

شناسایی جریان هجومی در ترانسفورمرهای قدرت با استفاده از تقریب خطی جریانهای تفاضلی توسط خط برگشت

بهادر فانی
دانشگاه صنعتی اصفهان
fani@ec.iut.ac.ir

محمد اسماعیل همدانی گلشن
دانشگاه صنعتی اصفهان
hgolshan@cc.iut.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک الگوریتم جدید مبتنی بر پردازش شکل موج جریان های تفاضلی برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورمر قدرت پیشنهاد می شود. این الگوریتم با در نظر گرفتن رفتار متفاوت شکل موج جریان های تفاضلی در طی زمان کوتاهی پس از وقوع شرایط هجومی و خطا بسط می یابد. در مرحله اول این روش، تقریب خطی نمونه های جریان تفاضلی موجود در نیم سیکل اول پس از وقوع اختلال توسط خط برگشت بدست می آید. در مرحله دوم، یک تابع تصمیم گیری برای تعیین نحوه توزیع نمونه های جریان تفاضلی در دو طرف خط برگشت حاصل از مرحله اول، تعریف می شود. با ارزیابی علامت توابع تصمیم گیری متناظر با جریان های تفاضلی سه فاز، همه انواع خطاهای داخلی حتی آنهایی که با جریان هجومی همزمان می شوند را می توان از شرایط جریان هجومی و پس از گذشت کمتر از نیم سیکل از وقوع اختلال تشخیص داد. عملکرد مناسب این الگوریتم با شبیه سازی حالت های مختلف خطا و کلیدزنی در یک سیستم قدرت نمونه ثابت شده است.

کلید واژه- حفاظت دیفرانسیل ترانسفورمر قدرت؛ جریان هجومی؛ جریان خطای داخلی؛ خط برگشت

۱. مقدمه

مبتنی بر تحلیل طیفی مدرن [۶]، الگوریتم های مبتنی بر ارزیابی علامت توابع معیار [۸ و ۷] پیشنهاد شده اند. در برخی از الگوریتم ها شرایط خطا از طریق مشخصات اعوجاج شکل موج جریان تفاضلی تشخیص داده می شود. معیار عملکرد در روش متداول بر اساس مدت زمانی است که شکل موج جریان تفاضلی نزدیک صفر می ماند [۹]. این روش در زمان اشباع ترانسفورمر جریان به علت کاهش عدم تقارن جریان هجومی کارایی خود را از دست می دهد. در نتیجه برخی الگوریتم های اصلاح شده مثل الگوریتم همبستگی کوتاه مدت [۱۰]، الگوریتم های همبستگی شکل موج [۱۱ و ۱۲]، الگوریتم مبتنی بر تخمین خطا [۱۳]، الگوریتم مبتنی بر اندوکتانس لحظه ای معادل [۱۴] جهت بدست آوردن نتایج تشخیص بهتر پیشنهاد شده است. دسته دیگری از الگوریتم های حفاظت دیفرانسیل از مدار معادل ترانسفورمر قدرت برای تشخیص نوع اختلال بهره می برند. الگوریتم تبدیل مودال [۱۵]، الگوریتم جریان جبران شده [۱۶]، الگوریتم توان حقیقی تفاضلی [۱۷]، الگوریتم مبتنی بر فلوی داخلی هسته [۱۸] از جمله این الگوریتم ها می باشند.

ترانسفورمرهای قدرت بزرگ دسته ای از اجزاء حیاتی و گران در سیستم های قدرت الکتریکی هستند. نیازهای متفاوت در حفاظت ترانسفورمرهای قدرت یعنی عملکرد سریع در شرایط خطا و امنیت کافی در شرایط غیر خطا موجب شده که کار حفاظت از ترانسفورمرهای قدرت بزرگ یکی از مشکل ترین مسایل در حوزه رله گذاری سیستم قدرت باشد [۱]. انواع الگوریتم های بکار رفته در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورمر قدرت را می توان به شکل زیر تقسیم بندی نمود.

