

تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی در ترانسفورماتورهای قدرت با روش تبدیل فوریه کسری

زهرا مروج^۱، دانشیار؛ زهرا تبک^۲، کارشناس ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - zmoravej@semnan.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - zh_tabak@semnan.ac.ir

چکیده: هدف این مقاله ارائه روش جدیدی در جهت بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای داخلی است. تبدیل فوریه کسری روشی است که در این مقاله و در راستای تشخیص و تمایز جریان هجومی از جریان خطای داخلی استفاده شده است. تبدیل فوریه کسری یک روش زمان-فرکانسی است که برخلاف تبدیل فوریه معمولی قادر است، ویژگی‌های زمانی و فرکانسی یک سیگنال را به طور هم‌زمان نشان دهد و بنابراین در شناخت ویژگی‌های سیگنال‌های ناپیدا قدرتمند است. این روش نیازی به تعریف پنجره اطلاعات همانند تبدیل موجک ندارد و در محیط نویزی پایدار باقی می‌ماند. روش معرفی شده هم‌چنین دارای الگوریتم ساده و بار محاسباتی کم می‌باشد. دقت و صحت عملکرد این روش با شبیه‌سازی سیگنال‌های جریان هجومی و جریان خطای داخلی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC مورد ارزیابی قرار گرفته است. این روش توانایی خود را در تشخیص و تمایز این جریان‌ها در شرایط بدون نویز و در حضور نویز به خوبی نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: تبدیل فوریه کسری، جریان هجومی، جریان خطای داخلی، حفاظت دیفرانسیل، ترانسفورماتور قدرت

Discrimination of Inrush Currents from Internal Faults in Power Transformers using Fractional Fourier Transform

Zahra Moravej¹, Associate professor; Zahra Tabak², MSc

1-Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: zmoravej@semnan.ac.ir

2-Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: zh_tabak@semnan.ac.ir

Abstract: This paper proposes a new method to improve power transformer differential protection. Fractional Fourier transform is implemented in order to discriminate inrush current from internal fault current. Fractional Fourier transform is a time-frequency method and unlike conventional Fourier transform, it is able to represent the time and frequency characteristics of signals. Thus, the proposed method is powerful to recognize non-stationary signal features. In addition, there is no need to define the data window such as wavelet transform and is stable in the noisy environment. A simple algorithm and a low computational burden are the advantages of this method. The accuracy of this method is evaluated by simulated inrush current and internal fault current signals in PSCAD/EMTDC software. This method is demonstrating its ability to distinguish these currents in the presence of noise and without it.

Keyword: Fractional fourier transform, inrush current, internal fault current, differential protection, power transformer.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۷ و ۱۳۹۶/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۹

نام نویسنده مسئول: زهرا مروج

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

ترانسفورماتورها یکی از مهم‌ترین تجهیزات در سیستم‌های قدرت می‌باشند. بنابراین حفاظت این تجهیز دارای اهمیت بوده و معمولاً از رله‌های دیفرانسیل بدین منظور استفاده می‌شود. این رله‌ها باید به‌ازای رخداد خطای داخلی در ناحیه حفاظتی عمل نمایند و ترانسفورماتور را از مدار خارج نمایند. بنابراین رله دیفرانسیل نباید در شرایط غیرخطا هم‌چون جریان هجومی، اشباع ترانسفورماتورهای جریان و شرایط اضافه تحریک عملکرد داشته‌باشد. اما در مواردی مقدار جریان این پدیده‌ها که جزو پدیده‌های ذاتی ترانسفورماتورهای قدرت هستند، از مقدار آستانه رله عبور می‌کند و باعث عملکرد نابجا و یا نادرست رله دیفرانسیل می‌شود. بدین منظور رله باید به واحدی مجهز شود که بتواند خطای داخلی را از پدیده‌های نامبرده تشخیص دهد و قابلیت اطمینان رله را بالا ببرد. در این مقاله به تشخیص و تمایز جریان هجومی از جریان خطای داخلی پرداخته می‌شود.

