تشخیص بین جریان خطای داخلی و جریان هجومی در ترانسفورماتور با استفاده از روش آشوب

ابوالفضل جلیلوند[1] بهزاد فرائدی[2]

۱- دانشیار- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان- زنجان- ایران

ajalilvand@znu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد- شرکت ایران ترانسفو- زنجان - ایران

behzad_faraedi@yahoo.com

چکیده: در این مقاله یک روش جدید برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. در این روش از تکنیک آشوب برای شناسایی جریان هجومی از جریان خطای داخلی ترانسفورماتور استفاده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی بر اساس آنالیز مؤلفه‌های هارمونیکی جریان تفاضلی ناشی از جریان خطای داخلی و جریان هجومی در یک باند فرکانسی خاص طراحی شده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی یک ترانسفورماتور قدرت ۲۳۰/۶۳ کیلوولت متصل به شبکه قدرت ۲۳۰ کیلوولت، تحت شرایط مختلف کلیدزنی و خطای داخلی در محیط نرم‌افزار EMTP/ATP مدل‌سازی شده است. سپس اطلاعات حاصل از شبیه-سازی، در محیط MATLAB/SIMULINK، به‌منظور اعمال تئوری آشوب جهت تشخیص جریان هجومی از جریان خطاهای داخلی استفاده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر عملکرد موفقیت‌آمیز الگوریتم پیشنهادی است.

کلمات کلیدی: حفاظت دیفرانسیل، ترانسفورماتورهای قدرت، جریان هجومی، جریان خطا، تئوری آشوب، اسیلاتور دافینگ

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۳/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله : ۱۳۹۴/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر ابوالفضل جلیلوند

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – زنجان – کیلومتر ۶ جاده تبریز – دانشگاه زنجان – دانشکده‌ی مهندسی – گروه مهندسی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

۱- مقدمه

حفاظت الکتریکی ترانسفورماتورهای قدرت به‌عنوان یکی از مهمترین اجزای سیستم قدرت که در معرض اغتشاشات مختلف از جمله انواع خطاهای داخلی و جریان کلیدزنی قرار دارند، از اهمیت فراوانی برخوردار است. بنابراین طراحی یک سیستم حفاظتی مناسب جهت تشخیص خطا قبل از اینکه آسیب جدی به ترانسفورماتور برسد، یک مسئله مهم در کیفیت سیستم قدرت محسوب می‌شود. در طراحی بایستی مواردی که عملکرد رله برای حفاظت از تجهیزات نیاز نیست، مورد توجه قرار گیرند. یکی از این موارد که کار حفاظت دیجیتال ترانسفورماتور قدرت را مشکل‌ساز می‌کند وجود مسئله جریان هجومی در لحظه وصل ترانسفورماتور به شبکه است که عملکرد رله دیفرانسیل را در تشخیص جریان خطای داخلی از جریان هجومی، مختل می‌سازد. در حالت دائم، رابطه مشخصی بین ولتاژ، جریان و فرکانس ترانسفورماتور برقرار است. اگر ثانویه ترانسفورماتور مدار باز باشد، جریان تحریک در آن کسری از جریان نامی است. حال اگر یک یا چند کمیت که ولتاژ ترانسفورماتور را تعیین می‌کند تغییر کند، بین حالت اولیه یعنی لحظه کلیدزنی اولیه ترانسفورماتور و حالت دائم، حالت گذرا پدید می‌آید که ممکن است دامنه جریان تحریک به ۴ الی ۶ برابر جریان بار کامل برسد که این امر به عنوان پدیده کلیدزنی یا پدیده هجومی مطرح بوده و در صورت عملکرد رله‌های دیفرانسیلی در حین وقوع جریان هجومی می‌تواند تأثیر نامطلوبی بر اجزای ترانسفورماتور از قبیل عایق و سیم‌پیچی‌ها داشته و سبب کاهش عمر ترانسفورماتور شود [۲-۱]. اندازه، ویژگی مغناطیسی هسته، شار پسماند هسته، لحظه کلیدزنی، مسیر و طریقه برق‌دار کردن ترانسفورماتور و امپدانس سیستمی که ترانسفورماتور از طریق ان برق‌دار شده است، از عوامل مؤثر در جریان هجومی می‌باشند [۳].

بخش عمده‌ای از روش‌های تشخیص خطا در حفاظت دیفرانسیلی ترانسفورماتورها، مبتنی بر هارمونیک جریان تفاضلی هستند. بدین ترتیب که در اکثر این روش‌ها اگر نسبت دامنه هارمونیک دوم (پنجم) به مؤلفه اصلی جریان تفاضلی از یک مقدار از پیش تعیین شده، تجاوز کند، جریان هجومی تشخیص داده شده و سیستم حفاظتی عمل نخواهد کرد. در غیر این صورت وضعیت پیش آمده، خطای داخلی محسوب خواهد شد. تغییر ساختار مواد مورد استفاده در هسته و کاهش هارمونیک دوم جریان هجومی و امکان تولید هارمونیک دوم جریان خطا با دامنه نزدیک یا بزرگتر از مقدار موجود در جریان هجومی، باعث عملکرد نادرست و نابجای رله شده و این امر سبب کاهش کارآیی روش‌های مبتنی بر هارمونیک دوم شده است [۳]. علاوه بر روش‌های مبتنی بر هارمونیک، تاکنون روش‌های دیگری نیز توسط محققین مختلف جهت تشخیص خطای داخلی و تمییز از جریان هجومی در رله‌های دیفرانسیلی ارائه شده است. روش‌هایی مانند تشخیص الگو به کمک شبکه‌های عصبی، سیستم‌های فازی، تبدیل موجک، روش فوریه و .... از این جمله هستند [۴-۷]. اکثر این روش‌ها به الگوریتم پیچیده‌ای نیاز دارند تا بتوانند محاسبات مورد نیاز را انجام دهند.