دسته ای از الگوریتم های حفاظت دیفرانسیل مبتنی بر پردازش محتوای هارمونیک جریان های تفاضلی هستند. در روش متداول از اندازه هارمونیک دوم جریان تفاضلی استفاده می شود [۲]. با این وجود این روش نمی تواند نیازهای ترانسفورمرهای قدرت جدید موجود در سیستم های قدرت تکامل یافته را تأمین کند. برای اصلاح عملکرد این دسته از الگوریتم ها برخی الگوریتم های جدید مثل الگوریتم محدودیت ولتاژ [۳]، الگوریتم هارمونیک دوم مختلط [۴]، الگوریتم هارمونیک سوم مجازی [۵]، الگوریتم

روش را با استفاده از شکل های (۱) و (۲) توضیح می دهیم. شکل های (۱-الف) و (۲-الف) به ترتیب نمونه هایی از سیکل اول یک جریان هجومی و یک جریان خطای داخلی که نسبت به اولین پیک خود نرمالیزه شده اند، را نشان می دهد. چنانچه از شکل (۱-الف) مشاهده می شود با توجه به اینکه جریان هجومی مغناطیس کنندگی با اشباع هسته ترانسفورمر متناظر می باشد شکل موجی بصورت مخروطی شکل (غیر سینوسی) دارد. از طرف دیگر مطابق شکل (۲-الف) با توجه به ماهیت متفاوت جریان خطا، شکل موج آن رفتاری مشابه با شکل موج سینوسی دارد. با توجه به اینکه این مشخصه ها از ماهیت متفاوت این دو نوع جریان ریشه می گیرد و با تغییر پارامترهای ترانسفورمر و سیستم قدرتی که ترانسفورمر در آن قرار دارد متأثر نمی شوند می توان از آنها به عنوان اساس الگوریتم تشخیص خطا از شرایط جریان هجومی استفاده نمود.

۲-۲- اجزاء اصلی روش

(۱) تقریب خطی شکل موج جریان تفاضلی با استفاده از خط برگشت: در شکل های (۱-الف) و (۲-الف) تقریب خطی جریان های تفاضلی از شروع اختلال تا زمان وقوع اولین پیک پس از وقوع اختلال توسط خط برگشت نشان داده شده است. جهت بدست آوردن خط برگشت از روش کمترین توانهای دوم استفاده شده است. در این روش ابتدا یک مدل خطی برای نمونه های جریان تفاضلی بصورت تابع خطی نشان داده شده در رابطه (۱) در نظر گرفته می شود.

$$y = a + bx \quad (1)$$

سپس برای اینکه این مدل خطی تقریب خوبی برای این نمونه ها باشد، مجموع توان دوم خطاها، یعنی رابطه (۲) که تابعی از a و b می باشد، حداقل می شود.

$$A(a, b) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (2)$$

و نهایتاً اینکه برخی از الگوریتم های حفاظت دیفرانسیل از مزیت های تبدیل موجک در تحلیل سیگنال گذرا و استخراج ویژگی [۱۹] یا از شبکه های عصبی و فازی [۲۰ و ۲۱] استفاده می کنند.

اکثر الگوریتم های ارائه شده، فاقد برخی از ویژگی های مورد نیاز جهت حفاظت دیفرانسیل ترانسفورمر قدرت هستند. مثلاً الگوریتم های مبتنی بر آشکار سازی اعوجاج شکل موج جریانهای تفاضلی تأخیر ذاتی بیش از یک سیکل دارند. در بسیاری از این الگوریتم ها از سیگنال ولتاژ نیز استفاده شده است. تقریباً تمامی الگوریتم های پیشنهادی نیازمند انتخاب آستانه می باشند. برخی از این الگوریتم ها قادر به تشخیص خطاهایی که با جریان هجومی همراه می شوند، نیستند. تعدادی از روشهای بکار رفته از الگوریتمهای با محاسبات طولانی استفاده می کنند یا مثل الگوریتمهای عصبی و فازی به شمار زیادی از الگوهای آموزشی نیاز دارند. با در نظر گرفتن مسائل فوق، در این مقاله یک الگوریتم جدید مبتنی بر پردازش شکل موج جریان های تفاضلی برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورمر قدرت پیشنهاد می شود. این الگوریتم با در نظر گرفتن رفتار متفاوت شکل موج جریان های تفاضلی در طی زمان کوتاهی پس از وقوع شرایط هجومی و خطا بسط می یابد. در مرحله اول این روش، تقریب خطی نمونه های جریان تفاضلی موجود در نیم سیکل اول پس از وقوع اختلال توسط خط برگشت بدست می آید. در مرحله دوم، یک تابع تصمیم گیری برای تعیین نحوه توزیع نمونه های جریان تفاضلی در دو طرف خط برگشت حاصل از مرحله اول، تعریف می شود. با ارزیابی علامت تابع تصمیم گیری متناظر با جریان های تفاضلی سه فاز، همه انواع خطاهای داخلی حتی آنهایی که با جریان هجومی همزمان می شوند را می توان از شرایط جریان هجومی و پس از گذشت کمتر از نیم سیکل از وقوع اختلال تشخیص داد.