از روش‌های تشخیص جریان هجومی و خطای داخلی می‌توان به روش‌های هارمونیک اشاره نمود. از آن‌جاکه جریان هجومی دارای مؤلفه هارمونیک دوم بزرگتری نسبت به سایر مولفه‌ها می‌باشد، در این روش از نسبت مؤلفه هارمونیک دوم به هارمونیک اصلی به‌منظور تشخیص این جریان استفاده می‌شود. اما به دلیل استفاده از مواد جدید در ساختار هسته، وقوع اشباع در ترانسفورماتورهای جریان و هم‌چنین وجود خازن‌های سری در خط انتقال، مقدار این مؤلفه در جریان هجومی کاهش یافته‌است و بنابراین معیار خوبی برای تشخیص نمی‌باشد [۱]. در روش‌های دیگر موسوم به روش‌های ولتاژی به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان می‌توان علاوه بر سیگنال‌های جریان از سیگنال‌های ولتاژ استفاده نمود. روش دیفرانسیل توان از نوع روش‌های ولتاژی است که در مرجع [۲] استفاده شده‌است. اما عیب این روش‌ها این است که نیاز به استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ دارند و هم‌چنین محاسبات الگوریتم حفاظتی را افزایش می‌دهند. در سال‌های اخیر، از روش‌های هوشمند مختلفی جهت تشخیص و طبقه‌بندی انواع خطاها از جمله روش‌های درخت تصمیم‌گیری (DT) [۳]، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) [۴، ۵]، ماشین بردار پشتیبان (SVM) [۶]، الگوریتم سنجش فازی [۷] که دارای قابلیت یادگیری و تعمیم‌پذیری خوبی هستند و جهت استخراج بردار ویژگی‌ها از تبدیل‌هایی مانند تبدیل موجک [۸، ۹]، تبدیل S [۱۰-۱۲]، تبدیل زمان-زمان [۱۳]، تبدیل چیرپلت [۱۴]، روش - Random Forest [۱۵] و غیره استفاده شده‌است. تبدیل فوریه یکی از معروف‌ترین این روش‌هاست [۱۶]. اما این روش در بیان و استخراج ویژگی سیگنال‌های ناپیوسته ناتوان است. به‌همین دلیل روش‌های زمان - فرکانسی معرفی شدند که از جمله این روش‌ها می‌توان به تبدیل موجک اشاره نمود. اما این روش ناکارآمدی خود را در شرایط نویزی نشان داده‌است.

در این مقاله روش جدیدی مبتنی بر تبدیل فوریه کسری ارائه شده‌است. همان‌طور که مشخص است جریان‌های خطا و پدیده‌هایی چون

جریان هجومی دارای ماهیتی ناپیوسته می‌باشند. روش‌های حوزه فرکانس مانند تبدیل فوریه معمولی قادر به بیان کامل ویژگی‌های این نوع سیگنال‌ها نمی‌باشند. تبدیل فوریه کسری روشی است که در حوزه روش‌های زمان-فرکانسی قرار می‌گیرد و بنابراین برخلاف تبدیل فوریه معمولی که تنها قادر به بیان ویژگی‌های یک سیگنال در حوزه فرکانس است، توانایی خود را در آنالیز ویژگی‌های سیگنال ناپیوسته در هر دو حوزه زمان و فرکانس نشان داده‌است. هم‌چنین نشان داده شده‌است این روش برخلاف روش‌های دیگر حوزه زمان-فرکانس مانند تبدیل موجک در شرایط نویزی پایدار باقی می‌ماند. از طرف دیگر این روش دارای الگوریتم ساده‌ای است. تبدیل S تبدیلی است که در برابر نویز مقاوم است و نیز برای سیگنال‌های ناپیوسته مناسب است اما خروجی این تبدیل شامل کانتورهای فرکانسی، دامنه و فاز است که برای استخراج ویژگی باید این کانتورها تحلیل گردد و در نتیجه دارای بار محاسباتی بالایی است که از این جهت، روش پیشنهادی در این مقاله تنها با محاسبه شاخص‌ها از حجم محاسبات پایین‌تری برخوردار است. در ادامه نشان داده شده‌است که این روش به‌راحتی می‌تواند جریان هجومی را از جریان خطای داخلی در ترانسفورماتورهای قدرت حتی در حضور نویز تشخیص دهد و باعث بهبود عملکرد رله دیفرانسیل گردد.