در این مقاله یک روش جدید مبتنی بر آنالیز شکل موج جریان تفاضلی با استفاده از تئوری آشوب و اسیلاتور دافینگ [۸] ارائه گردیده است. در این روش با اعمال سیگنال جریان تفاضلی به اسیلاتور دافینگ و بررسی تغییر حالت اسیلاتور از آشوبناک به منظم، وضعیت موجود سیستم (بین خطای داخلی و جریان هجومی) تشخیص داده می‌شود.

۲- تئوری آشوب و اسیلاتورهای آشوبناک

تئوری آشوب از شاخه‌های جدید و جذاب علم است که مدل‌هایی با رفتارهایی تصادفی و ناگهانی را تحلیل می‌کند. آشوب با متمرکز شدن بر روی رفتار ناپایدار و غیرمنظم سیستم، مطالعه کمی و عددی انجام می‌دهد. یک ویژگی متمایزکننده سیستم‌هایی که با تئوری آشوب مورد مطالعه قرار می‌گیرند، بروز رفتار غیر نوسانی ناپایدار در سیستم-های ریاضی ساده است. از آنجا که آشوب فقط در سیستم‌های غیرخطی رخ می‌دهد لذا باید ابتدا غیرخطی بودن سیستم را تشخیص داده و سپس به مطالعه آشوب پرداخت. اسیلاتور غیرخطی از سیستم-های غیرخطی معروف می‌باشد که معادله آن به‌صورت زیر است.

$$\frac{d^2x}{dt^2} - x + \varepsilon h\left(x, \frac{dx}{dt}\right) = 0 \qquad (۱)$$

در رابطه فوق تابع $h\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$ جمله غیرخطی است. با انتخاب $h\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$ برابر x^3 و $\varepsilon = 1$ در رابطه(۱)، رابطه حاصل مشخص‌کننده معادله دافینگ اغتشاش نیافته می‌باشد. حال اگر به معادله حاصل چندجمله ای $-\delta\frac{dx}{dt} + \gamma\cos(t)$ اضافه گردد معادله دافینگ اغتشاش‌یافته حاصل می شود. رابطه (۲) حالت کلی معادله اسیلاتور دافینگ[۶] را بیان می‌کند.

$$\frac{d^2x}{dt^2} - x + x^3 + \delta\frac{dx}{dt} = \gamma\cos(t) \qquad (۲)$$

که در آن δ نرخ میرایی[۷] و $\gamma\cos(t)$ نیروی محرکه متناوب[۸] و $-x + x^3$ نیروی بازدارنده‌ی غیرخطی[۹] می‌باشد [۹].

در سیستم‌های غیرخطی که اسیلاتورهای مذکور نوعی از این سیستم‌ها می‌باشند، مفهومی به نام سیکل‌های محدود[۱۰] وجود دارد که رفتار متغیرهای حالت سیستم را نشان می‌دهد. حرکت متغیرهای حالت بر روی یک حلقه بسته، نشان‌دهنده حرکت نوسانی (متناوب) در یک سیستم است. اگر مسیر حالت به این حلقه نزدیک شود، رفتار سیستم پایدار و در غیر این‌صورت ناپایدار است. برای نوشتن معادلات حالت اسیلاتور دافینگ از تعریف متغیر زیر استفاده می‌کنیم:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]

$$y = \frac{dx}{dt} \qquad (۳)$$

در اسیلاتور دافینگ شرایط اولیه هم بر روی پاسخ حالت دائم و هم روی مسیر متغیرهای حالت سیستم تاثیر می‌گذارد. اگر در معادله‌ی دینامیکی اسیلاتور دافینگ (۲) نرخ میرائی (δ)ثابت نگه داشته شود، با افزایش γ حالت سیستم نیز تغییر می‌کند. در طی این تغییرات، حالت سیستم از متناوب به آشوب رفته و در ادامه از حالت آشوبناک به حالت شبه متناوب تغییر خواهد کرد. بنابراین برای تشخیص سیگنال ضعیف از تغییر حالت سیستم از حالت آشوبناک به متناوب استفاده می‌شود. بدین صورت که اگر اسیلاتور در حالت بحرانی ($\gamma = \gamma_c$) (حالت آشوبناک در آستانه حالت شبه متناوب) قرار گیرد آنگاه سیگنالی که می‌خواهد آشکار شود بایستی به عنوان یک اغتشاش ($\alpha\cos(t)$) برای نیروی محرکه مرجع ($\gamma\cos(t)$) به فرم معادله (۴) اعمال گردد. در حالت کلی اگر یک سیگنال متناوب $S(t)$ (اغتشاش ورودی) که فرکانس آن با فرکانس سیگنال مرجع برابر است به اسیلاتور دافینگ اعمال شود موجب افزایش مقدار γ از γ_c شده و منجر به تغییر حالت از آشوب به نظم در اسیلاتور می‌گردد. در این حالت با کاهش دامنه سیگنال سینوسی می‌توان اسیلاتور را دوباره در حالت بحرانی قرار داد. با فرض اینکه دامنه سیگنال داخلی اسیلاتور در این حالت γ'_c باشد دامنه سیگنال سینوسی از رابطه ساده $\alpha = \gamma_c - \gamma'_c$ بدست می‌آید [۱۲-۱۰].