۲-۲- تشخیص جریان هجومی از شرایط خطای داخلی با استفاده از تقریب خطی شکل موج جریان تفاضلی

۲-۱- مبنای روش

روش جدید تشخیص جریان هجومی از شرایط خطای داخلی مبتنی بر رفتار متفاوت این دو شکل موج در طی زمان کوتاهی پس از وقوع اختلال است. مبنای اصلی این

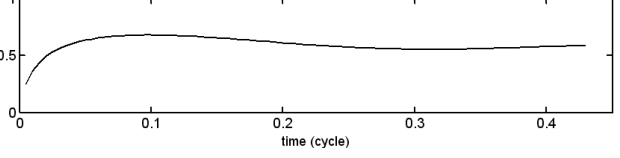
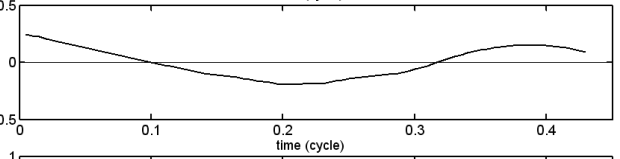
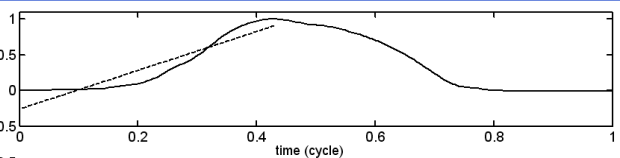
(۲) تعریف تابع تصمیم گیری: همانطوری که از شکل های (۱-الف) و (۲-الف) مشاهده می گردد توزیع نمونه های جریان تفاضلی در دو طرف خط برگشت در حالت های هجومی و خطا متفاوت است. برای مشخص نمودن این تفاوت تابع زیر را تحت عنوان تابع تشخیص در نظر می گیریم.

$$DF_j(n) = i_{d,j}(n) - (a_j + b_j n), \quad j = a, b, c \quad (۴)$$

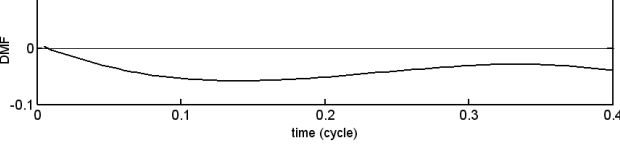
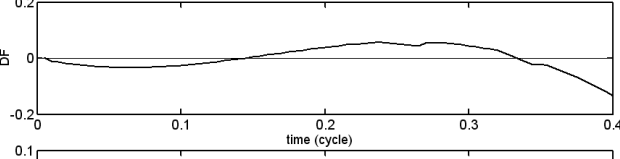
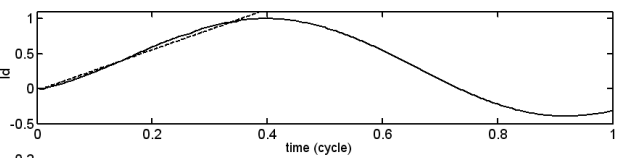
در رابطه فوق $i_{d,j}(n)$ نمونه n ام جریان تفاضلی و $(a_j + b_j n)$ تقریب نمونه n ام جریان تفاضلی با استفاده از خط برگشت را برای فاز j ام نشان می دهد. با بکارگیری این تابع تشخیص نحوه توزیع نمونه های جریان تفاضلی در دو طرف خط برگشت مشخص می گردد. توابع DF در حالت های هجومی و خطا در شکل (۱-ب) و (۲-ب) نشان داده شده اند. مشاهده می شود که نحوه توزیع نمونه های جریان تفاضلی و یا علامت تابع DF در حالت های هجومی و خطا در آغاز اختلال متفاوت هستند. بعلاوه علامت تابع DF پس از گذشت زمانی از وقوع اختلال تغییر می کند. برای اینکه با گذشت زمان علامت این تابع با تغییر نحوه توزیع نمونه ها تغییر نکند و همچنان مطابق با رفتار ابتدای اختلال باشد، تابع زیر را تحت عنوان تابع تصمیم گیری تعریف می کنیم.

$$DMF_j(n) = \sum_{h=1}^n \frac{DF_j(h)}{h}, \quad j = a, b, c \quad (۵)$$

عبارت h در مخرج کسر یک ضریب وزن دهی است که به منظور حذف اثر معکوس شدن علامت تابع DF با افزایش زمان بکار می رود. در واقع تابع تصمیم گیری DMF بصورت مجموع وزن داده شده مقادیر DF از زمان وقوع اختلال تا زمان فعلی تعریف می شود. شکل های (۱-ج) و (۲-ج) توابع DMF را نشان می دهند. علامت تابع DMF به عنوان ملاک عملکرد رله دیفرانسیل در روش پیشنهادی جدید استفاده می شود. مثبت بودن علامت DMF به معنی جاری شدن جریان هجومی است. در نتیجه باعث توقف عملکرد رله می شود. اما منفی بودن DMF نشان دهنده وقوع یک خطای داخلی است و باعث ارسال یک سیگنال تریپ از سوی رله می گردد.



