, Helal A, Desouki H, Shebl K, Abdelkader S, Malik OP. Power transformer differential protection using current and voltage ratios. *Electric Power Systems Research*. 2018 Jan 1;154:140-50.
- [٧] J. Ma, Y. Xu, Z. Wang and H. Liu, "A novel adaptive scheme of discrimination between internal faults and inrush currents of transformer using mathematical morphology," *IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006*, 2006.
- [٨] Ashrafian A, Vahidi B, Mirsalim M. Time-time-transform application to fault diagnosis of power transformers. *IET generation, transmission & distribution*. 2014;8:1156-67.
- [٩] Shin M-C, Park C-W, Kim J-H. Fuzzy logic-based relaying for large power transformer protection. *IEEE transactions on Power Delivery*. 2003;18:718-24
- [١٠] Hayward CD. Harmonic-current-restrained relays for transformer differential protection. *Electrical Engineering*. 1941 Jun;60(6):377-82
- [١١] Medeiros RP, Costa FB. A wavelet-based transformer differential protection: internal fault detection during inrush conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018;33:2965-77.
- [١٢] Medeiros RP, Costa FB. A wavelet-based transformer differential protection with differential current transformer saturation and cross-country fault detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017;33:789-99.
- [١٣] Huang, S. R., Chen, H. T., Wu, C. C., Guan, C. Y., & Cheng, C. (2012). Distinguishing internal winding faults from inrush currents in power transformers using Jiles-Atherton model parameters based on correlation coefficient. *IEEE transactions on power delivery*, 27(2), 548-553.
- [١٤] Dashti H, Sanaye-Pasand M. Power transformer protection using a multiregion adaptive differential relay. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013;29:777-85.
- [١٥] Ji T, He Q, Shi M, Li M, Wu Q. CT saturation detection and compensation using mathematical morphology and linear regression. 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia): IEEE; 2016. p. 1054-9.
- [١٦] Shah, A. M., Bhalja, B. R., & Patel, R. M. (2018). New protection scheme for power transformer based on superimposed differential current. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(14), 3587-3595.
- [١٧] German-Sallo Z, Strnad G. Machinery fault diagnosis using signal analysis. *Procedia Manuf*. 2019;32:585-90.
- [١٨] Maragos P, Kaiser JF, Quatieri TF. Energy separation in signal modulations with application to speech analysis. *IEEE transactions on signal processing*. 1993;41:3024-51.
- [١٩] ABB, "Transformer Protection RET670, Version 2.1 IEC: Technical Manual," March 2019
- [٢٠] Alestom, "Micom 63 Series Restricted Earth Fault Protection Application Guide," 2006
- [٢١] Siemens, "SIPROTEC Differential Protection 7UT6," V 4, 2003.

- [۲۲] Murugan SK, Simon SP, Sundareswaran K, Nayak PSR, Padhy NP. An empirical Fourier transform-based power transformer differential protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016;32:209-18.
- [۲۳] Y. V. V. S. Murty and W. J. Smolinski, "Design and implementation of a digital protection relay for a 3-phase power transformer based on Kalman filtering theory," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, no. 2, pp. 525–533, April 1988.
- [۲۴] Y. V. V. S. Murty and W. J. Smolinski, "A Kalman filter based digital percentage protection and ground fault relay for a 3-phase power transformer," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1299–1308, July 1990.
- [۲۵] P. L. Mao and R. K. Aggarwal, "A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transforms and neural network," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 654–660, Oct. 2001.
- [۲۶] Q. Zhang, S. Jiao and S. Wang, "Identification inrush current and internal faults of transformer based on hyperbolic S-transform," *IEEE Industrial Electronics and Applications* 2009, pp. 258–263, May 2009.
- [۲۷] Balaga H, Gupta N, Vishwakarma DN. GA trained parallel hidden layered ANN based differential protection of three phase power transformer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;67:286-97.
- [۲۸] O. A. S. Youssef, "Applications of fuzzy-logic-wavelet-based techniques for transformers inrush currents identification and power systems faults classification," *IEEE Power Systems Conference and Exposition*, pp. 553–559, Oct. 2004.
- [۲۹] Deshmukh, M. S., & Barhate, V. T. (2016, April). Transformer protection by distinguishing inrush and fault current with harmonic analysis using fuzzy logic. In *2016 IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)* (pp. 1-5). IEEE.
- [۳۰] Ozgonenel O, Karagol S. Power transformer protection based on decision tree approach. *IET Electric Power Applications*. 2014;8:251-6.
- [۳۱] Shah A, Bhalja BR. Discrimination between internal faults and other disturbances in transformer using the support vector machine-based protection scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013;28:1508-15.
- [۳۲] S. A. Saleh and M. A. Rahman, "Modeling and protection of a three-phase power transformer using wavelet packet transform," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1273–1282, April 2005.
- [۳۳] A. Ashrafiyan, M. Rostami and G. B. Gharehpetian, "Hyperbolic S-transform-based method for classification of external faults, incipient faults, inrush currents and internal faults in power transformers," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 10, pp. 940–950, 2012.
- [۳۴] Murugan SK, Simon SP, Nayak PSR, Sundareswaran K, Padhy NP. Power transformer protection using chirplet transform. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016;10:2520-30.
- [۳۵] Y. C. Kang, B. E. Lee and S. H. Kang, "Transformer protection relay based on the induced voltages," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, pp. 281–289, 2007.
- [۳۶] J. Ma and Z. Wang, "A novel algorithm for discrimination between inrush currents and internal faults based on equivalent instantaneous leakage inductance," *IEEE Power Engineering Society General Meeting* 2007, June 2007.
- [۳۷] A. A. H. Eldin and 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, pp. 19–24, 2011.
- [۳۸] Khalkhali B, Sadeh J. Transformer differential protection by online core modeling and orthogonal polynomials. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014;30:2146-53.
- [۳۹] Naseri, F., Kazemi, Z., Arefi, M. M., & Farjah, E. (2017). Fast discrimination of transformer magnetizing current from internal faults: An extended Kalman filter-based approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(1), 110-118.
- [۴۰] Rasoulpoor M, Banejad M. A correlation based method for discrimination between inrush and short circuit currents in differential protection of power transformer using discrete wavelet transform: theory, simulation and experimental validation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2013;51:168-77.