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \delta\frac{dx}{dt} - x + x^3 = \gamma\cos(t) + \alpha\cos(t) \qquad (۴)$$

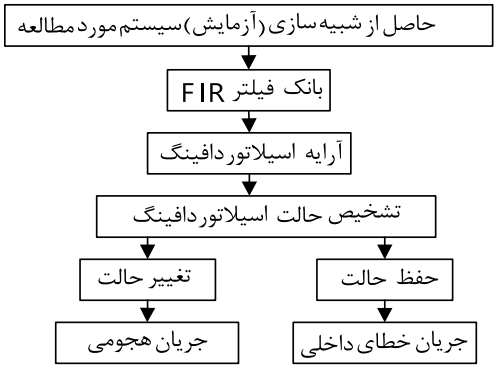
تاکنون از اسیلاتور دافینگ برای تشخیص سیگنال‌های ضعیف، خطای امپدانس بالای سیستم‌های قدرت، حالت جزیره‌ای و ... استفاده شده است [12-10].

۳- الگوریتم پیشنهادی

در حالت کلیدزنی، در جریان تفاضلی مؤلفه‌های هارمونیکی خاصی از قبیل هارمونیک دوم (H_2)، سوم(H_3) و پنجم (H_5) ایجاد می‌شوند. دامنه‌ی فرکانس این مؤلفه‌ها بسته به شرایط کلیدزنی متفاوت است. در روش پیشنهادی اساس شناسایی جریان هجومی از جریان خطای داخلی، شناسایی مؤلفه‌های فرکانسی دوم و سوم ایجاد شده در اثر بروز جریان هجومی با استفاده از اسیلاتور دافینگ می‌باشد. در این روش برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی، ابتدا سیگنال جریان به اسیلاتور دافینگ اعمال شده و در نهایت بر اساس تغییر منحنی مسیر حالت خروجی اسیلاتور از حرکت آشوبناک به متناوب به‌عنوان مبنای شناسایی سیگنال، به تحلیل وضعیت سیستم پرداخته می‌شود. ساده‌ترین طرح برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی استفاده از یک اسیلاتور دافینگ بحرانی (مرز آشوبناک به متناوب) است که فرکانس سیگنال داخلی آن برابر با فرکانس یکی از میان هارمونیک‌های ایجاد شده در اثر کلیدزنی (فرکانس‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ هرتز) تنظیم شده باشد. انتظار می‌رود با اعمال جریان تفاضلی به اسیلاتور و تنظیم دامنه سیگنال مرجع، در حالت کلیدزنی، اسیلاتور دافینگ تحریک شده و دیاگرام حالت از حرکت آشوبناک به متناوب تغییر کند ولی در حالت خطای داخلی دیاگرام حالت همچنان در حرکت آشوبناک باقی بماند.

طرح فوق اگر چه ساده است ولی در عمل دارای مشکلاتی نیز است. در بعضی از حالت‌های خطای داخلی ممکن است مؤلفه اصلی باعث تحریک اسیلاتور شود و در شرایطی که جریان هجومی وجود ندارد و در ناحیه حفاظتی ترانسفورماتور خطای داخلی رخ داده است، اسیلاتور به اشتباه تحریک شده و سبب تشخیص نادرست جریان هجومی از خطای داخلی گردد. برای برطرف کردن این مشکل و حذف مؤلفه اصلی جریان و استخراج مؤلفه هارمونیکی دوم یا سوم می‌توان از بانک فیلتر FIR استفاده نمود. برای این منظور از دو فیلتر میان‌گذر با فرکانس میانی عبور به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵۰ هرتز جهت حذف تمامی مؤلفه‌های هارمونیکی به غیر از مؤلفه هارمونیک مورد نظر استفاده می‌شود. مشکل دیگری که در طرح اولیه روش تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی وجود دارد، نامعلوم بودن فاز سیگنال ورودی به اسیلاتور است. با توجه به لحظه نمونه‌برداری از جریان تفاضلی، سیگنال ورودی به اسیلاتور می‌تواند هر فاز دلخواهی (برحسب رادیان) در بازه‌ی $[0,2\pi]$ داشته باشد. اسیلاتور دافینگ قابلیت شناسایی سیگنال‌هایی را دارد که فاز اولیه آن‌ها در ربع اول و چهارم قرار داشته باشد برای رفع این مشکل نیز می‌توان از یک اسیلاتور دافینگ دیگر که فاز سیگنال داخلی آن در π رادیان تنظیم شده است استفاده کرد. بنابراین برای هر فرکانس با استفاده از دو اسیلاتور که فازهای آن‌ها روی صفر و π رادیان تنظیم شده است، می‌توان کل دایره مثلثاتی را تحت پوشش قرار داد. فلوچارت شکل(۱) روند تشخیص جریان هجومی از جریان خطا را نشان می‌دهد.

نکته حائز اهمیت در ارتباط با روش پیشنهادی، نحوه تشخیص حالت سیگنال خروجی اسیلاتور دافینگ است. برای این مورد روش‌های مختلفی در مراجع پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به نگاشت پوانکاره، تبدیل فوریه سریع، بزرگترین نمای لیاپانوف ، تست ۰ و۱ و خودهمبستگی مسیر فضای فاز اشاره کرد [۱۳]. همچنین پیاده‌سازی میکروپروسسوری اسیلاتور دافینگ انجام شده است [۱۴].