شکل ۱: (الف) شکل موج جریان هجومی به همراه تقریب خطی نیم سیکل اول توسط خط برگشت (ب) تابع تشخیص (ج) تابع تصمیم گیری



شکل ۲: (الف) شکل موج جریان خطا به همراه تقریب خطی نیم سیکل اول توسط خط برگشت (ب) تابع تشخیص (ج) تابع تصمیم گیری

با حداقل کردن $A(a,b)$ و a و b از رابطه (۳) بدست می آیند.

$$\begin{cases} b = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \\ a = \bar{y} - b\bar{x} \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

می باشند.

سیستم های متصل به خطوط ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلو ولت، امکان در نظر گرفتن اثر سیستم قوی و ضعیف روی جریانهای خطا و هجومی با تغییر قدرت اتصال کوتاه سیستم های قدرتی که توسط معادل تونن ایشان مدل شده اند، وجود دارد. ترانسفورمر سه فاز از سه ترانسفورمر تکفاز تشکیل شده است. سیم پیچی های دو طرف بصورت ستاره زمین شده متصل شده اند. البته امکان تغییر اتصال سیم پیچی های دو طرف و همچنین بکارگیری یک ترانسفورمر سه فاز با هسته سه ستونی نیز وجود دارد. برای مدل کردن اشباع هسته ترانسفورمر، شاخه تحریک در مدار معادل ترانسفورمر بصورت یک منحنی غیرخطی مدل می شود. با تغییر پارامترهای این منحنی همچون ولتاژ نقطه خم و جریان تحریک متناظر با نقطه خم می توان جریانهای هجومی با مشخصه های مختلف را بدست آورد. ترانسفورمرهای جریان مربوط به حفاظت دیفرانسیل نیز با جزئیات مدل شده اند بطوریکه اثر پاسخ گذرای آنها به جریانهای ورودی ایشان روی عملکرد الگوریتم های حفاظت دیفرانسیل در نظر گرفته می شود.

۴- نتایج بکارگیری الگوریتم روی حالتهاى مختلف جریان خطا و جریان هجومی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم، حالتهاى مختلفی از جریان هجومی و جریان خطا شبیه سازی شد. شبیه سازی حالتهاى مختلف جریان هجومی با تغییر پارامترهای اصلی مؤثر روی مشخصه های این جریان یعنی اندازه فلوی باقیمانده در هسته ترانسفورمر، زاویه ولتاژ فاز A منبع که روی آن کلیدزنی انجام می شود، کلیدزنی در شرایط باز یا بسته بودن ثانویه ترانسفورمر، قوی یا ضعیف بودن منبع متصل شده به ترانسفورمر و ولتاژ نقطه خم مشخصه مغناطیسی هسته انجام شد.

۳) معیار تشخیص جریان هجومی از شرایط خطای داخلی: با توجه به اینکه کلیدزنی و در نتیجه اتصال ترانسفورمر به منبع ولتاژ روی هر نقطه از شکل موج ولتاژ منبع امکان دارد و از طرفی مقدار فلوی باقیمانده موجود در ساقهای هسته متناظر با هر فاز در لحظه کلیدزنی یک متغییر تصادفی است، امکان دارد در برخی از حالتهاى کلیدزنی جریان برخی از فازها بواسطه اشباع نرفتن ساق هسته متناظر با آن از نوع جریان هجومی نباشد. از طرفی به هنگام وقوع خطا، با توجه به نوع خطا و همچنین وجود خط طولانی متصل به باس ترانسفورمر، امکان دارد که در برخی از حالتها، تابع تصمیم گیری محاسبه شده برای برخی از فازها مقداری مثبت داشته باشد. بنابراین لازم است با انجام شبیه سازی انواع شرایط خطا و جریان هجومی معیاری برای تشخیص این شرایط از یکدیگر با استفاده از توابع تصمیم گیری محاسبه شده برای سه فاز بدست آید. با توجه به شبیه سازیهای متعدد و متنوع انجام شده، این معیار به این صورت بدست آمد که اگر حداقل علامت دو تا از توابع تصمیم گیری منفی باشد، آنگاه خطا رخ داده است در غیر این صورت جریان از نوع هجومی است. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است.