۲- تبدیل فوریه کسری

تبدیل فوریه کسری، زیرمجموعه‌ای از تبدیل‌های کانونیکال خطی می‌باشد. این تبدیل تعمیم‌یافته تبدیل فوریه معمولی است [۱۷]. در واقع این تبدیل از دوران تبدیل فوریه معمولی در صفحه زمان-فرکانس به‌دست می‌آید. α پارامتری است که بیانگر زاویه دوران می‌باشد و می‌تواند مقادیری در بازه $(-2\pi, 2\pi)$ را اتخاذ نماید. اگر $\alpha = \frac{\pi}{4}$ باشد، تبدیل فوریه معمولی و در $\alpha = 0$ خود تابع به‌دست می‌آید [۱۸]. خروجی این تبدیل یک عدد مختلط و ترکیبی از مولفه‌های زمانی-فرکانسی می‌باشد.

۲-۱- تبدیل فوریه کسری پیوسته

تبدیل فوریه کسری سیگنال $x(t)$ به‌عنوان یک اپراتور خطی، به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۹-۲۲]:

$$x_{\alpha}(u) = F_{\alpha}(x(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) k_{\alpha}(t, u) dt \quad (1)$$

که کرنل تابع $k_{\alpha}(t, u)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_{\alpha}(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j \cot \alpha}{2\pi}} e^{j \frac{u^2}{2} \cot \alpha} e^{j \frac{t^2}{2} \cot \alpha - j u t \csc \alpha} & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t-u) & \alpha = 2n\pi \\ \delta(t+u) & \alpha + \pi = 2n\pi \end{cases} \quad (2)$$

در این جا $\delta(t)$ تابع دیراک می‌باشد و n عددی صحیح است. بنابراین اگر α مضربی از 2π باشد رابطه (۱) مساوی با $x(t)$ و اگر $\alpha + \pi$ مضربی از 2π باشد مساوی با $x(-t)$ است.

توصیف شده با کرنل‌های نمایی مختلط مربعی می‌باشد. این نوع از کرنل‌ها بیانگر نوسان‌های سریع هستند و بنابراین طبق قضیه نایکوئیست نیازمند نرخ نمونه‌برداری بالایی می‌باشند. این بدین معناست که این روش نیازمند زمان بزرگتری برای محاسبات و هم‌چنین حافظه بیشتر می‌باشد. به‌منظور مرتفع‌ساختن این معایب در عمل از تبدیل فوریه کسری گسسته استفاده می‌شود.

در عمل روش‌های مختلفی به‌منظور به‌دست‌آوردن تبدیل فوریه کسری گسسته وجود دارد که در مرجع [۲۴] به‌تفصیل بیان شده‌است. در اینجا فرمولی که بر مبنای تبدیل فوریه گسسته معمولی استوار است، بیان می‌شود:

$$F^{\alpha}[m,n]=u_k[m]\sum_{n=-}^{N-1}(\lambda_k^{\alpha})u_k[n] \quad (۸)$$

که در این فرمول بردار ویژه ماتریس DFT و λ_k مقادیر ویژه آن است.

۳- سیستم مورد مطالعه

به‌منظور تولید سیگنال‌های مورد نظر، ترانسفورماتور قدرت با مشخصات ۵۰ Hz ، $۳۱/۵\text{ MVA}$ ، $۱۳۲/۳۳\text{ kV}$ و با اتصال YD در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده‌است. این سیستم در شکل ۱ نمایش داده شده‌است.

در راستای اندازه‌گیری جریان و هم‌چنین بررسی عملکرد رله‌ها در شرایط خطا نیاز به مدل دقیقی از ترانسفورماتور جریان است. در این راستا بسیاری از مقالات مدل‌های دقیقی برای ترانسفورماتور ارائه داده‌اند [۲۵، ۲۶]. در این مقاله از مدل جیلز استون [۲۷] در مدل کردن ترانسفورماتور جریان استفاده شده‌است. نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه $۵۰۰/۵$ و در سمت ثانویه $۱۲۰۰/۵$ در نظر گرفته شده‌اند.

در ادامه ارتباط این تبدیل با تبدیل فوریه معمولی بیان شده‌است.