شکل (۱): روند تشخیص جریان خطا از جریان هجومی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

۴- شبیه‌سازی سیستم قدرت ۲۳۰ کیلو ولت

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در یک شبکه قدرت و به‌دست آوردن اطلاعاتی همانند شرایط واقعی سیستم، نیاز به مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم شبکه قدرت شامل یک ترانسفورماتور قدرت، ترانسفورماتورهای جریان، خط انتقال و بار متصل به آن می‌باشد. برای این منظور از یک سیستم ۲۳۰ کیلو ولت مطابق شکل (۲) ، استفاده شده است [۱۵]. شماتیک مدار سیستم قدرت ایجاد شده در محیط ATPDraw به‌صورت شکل(۳) می‌باشد.

۴-۱- شبیه‌سازی و نتایج

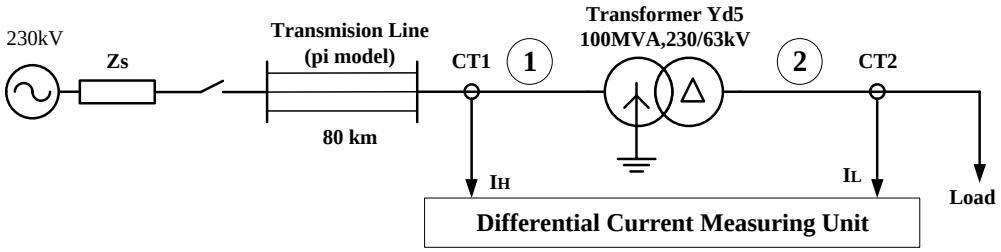
به‌منظور بررسی مناسب و دقیق عملکرد الگوریتم تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی، باید تمام مواردی که در شرایط واقعی امکان وقوع آنها وجود دارد، شبیه‌سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد. حالت‌های مختلف جریان هجومی با تغییر پارامترهای اصلی مؤثر روی مشخصه آن از قبیل اندازه شار پسماند هسته و لحظه کلیدزنی ترانسفورماتور صورت می‌گیرد و همچنین حالت‌های مختلف جریان خطای داخلی با در نظر گرفتن عوامل اصلی مؤثر روی مشخصه‌ی این جریان یعنی نوع خطا شامل خطای تک فاز به زمین (SLG)، خطای دو فاز به هم (LL)، خطای دو فاز به زمین (DLG) و خطای سه فاز به زمین (3PHG)، شبیه‌سازی می‌شود [۵]. خلاصه نتایج به کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای شرایط و حالات خطای سه فاز به زمین (3PHG)، جریان هجومی و جریان خطای داخلی در سیستم قدرت نشان داده شده در شکل(۲)، در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲- برق‌دار کردن ترانسفورماتور

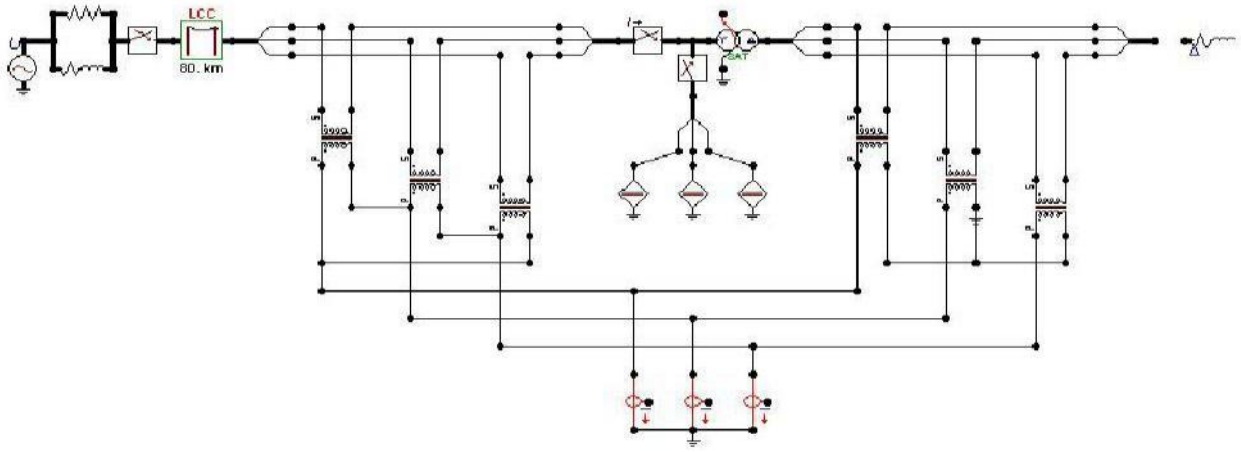
در این حالت ترانسفورماتور قدرت در ۳۰ زاویه شروع مختلف (که در بازه $0^\circ < \theta < 360^\circ$ با گام ۱۲ درجه به ترتیب انتخاب شده است) با درصد شارهای پسماند متفاوت مطابق جدول (۱) برق‌دار می‌شود. به‌این ترتیب به ازای هریک از حالت‌های چهارگانه، ۳۰ وضعیت مختلف (به‌ترتیب از 0° تا 348°) برای زاویه شروع در نظر گرفته شده و در نتیجه ۱۲۰ حالت مختلف مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌است.