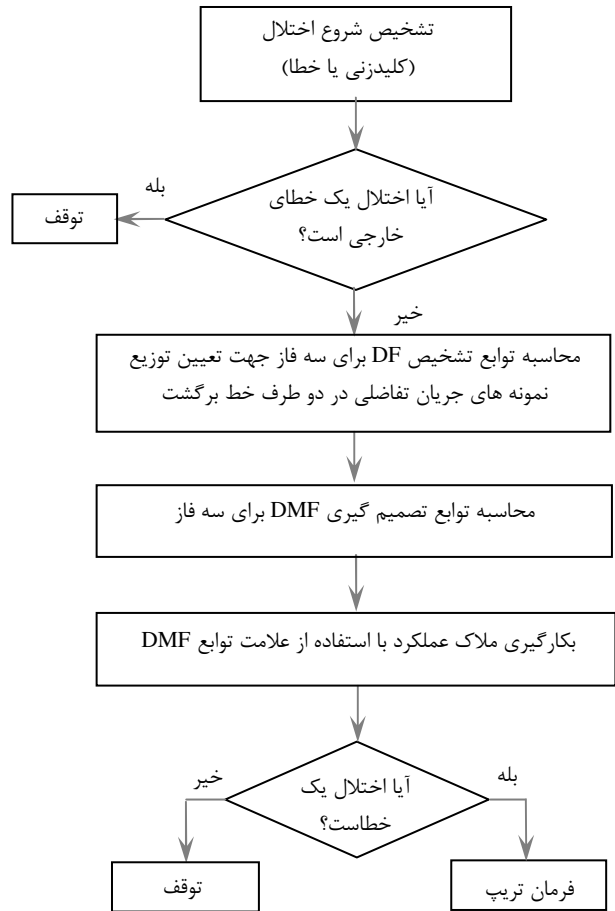
۳- سیستم قدرت مورد مطالعه

به منظور بررسی عملکرد روشهای تشخیص جریان خطا از جریان هجومی لازم است با انتخاب یک سیستم قدرت مناسب عوامل اصلی تأثیر گذار در رفتار جریان هجومی و جریان خطا در نظر گرفته شوند. به این منظور سیستم قدرتی که دیگرگرام آن در شکل (۴) نشان داده شده است را در PSCAD/EMTDC مدل کرده ایم. این سیستم شامل یک ترانسفورمر قدرت ۵۰۰ MVA، ۴۰۰/۲۳۰ kV است که از طریق دو خط ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلو ولت به بقیه سیستم قدرت متصل شده است. سیستم های قدرت متصل به این خطوط توسط معادل تونن ایشان مدل شده اند. علاوه بر دو خط ذکر شده، یک خط ۴۰۰ kV بلند دیگر به باس ولتاژ زیاد ترانسفورمر متصل است. وجود این خط باعث اعوجاج شکل موج جریان خطا می شود. به منظور در نظر گرفتن تأثیر دقیق پارامترهای توزیع شده خط روی شکل موجهای جریان هجومی و خطا، خطوط با استفاده از پارامترهای توزیع شده مدل شده اند. با تغییر قدرت اتصال کوتاه

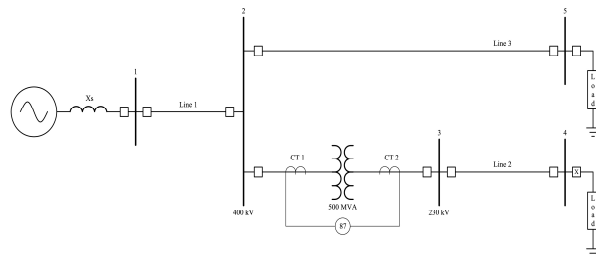
درصدی از فلوی نامی نشان می دهد. ستون دوم جدول مربوط به زاویه ولتاژ فاز A منبع در لحظه کلیدزنی است. ستون سوم مشخص می کند که جریان تفاضلی مورد بررسی مربوط به کدام فاز است. ستونهای چهارم و پنجم نیز مشخص می کنند که در لحظه وقوع جریان هجومی، ثانویه ترانسفورمر باز یا بسته بوده است. در هر یک از دو حالت بی باری و بارداری، اثر قوی بودن یا ضعیف بودن سیستم قدرت و همچنین اثر تغییر چگالی فلوی نقطه خم مشخصه مغناطیسی هسته ترانسفورمر بررسی شده اند. همچنین نتایج بکارگیری الگوریتم پیشنهادی برای شرایط خطای داخلی در جدول (۲) ارایه شده اند. ستونهای دوم و سوم این جدول به ترتیب مربوط به حالت‌های شبیه سازی اتصال کوتاه ها بدون حضور و با حضور خط انتقال طولانی می باشد. برای هر کدام از این دو حالت کلی، شبیه سازی انواع خطاها برای حالت بارداری و بی باری سیستم قدرت انجام شده است.