- [٤١] 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, July 1997.
- [٤٢] K. N. Al-Tallaq, "Discrimination between magnetizing inrush and fault currents in single-phase transformers using power method," in *Power Engineering (LESCOPE) 2004*, pp. 118–122, July 2004
- [٤٣] A. Hooshyar, S. Afsharnia, M. Sanaye-Pasand and B. M. Ebrahimi, "A new algorithm to identify magnetizing inrush conditions based on instantaneous frequency of differential power signal," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2223–2233, Oct. 2010.
- [٤٤] Jin, M., & Liu, Y. (2017, July). A new inrush current identification algorithm based on transformer core saturation. In *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting* (pp. 1-5). IEEE.
- [٤٥] J. Ma, Z. Wang, Y. Xu and H. Liu, "A new technique to identify internal faults and inrush currents using morphological gradient with adaptive filtering," *Power System Technology 2006*, Oct. 2006.
- [٤٦] Ma, J., Wang, Z., Zheng, S., Wang, T., & Yang, Q. (2013). A new algorithm to discriminate internal fault current and inrush current utilizing feature of fundamental current. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 36(1), 26-31.
- [٤٧] 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.
- [٤٨] H. K. Verma and A. M. Basha, "A microprocessor-based inrush restrained differential relay for transformer protection," *Journal of Microcomputer Applications*, vol. 9, pp. 313–318, 1986.
- [٤٩] H. K. Verma and A. M. Basha, "Microprocessor-based comprehensive relaying scheme for power transformer protection," *Electric Power Systems Research*, vol. 19, pp. 115–127, 1990..
- [٥٠] Moradi A, Madani SM. Predictive formulas to improve transformer protection during inrush current using the proposed DC equivalent circuit. *IEEE Trans on Power Deliv.* 2019;35:919-28.
- [٥١] Feng Z, Chu F, Zuo MJ. Time–frequency analysis of time-varying modulated signals based on improved energy separation by iterative generalized demodulation. *J. Sound Vib.* 2011;330:1225-43.
- [٥٢] Feng Z, Liang M, Zhang Y, Hou S. Fault diagnosis for wind turbine planetary gearboxes via demodulation analysis based on ensemble empirical mode decomposition and energy separation. *Renew. Energy.* 2012;47:112-26.
- [٥٣] Feng Z, Qin S, Liang M. Time–frequency analysis based on Vold-Kalman filter and higher order energy separation for fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions. *Renew. Energy.* 2016;85:45-56.
- [٥٤] Qin Y. Multicomponent AM–FM demodulation based on energy separation and adaptive filtering. *Mech. Syst. Signal Process.* 2013;38:440-59.
- [٥٥] Kaiser, J. F. (1990, April). On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal. In *International conference on acoustics, speech, and signal processing* (pp. 381-384). IEEE.
- [٥٦] Johns AT, Salman SK. *Digital protection for power systems*: IET; 1995.

Abstract

Differential protection is one of the most widely used protections in power transformers. One of the challenges associated with this scheme is distinguishing the inrush currents and overexcitation, and external faults from other internal disturbances. So far, various methods have been proposed to prevent the differential relay from mal-operation in the mentioned conditions, which are not necessarily simple to implement or do not guarantee the proper performance in all scenarios. This thesis proposes a new method based on the discrete energy separation algorithm to detect the inrush currents, overexcitation, and external faults from other internal and winding faults. The proposed method consists of two parts. The first part detects the external faults from internal disturbances, and the second part distinguishes the inrush currents and overexcitation from internal and winding faults. One of the advantages of this method is the parallel employment of these two parts in the logic of the method, which reduces the detection time. Also, several advantages, such as the high detection speed (1.5 ms), simple implementation, and low computational burden, make it possible to implement the proposed method in real-time. In order to evaluate the proposed method, the types of disturbances are simulated in EMTP software and analyzed in MATLAB software by considering the saturation of current transformers and noise conditions. The obtained results indicate the efficiency of the proposed method in detecting inrush current, overexcitation, and external faults from internal and winding faults, even in noisy conditions and saturation of the current transformer. Also, according to the obtained results, the proposed method has better speed, and accuracy than the harmonic restrain method, which is a common and widely used method in the industry.

Keywords: Differential protection, Discrete energy separation algorithm, Inrush current, Overexcitation, Power transformer.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical Engineering

MSc Thesis in Electrical Power System Engineering

**Identification of Inrush Current from Internal Fault using
Discrete-Time Energy Separation Algorithm**

By

Seyed Masood Lal Moosavi

Supervisor(s):

Dr. Mohsen Assili

Dr. Yaser Damchi

September 2021