جدول (۱): حالتهای مختلف در نظر گرفته شده برای شار پسماند

شار پسماند / حالت	φ_1%	φ_2%	φ_3%
۱	۰	۰	۰
۲	۰	۸۰	۰
۳	-۸۰	۰	-۸۰
۴	۸۰	۶۰	-۶۰



شکل (۲): دیاگرام سیستم قدرت شبیه‌سازی شده

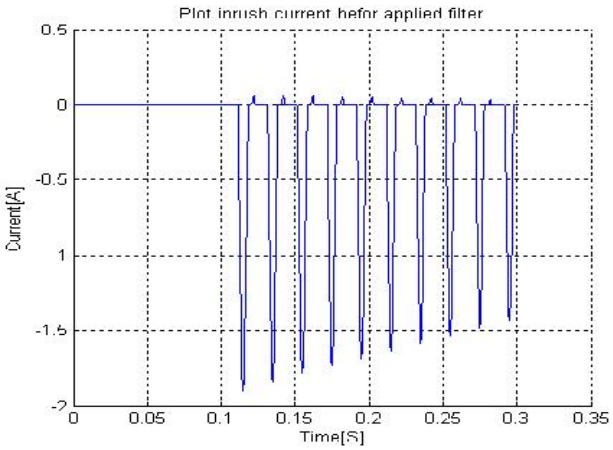


شکل (۳): شماتیک سیستم شبیه‌سازی شده در محیط ATPDraw

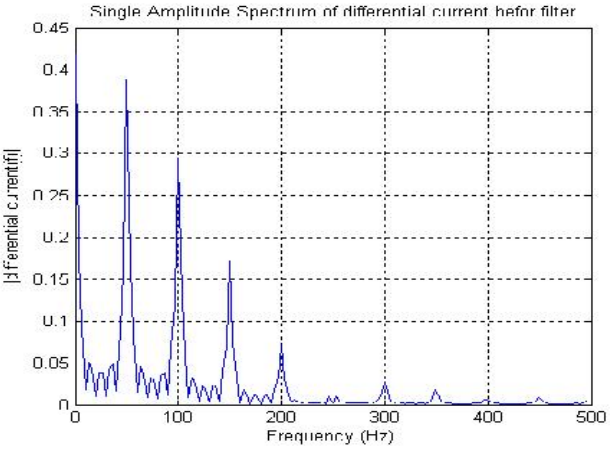
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

به‌عنوان نمونه شکل موج جریان تفاضلی (یک فاز) برای حالت ۱ در زاویه ۳۶ درجه و طیف فرکانسی مربوط به آن در شکل (۴) آورده شده است. همچنین خروجی اسیلاتور دافینگ تحریک شده توسط هارمونیک دوم و سوم جریان مربوط به این حالت در شکل (۵) نشان داده شده است.



الف)

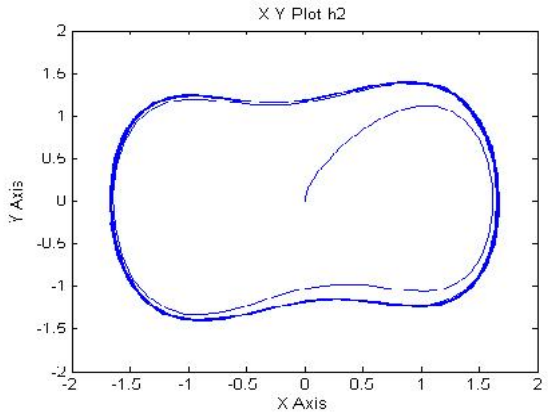


ب)

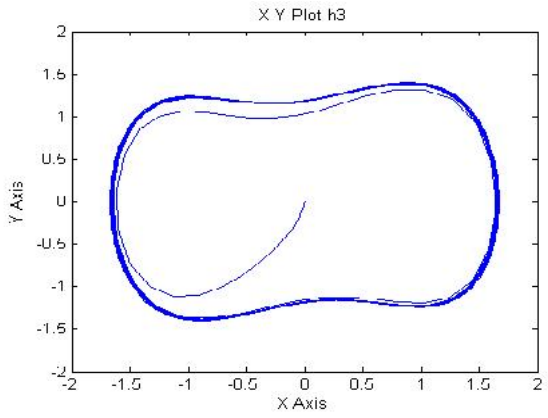
شکل (۴): الف) شکل موج جریان تفاضلی در حالت اول شار پسماند و کلیدزنی با زاویه شروع ۳۶ درجه ب) طیف فرکانسی

خروجی اسیلاتور دافینگ تحریک شده توسط هارمونیک‌های دوم و سوم جریان تفاضلی مربوط به حالت ۱ در زاویه ۳۶ درجه (شکل ۴) در شکل (۵) نشان داده شده است.

با توجه تعداد زیاد حالت‌های مورد شبیه‌سازی و نظر به این که در اکثر موارد، نتایج حاصل از عملکرد اسیلاتورهای دافینگ مربوط به هر دوی هارمونیک‌های دوم و سوم موفقیت‌آمیز است در جدول‌های (۲) الی (۵) متناظر با حالت‌های ۱ الی ۴ درنظر گرفته شده برای شار پسماند، صرفاً حالت‌هایی که منجر به تغییر حالت فقط یکی از اسیلاتورهای دافینگ بوده آورده شده‌است.