علاوه بر حالت‌های جریان خطا و جریان هجومی فوق لازم است عملکرد الگوریتم در شرایطی که کلیدزنی برای ترانسفورمر معیوب انجام می شود نیز در نظر گرفته شود. به این منظور در جدول (۳)، حالت مختلف از همزمان شدن شرایط هجومی و خطای داخلی لحاظ شده اند. سطرهای اول و دوم این جدول به ترتیب حالت کلیدزنی و خطا را نشان می دهند. نماد i, z در این دو سطر بیانگر سطر i ام و ستون z ام از جدول (۱) یا (۲) می باشد. از جداول (۱)، (۲) و (۳) ملاحظه می شود که در همه حالت‌های مورد مطالعه، الگوریتم بطور صحیح عمل می کند. در اکثر موارد، علامت توابع تصمیم گیری سه فاز در زمان نیم سیکل پس از وقوع اختلال در شرایط جریان هجومی مثبت و در شرایط خطا منفی هستند. اگرچه در برخی از حالت‌های خاص حداقل علامت دو تابع تصمیم گیری برای جریان هجومی مثبت و حداقل علامت دو تابع تصمیم گیری برای جریان خطا منفی است.

جهت بررسی بیشتر و همچنین مقایسه این الگوریتم با الگوریتم های متداول حفاظت دیفرانسیل، شکل (۵) حالتی از جریان هجومی را نشان می دهد که محتوای هارمونیک آن بخاطر چگالی فلوی اشباع بالای ترانسفورمر کمتر از ۱۵٪ می باشد. بنابراین رله مبتنی بر محدودیت هارمونیک



شکل ۳: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



شکل ۴: سیستم قدرت مورد مطالعه

حالت‌های مختلف جریان خطا نیز با در نظر گرفتن عوامل اصلی مؤثر روی مشخصه های این جریان همچون وجود یا عدم وجود خط انتقال طولانی، نوع خطا و حالت باز یا بسته بودن ثانویه ترانسفورمر شبیه سازی شد.

خلاصه نتایج بکارگیری الگوریتم پیشنهادی برای شرایط جریان هجومی در جدول (۱) ارایه شده است. این جدول علامت توابع تصمیم گیری فازهای مختلف در زمان نیم سیکل پس از وقوع اختلال را برای حالت‌های مختلف نشان می دهد. ستون اول این جدول اندازه فلوهای باقیمانده در هسته ترانسفورمرهای تکفاز در لحظه کلیدزنی را بصورت

۵. نتیجه گیری

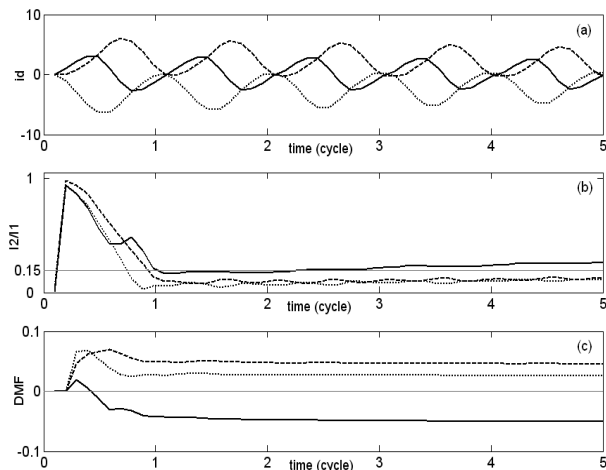
در این مقاله یک الگوریتم جدید برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورمر قدرت ارائه شد. این روش جدید مبتنی بر رفتارهای متفاوت شکل موجهای جریانهای هجومی و خطا در طی نیم سیکل اول پس از وقوع اختلال است. برای این منظور در مرحله اول تقریب خطی نمونه های جریان تفاضلی موجود در نیم سیکل اول پس از وقوع اختلال توسط خط برگشت بدست آمد. در مرحله دوم، یک تابع تصمیم گیری جهت تعیین نحوه توزیع نمونه های جریان تفاضلی در دو طرف خط برگشت بدست آمده از مرحله اول، تعریف شد. با ارزیابی علامت توابع تصمیم گیری برای سه فاز نوع اختلال تشخیص داده می شود. عملکرد مناسب این الگوریتم با شبیه سازی حالت های مختلف خطا و کلیدزنی در یک سیستم قدرت نمونه ثابت شد.