الف)



ب)

شکل (۵): خروجی اسیلاتور تحریک شده توسط الف) هارمونیک دوم جریان دیفرانسیل ب) هارمونیک سوم جریان دیفرانسیل

جدول (۲): نتایج مربوط به خروجی مجموعه اسیلاتورها در حالت‌های کلید زنی مختلف برای حالت اول

φ1=0 , φ2=0 , φ3=0			
وضعیت زاویه شروع	H_2	H_3	نتیجه
۶	×	√	√
۷	×	√	√
۸	√	×	√
۱۲	√	×	√
۱۸	×	√	√
۱۹	×	√	√
۲۴	√	×	√
۲۵	√	×	√
۲۶	√	×	√

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

جدول (۳): نتایج مربوط به خروجی مجموعه اسیلاتورها در حالت‌های کلید زنی مختلف برای حالت دوم

φ1=0 , φ2=80% , φ3=0			
وضعیت زاویه شروع	H_2	H_3	نتیجه
۱	×	√	√
۴	√	×	√
۱۱	×	√	√
۱۲	×	√	√
۱۳	√	×	√
۱۷	√	×	√
۲۳	×	√	√
۲۴	×	√	√
۲۵	√	×	√
۲۸	√	×	√
۲۹	√	×	√

جدول (۴): نتایج مربوط به خروجی مجموعه اسیلاتورها در حالت‌های کلید زنی مختلف برای حالت سوم

φ1=-80% , φ2=0 , φ3=-80%			
وضعیت زاویه شروع	H_2	H_3	Result
۲	√	×	√
۷	√	×	√
۱۰	√	×	√
۱۱	√	×	√
۱۳	√	×	√
۱۴	√	×	√
۱۵	√	×	√
۱۹	√	×	√
۲۰	×	√	√
۲۱	×	√	√
۲۲	√	×	√
۲۸	√	×	√
۳۰	√	×	√

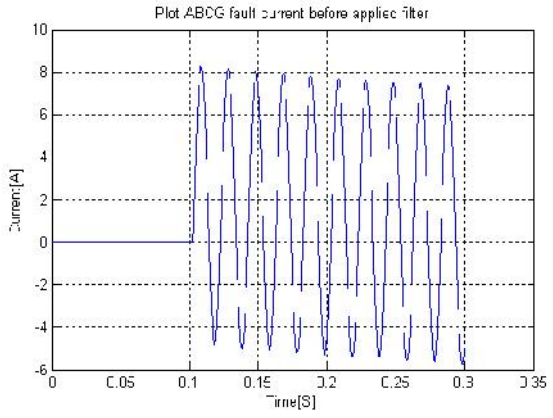
جدول (۵): نتایج مربوط به خروجی مجموعه اسیلاتورها در حالت‌های کلید زنی مختلف برای حالت چهارم

φ1=-80% , φ2=60 , φ3=-60%			
وضعیت زاویه شروع	H_2	H_3	نتیجه
۱	√	×	√
۶	√	×	√
۱۲	√	×	√
۱۳	√	×	√
۱۴	√	×	√
۱۵	√	×	√
۲۳	√	×	√
۲۴	×	√	√
۲۵	×	√	√
۲۶	√	×	√
۲۹	√	×	√
۳۰	√	×	√

۴-۳- خطای داخلی

در این حالت خطاهای داخلی (که داخل ناحیه حفاظتی رخ می‌دهند) در ۲۵ زمان مختلف رخداد خطا در طول یک سیکل که به ترتیب در بازه $0.1 < t < 0.12$ ثانیه و با گام ۰/۰۰۱۶ ثانیه انتخاب شده‌اند برای هریک از خطاهای چهارگانه تک‌فاز به زمین (SLG)، دو فاز به هم (LL)، دو فاز به زمین (DLG) و سه فاز به زمین (3PHG)، (مجموعاً ۱۰۰ خالت مختلف) مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

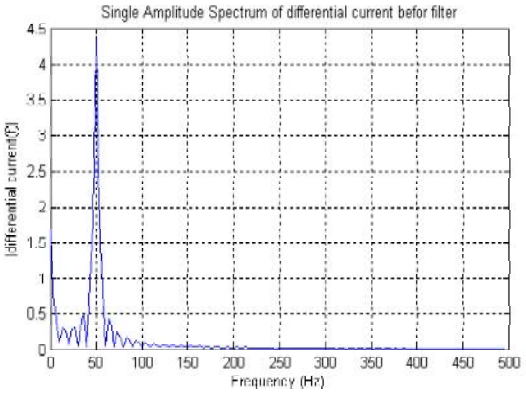
به عنوان نمونه شکل موج جریان دیفرانسیل در حالت وقوع خطای سه‌فاز به زمین در زمان ۰/۱۰۳۲ ثانیه به‌همراه طیف فرکانسی مربوطه در شکل(۶) و خروجی اسیلاتور تحریک شده توسط هارمونیک دوم و سوم جریان در شکل (۷) نشان داده شده است.



الف)

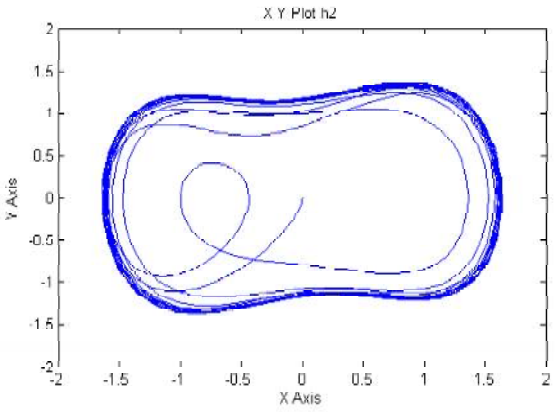
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

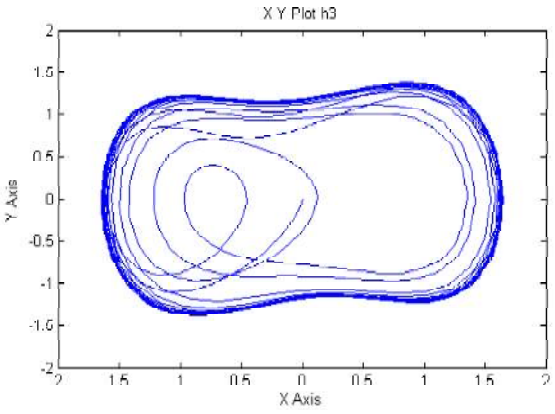


ب)

شکل (۶): الف) شکل موج جریان تفاضلی در حالت وقوع خطای سه فاز به زمین در زمان ۰،۱۰۳۲ ثانیه ب) طیف فرکانسی آن



الف)



ب)

شکل (۷): دیاگرام حالت خروجی اسیلاتور در حالت وقوع خطا توسط الف) هارمونیک دوم جریان دیفرانسیل ب) هارمونیک سوم جریان

در این مورد در تمامی حالت‌ها نتایج حاصل از عملکرد اسیلاتورهای دافینگ مربوط به هر دوی هارمونیک‌های دوم و سوم موفقیت‌آمیز بود. به عبارت دیگر در تمامی حالت‌های خطای داخلی، اسیلاتورها تحریک نشده و خروجی آنها همچنان به‌صورت آشوبناک باقی می‌ماند. این بدان معناست که مقادیر هیچ‌کدام از هارمونیک‌های دوم و سوم به حدی نرسیده‌اند که بتوانند حالت اسیلاتورهای آشوبناک را به حالت نظم در آورند.

۴-۴- مقایسه نتایج

با بررسی نتایج بدست آمده از جدول‌های (۱) و (۲) مشاهده می‌شود که با تنظیم دامنه سیگنال مرجع اسیلاتورهای دسته اول در h_2 و γ_c برای شناسایی مولفه‌ی هارمونیک دوم جهت تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی، در بعضی از حالت‌های کلیدزنی، اسیلاتور تحریک نشده و در بقیه‌ی حالت‌ها تحریک می‌شود ولی در تمامی حالت‌های خطای داخلی، اسیلاتورها تحریک نمی‌شود و خروجی اسیلاتورها همچنان به‌صورت حرکت آشوبناک باقی می‌ماند، چون مقادیر هارمونیکهای دوم به حدی نرسیده‌اند که بتوانند حالت اسیلاتورهای آشوبناک را به حالت نظم درآورند. در این بخش برای پوشش دادن حالت‌هایی از کلیدزنی که اسیلاتور تحریک نمی‌شود، از اسیلاتور دسته دوم برای شناسایی مولفه‌ی هارمونیک سوم استفاده می‌شود. برای این عملکرد بایستی دامنه سیگنال مرجع اسیلاتور دسته دوم در h_2 و γ_c تنظیم شود، همان‌طور که در جدول‌های (۱) و (۲) مشاهده می‌شود در این صورت اسیلاتورهای دسته دوم علاوه بر بعضی از نمونه‌ها، تمامی حالت‌هایی از کلیدزنی که توسط اسیلاتورهای دسته اول شناسایی نمی‌شد را شناسایی کرده و خروجی اسیلاتورها از حالت آشوبناک به حالت متناوب تغییر می‌کند ولی همچنان در تمامی حالت‌های خطای داخلی به علت اینکه مقادیر هارمونیکهای سوم به حدی نرسیده‌اند که حالت اسیلاتورهای آشوبناک را به حالت نظم درآورند، همچنان خروجی اسیلاتورها به‌صورت آشوبناک باقی می‌ماند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید مبتنی بر تئوری آشوب برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی، در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور ارائه شد. در این راستا تلاش شد تمامی حالت‌ها و پدیده‌هایی که امکان وقوع آنها در عمل وجود دارد، توسط نرم‌افزار EMTP/ATP شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار بگیرد. الگوریتم پیشنهادی به‌منظور تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی بر اساس آنالیز شکل موج جریان تفاضلی با استفاده از تئوری آشوب، برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت، ارائه شده است.

در این روش برای تمامی حالت‌های شبیه‌سازی شده، جریان تفاضلی یک فاز دلخواه مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج شبیه سازی مؤید این مطلب هستند که در حالت کلیدزنی، در جریان تفاضلی مؤلفه‌های هارمونیکی خاصی از قبیل هارمونیک دوم، سوم و پنجم تشکیل می‌شوند به‌طوری که می‌توان وجود این مؤلفه ها در سیگنال جریان تفاضلی را به‌عنوان یک معیار برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی توسط اسیلاتور دافینگ در نظر گرفت. در این روش با اعمال سیگنال جریان تفاضلی به اسیلاتورها و بررسی تغییر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

حالت اسیلاتورها از آشوبناک به منظم در شرایط مختلف شبیه‌سازی شده، وضعیت موجود سیستم تشخیص داده می‌شود.