مراجع

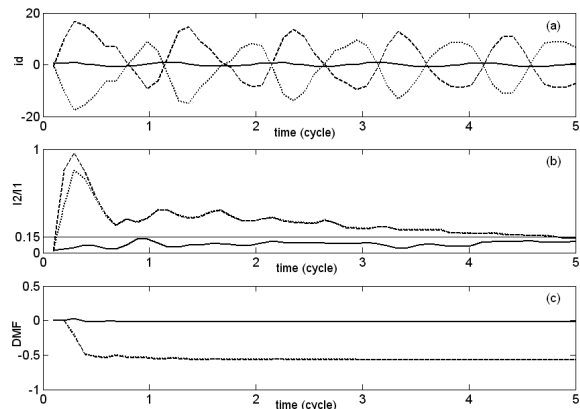
- [1.] B. Kasztenny, and A. Kulidjian, "An improved transformer inrush restraint algorithm increases security while maintaining fault response performance", *53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, GE Power Management*, pp. 1-27, 2000.
- [2.] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouryal, and H. J. Altuve, "A current-based solution for transformer differential protection—part I: problem statement", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 16, No. 4, pp. 485-491, 2001.
- [3.] P. Liu, O. P. Malik, D. Chen, G. S. Hope, and Y. Guo, "Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 7, No. 4, pp. 1912-1918, 1992.
- [4.] A. Kulidjian, B. Kasztenny, and B. Campbell, "New magnetizing inrush restraining algorithm for power transformer protection", *IEE, Developments in Power System Protection, Conference Publication*, pp. 181-184, 2001.
- [5.] Y. Hu, D. Chen, X. Yin, and Z. Zhang, "A novel theory for identifying transformer magnetizing inrush current", *IEEE, Power System Technology Conference*, pp. 1411-1415, 2002.
- [6.] H. Zhang, P. Liu and O. P. Malik, "A new scheme for inrush identification in transformer protection", *Electric Power Systems Research*, Vol. 63, pp. 81-86, 2002.
- [7.] M. E. Hamedani Golshan, S. M. Saghajanian, S. A. Saha and H. Samet, "A new method for recognizing internal faults from inrush current conditions in digital differential" *Protection of power transformers, Electric Power Syst. Res*, Vol. 71, pp. 61-71, 2004.

دوم تحت این شرایط کلید زنی عمل خواهد کرد. اما چون حداقل توابع تصمیم گیری محاسبه شده برای دو فاز مثبت است، الگوریتم پیشنهادی از ارسال سیگنال تریپ ممانعت می کند.

شکل (۶) حالتی از جریانهای خطا با محتوای هارمونیک دوم بالا در حضور خط انتقال بلند (خط ۳) را که برای مدت زمان طولانی پس از رخ دادن اختلال جاری می شوند، را نشان می دهد. در چنین حالتی الگوریتم مبتنی بر محدودیت هارمونیک دوم نمی تواند در زمان قابل قبولی فرمان تریپ را صادر کند. اما همانطوری که مشاهده می گردد الگوریتم پیشنهادی در حدود نیم سیکل پس از وقوع اختلال عمل خواهد کرد.



شکل ۵: (الف) نمونه ای از جریان های هجومی با محتوای هارمونیک پایین (ب) نسبت هارمونیک دوم به اول این جریانها (ج) توابع تصمیم گیری برای این جریانها



شکل ۶: (الف) نمونه ای از جریان های خطا با محتوای هارمونیک بالا (ب) نسبت هارمونیک دوم به اول این جریانها (ج) توابع تصمیم گیری برای این جریانها

technique for discrimination between inrush current and internal faults in power transformers”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 20, No. 4, pp. 2473-2482, 2005.

[15]. T. S. Sidhu and M. S. Sachdev, “On line identification of magnetizing inrush and internal faults in three phase transformers”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 7, No. 4, pp. 1885-1890, 1992.

[16]. Y. C. Kang, E. S. Jin, S. H. Kang and P. A. Crossley, “Compensated-current differential relay for protection of transformers”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 151, No. 3, pp. 281-289, 2004.

[17]. K. Yabe, “Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 12, No. 3, pp. 1109-1117, 1997.