بررسی‌های انجام شده در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حالت کلیدزنی، اسیلاتورهای دسته اول به غیر از چند حالت که توسط اسیلاتورهای دسته دوم پوشش داده می‌شوند، همگی در وضعیت نظم قرار دارند، این بدان معناست که در برآیند نتایج اسیلاتورهای دسته اول و دوم حداقل یک دسته اسیلاتور توسط سیگنال جریان تفاضلی تحریک شده و در نهایت خروجی آن دسته اسیلاتور از حرکت آشوبناک به حرکت منظم تغییر می‌یابد. ولی در تمامی وضعیت‌های خطای داخلی هیچ‌کدام از اسیلاتورهای دسته اول و دوم تحریک نمی‌شوند و همچنان خروجی اسیلاتورها به‌صورت حرکت آشوبناک باقی می‌ماند. این بدان معناست که مقادیر هارمونیک‌های دوم و سوم موجود نیستند و یا به حدی نرسیده‌اند که بتوانند حالت دسته اسیلاتورهای مربوط را از حرکت آشوبناک به حرکت نظم در آورند.

پیوست:

مشخصات سیستم شبیه سازی شده:

مشخصات معادل تونن سیستم قدرت	
منبع ولتاژ	*Amplitude=230KV, f=50Hz*
شاخه اهمی	*R=200Ω*
شاخه اهمی-سلفی	*R=2Ω, L=63.7mH*

مشخصات ترانسفورماتور	
ظرفیت ترانسفورماتور	100MVA
ولتاژ (ثانویه/اولیه)	230/63 KV
X/R	10
امپدانس ترانسفورماتور	16%
فرکانس	50 HZ

بارهای رله ها برای CT های با جریان ثانویه ۵ آمپر				
ضریب قدرت	امپدانس (Ω)	اندوکتانس (mH)	مقاومت (Ω)	بار
0.5	1	2.3	0.5	B-1
0.5	8	18.4	4	B-2

کلاس CT		
	CT1	CT2
نسبت	800/5	3000/5
کلاس CT	Cls C	Cls C
بار	B1	B8

مشخصات بار متصل به ترانسفورماتور قدرت				
درصد بار نامی	امپدانس (Ω)	ضریب قدرت	اندوکتانس (mH)	مقاومت (Ω)
%100	119.07	0.8	227.40	95.28

مراجع

[1] Bimbhara, P.S., Electrical Machinery, Khanna Publishing, 1995.

[2] Monsef, H., Lotfifard, S., A New Wavelet-Based Approach for Internal Fault Current Identification in Power Transformers, Scientia Iranica, Vol. 15, No. 2, 2008.

[3] Kasztenny, B., Kulidjian A., An Improved Transformer Inrush Restraint Algorithm Increases Security While Maintaining Fault Response Performance, 53th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Canada, 2000.

[4] Einvall, C. H., Linders, J. R., A Three Phase Differential Relay for Transformer Protection, IEEE Transactions on power Apparatus and system, Vol. PAS-94, No. 6, 1974.

[۵] مرادی علیرضا، عبادیان محمود، دریاباری محمدکاظم، **تشخیص جریان هجومی از جریان خطا در ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی**، مجله سیستم‌های هوشمند در مهندسی برق، سال اول، شماره اول ، ۱۳۸۹.

[۶] رسول‌پور معصومه، بانژاد مهدی، احمدی‌فرد علیرضا، **روش ضریب همبستگی برای تشخیص جریان هجومی از جریان اتصال کوتاه داخلی با استفاده از تبدیل موجک در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت**، *مجله سیستم‌های هوشمند در مهندسی برق*، سال چهارم، شماره دوم ، ۱۳۹۲.

[۷] مهرآیین علی، فیضی محمدرضا، جلیلوند ابوالفضل، **تمییز بین جریان هجومی تراتسفورماتور قدرت و جریان‌های خطا در حفاظت دیفرانسیل با استفاده از تبدیل موجک و منطق فازی**، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC2007)، تهران، ۱۳۸۶.

[8] Jalilvand, A., Fotoohabadi, H., The Application of Duffing Oscillator in Weak Signal Detection, ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics and Communications, Vol. 9, Issue 1, 2011.

[9] Zigang, G., Xiangjum, Z., Shuntao, T., Zhengyi, L., Chaotic Oscillator Based Protection Scheme for Single Phase Ground Fault Diagnosis in Distribution Networks, International conference on power system technology, Singapore, 2004.

[10] Hongbin, G., Guang O., Yao, Y., Shijian, Z., LiMin, S., Detection of Weak Simple Harmonic Signal in Strong Noise Based by Use of Chaotic Oscillator, 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, China, July 2007.

[11] Jalilvand, A., Kazemi Kargar, H., Fotoohabadi, H., High Impedance Fault Detection Using Duffing Oscillator and FIR Filter, International Review of Electrical Engineering, Vol. 5, Issue 3, 2010.

[12] Vahedi, H., Gharehpetian, G.B., Karrari, M., Application of Duffing Oscillator for Passive Islanding Detection of Inverter-Based Distributed Generation Units, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, Issue 4, pp. 1973-1983, October 2012.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]

[13] Rashtchi, V., Nourazar, M. , Detection the State of Duffing Oscillator by Phase Space Trajectory Autocorrelation, International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 23, No. 4, 2013.
[14] Rashtchi, V., Nourazar, M. , A Multiprocessor Nios II Implementation of Duffing Oscillator Array for Weak Signal Detection, Journal of Circuits Systems and Computers, Vol. 23, No. 4, 2014.
[15] IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers. IEEE Std C37.91-2000.

زیرنویس‌ها

[6] Duffing oscillator
[7] Damping ratio
[8] Periodic driving force
[9] Nonlinear restoring force
[10] Limit cycles

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.6.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017