[18]. Y. C. Kang, B. E. Lee, S. H. Kang and P. A. Crossley, “Transformer protection based on the increment of flux linkages”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 151, No. 4, pp. 548-554, 2004.

[19]. S. A. Saleh and M. A. Rahman, “Modeling and protection of a three-phase power transformer using wavelet packet transform”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 20, No. 2, pp. 1273-1282, 2005.

[20]. M. Tripathy, R. P. Maheshwari and H. K. Verma, “Radial basis probabilistic neural network for differential protection of power transformer”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 2, No. 1, pp. 43-52, 2008.

[8]. M. E. Hamedani Golshan and H. Samet, “A new differential protection algorithm base on rising rate variation of second harmonic current”, *Iranian Journal of science & Technology, Trans. B, Engineering*, Vol. 30, pp. 643-654, 2006.

[9]. A. Giuliante and G. Clough: “Advances in the design of differential protection for power transformers”, in: *Proceedings of the 1991 Georgia Technical Protective Relaying Conference, Atlanta*, pp. 1-12, 1991.

[10]. H. Zhang, J. F. Wen and O. P. Malik, “Discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers using short-time correlation transform”, *Electrical Power and Energy systems*, Vol. 24, pp. 557-562, 2002.

[11]. X. Lin, P. Liu, P., and O. P. Malik, Studies for “identification of the inrush based on improved correlation algorithm”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 17, No. 4, pp. 901-906, 2002.

[12]. D.Q. Bi, X.A. Zhang, H. H. Yang, G.W. Yu, X. H. Wang, and W. J. Wang, “Correlation analysis of waveforms in nonsaturation zone-based method to identify the magnetizing inrush in transformer”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 22, No. 3 pp. 1380-1385, 2007.

[13]. B. He, X. Zhang and Z. Q. Bo, “A new method to identify inrush current based on error estimation”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 21, No. 3 pp. 1163-1168, 2006.

[14]. B. Ge, T. A. Anibal, Q. Zheng and X. Wang, “An equivalent instantaneous inductance-based

جدول ۱: نتایج الگوریتم پیشنهادی برای حالت‌های مختلف جریان هجومی

فلوی پسماند	زاویه کلیدزنی	فاز	کلید X بسته				کلید X باز			
			منبع قوی		منبع ضعیف		منبع قوی		منبع ضعیف	
			پایین*	بالا*	پایین	بالا	پایین	بالا	پایین	بالا
$B_{r1a}=0$	0	a	+	+	+	+	+	+	+	+
		b	+	+	+	-	+	+	+	-
		c	+	+	+	+	+	+	+	+
$B_{r1b}=0$	72	a	+	+	+	+	+	+	+	+
		b	+	+	+	+	+	-	+	-
		c	+	+	+	+	+	+	+	+
$B_{r1c}=0$	0	a	+	+	+	+	+	+	+	+
		b	+	+	+	+	+	+	+	+
		c	+	+	+	+	+	+	+	+
$B_{r1c}=-0.6 B_s$	72	a	+	+	+	+	+	+	+	+
		b	+	+	+	+	+	+	+	+
		c	+	+	+	+	+	+	+	+

*چگالی فلوی اشباع

جدول ۲: نتایج الگوریتم پیشنهادی برای حالت‌های مختلف جریان خطا

بایدون خط انتقال طولانی	زاویه خطا	فاز	کلید X بسته				کلید X باز			
			نوع خطا				نوع خطا			
			a-g	a-b	a-b-g	a-b-c	a-g	a-b	a-b-g	a-b-c
با خط انتقال طولانی	0	a	-	-	-	-	-	-	-	-
		b	-	-	-	-	-	-	-	-
		c	+	-	-	-	-	-	-	-
	72	a	-	-	-	-	-	-	-	-
		b	-	-	-	-	-	-	-	-
		c	+	-	-	-	+	-	-	-
بدون خط انتقال طولانی	0	a	-	-	-	-	-	-	-	
		b	-	-	-	-	-	-	-	
		c	-	-	-	-	-	-	-	
	72	a	-	-	-	-	-	-	-	
		b	-	-	-	-	-	-	-	
		c	-	-	-	-	-	-	-	

جدول ۳: نتایج الگوریتم برای حالت‌های مختلف جریان خطا به همراه جریان هجومی

حالت کلیدزنی	(1,1)	(2,2)	(3,3)	(4,4)	(4,2)	(4,8)
حالت خطا	(1,1)	(2,2)	(3,3)	(4,4)	(3,2)	(3,7)
a	-	-	-	-	-	-
b	-	-	-	-	-	-
c	+	-	-	-	-	-