۱-۱-۲- ارتباط تبدیل فوریه کسری با تبدیل فوریه معمولی

در مرجع [۲۳] نشان داده شده‌است که تبدیل فوریه کسری از توابع ویژه تبدیل فوریه معمولی استخراج می‌شود. در واقع اگر $\varphi_k(t)$ توابع ویژه تبدیل فوریه در نظر گرفته شود، مقادیر ویژه تبدیل فوریه کسری، ریشه α ام مقادیر ویژه تبدیل فوریه معمولی می‌باشد و به‌صورت زیر است:

$$F_{\alpha}(\varphi_k(t)) = \exp(-j\alpha k)\varphi_k(u) \quad (۳)$$

اگر یک سیگنال به‌صورت مجموعی از توابع ویژه نشان داده شود:

$$x(t) = \sum_{k=-}^{\infty} c_k \varphi_k(t) \quad (۴)$$

و c_k برابر است با:

$$c_k = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_k(t)x(t)dt \quad (۵)$$

با اعمال اپراتور کسری $F_{\alpha}(\cdot)$ به هر دو طرف رابطه (۴) عبارت زیر حاصل می‌گردد:

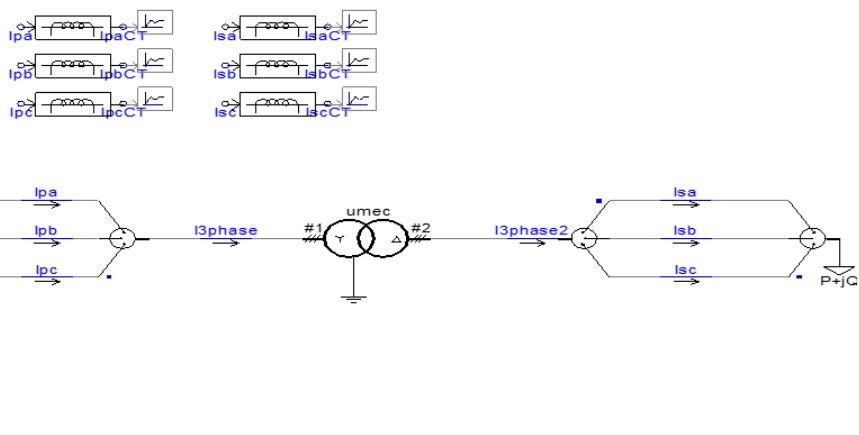
$$\begin{aligned} F_{\alpha}(x(t)) &= \sum_{k=-}^{\infty} c_k F_{\alpha}(\varphi_k(t)) \\ &= \sum_{k=-}^{\infty} c_k \exp(-j\alpha k)\varphi_k(u) \\ &= \int \sum_{k=-}^{\infty} \exp(-j\alpha k)\varphi_k(u)\varphi_k(t)x(t)dt \end{aligned} \quad (۶)$$

با توجه به معادلات فوق واضح است که تابع کرنل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_{\alpha}(t,u) = \sum_{k=-}^{\infty} \exp(j\alpha k)\varphi_k(u)\varphi_k(t) \quad (۷)$$

۲- تبدیل فوریه کسری گسسته

اگر در فرمول‌های ذکر شده در بخش ۱-۱ دقت شود مشاهده می‌گردد که تبدیل فوریه کسری به‌صورت زیر مجموعه‌ای از تبدیل‌های انتگرالی



شکل ۱: سیستم قدرت شبیه‌سازی شده

۵- نتایج شبیه‌سازی

در ابتدا سیگنال‌های جریان هجومی و خطای داخلی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شوند. سپس از سیگنال‌های به‌دست‌آمده با نرخ ۵۰ نمونه در هر سیکل نمونه‌برداری انجام شده‌است. بعد از این مرحله تبدیل فوریه کسری به جریان‌های دیفرانسیلی به‌دست‌آمده اعمال می‌شود. اگر در الگوریتم اعمالی $\alpha = a \frac{\pi}{\tau}$ در نظر گرفته شود، مقدار a در این الگوریتم از ۰ تا ۲ تغییر می‌کند و در هر مرحله به اندازه ۰/۱ افزایش می‌یابد. به‌منظور پایش تغییرات و به‌دست‌آوردن مهم‌ترین ویژگی‌های زمان - فرکانسی سیگنال در مقادیر مختلف a از شاخص‌های آماری میانگین،^۵ واریانس،^۵ انحراف معیار،^۷ جذر مجموع مربعات^۸ و توان متوسط^۹ در هر مورد استفاده می‌شود که در ادامه روابط ریاضی هریک از این شاخص‌ها به ترتیب مشاهده می‌شود:

$$mean = \bar{x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{\alpha,i}(n) \quad (9)$$

$$var = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{x}(n) - x_{\alpha,i}(n))^2 \quad (10)$$

$$std = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{x}(n) - x_{\alpha,i}(n))^2} \quad (11)$$

$$rss = \bar{x}(n) = \sqrt{\sum_{i=1}^N |x_{\alpha,i}(n)|^2} \quad (12)$$

$$avp = \bar{x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{\alpha,i}(n))^2 \quad (13)$$

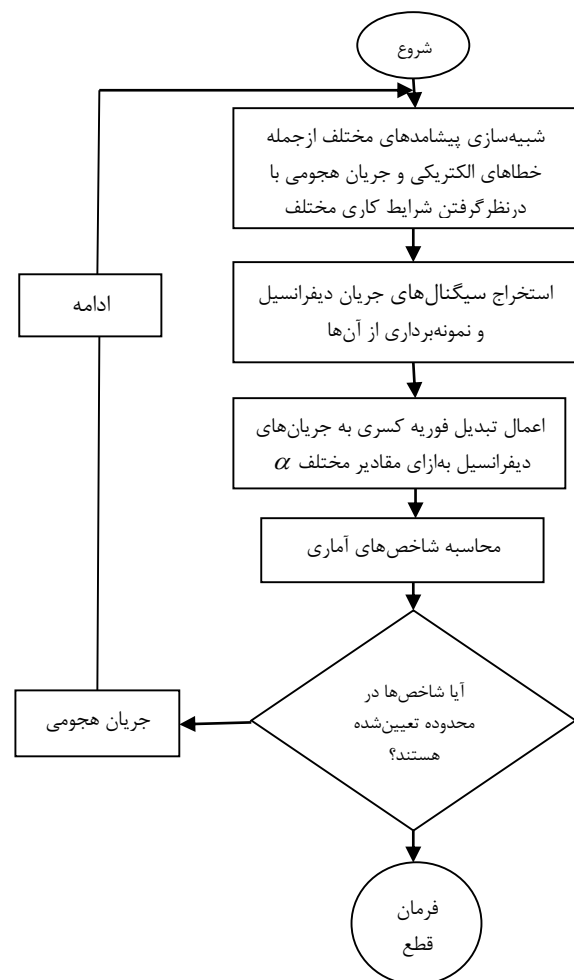
که در این روابط $\bar{x}(n)$ مقدار میانگین نمونه‌ها، N تعداد نمونه‌ها، i شماره نمونه مورد نظر، $x_{\alpha,i}(n)$ مقدار i امین نمونه متناظر با یک مقدار α می‌باشند.

۵-۱- جریان هجومی

همان‌طور که در مطالعات بسیاری ذکر شده، دامنه جریان هجومی تحت تأثیر دو عامل است: ۱- زمان کلیدزنی ترانسفورماتور ۲- مقدار شار پسماند درون هسته ترانسفورماتور [۲۸]. با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC، ۵۰ مورد جریان هجومی ناشی از برق‌دار کردن ترانسفورماتور در زمان‌های کلیدزنی و شارهای پسماند مختلف شبیه‌سازی شده‌است. در شکل ۳ نمونه‌ای از جریان هجومی سه‌فاز با شار پسماند ۵۰ درصد و کلیدزنی در لحظه ۰/۵ ثانیه نشان داده شده‌است.

۴- الگوریتم پیشنهادی تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی

در ابتدا جریان‌های دیفرانسیلی با استفاده از ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری سیستم شبیه‌سازی شده در شکل ۱ به‌دست‌آورده شده‌اند، سپس این جریان‌ها با نرخ ۵۰ نمونه در هر سیکل نمونه‌برداری می‌شوند. تبدیل فوریه کسری به نمونه‌های به دست آمده اعمال می‌شود. حال از پنج شاخص آماری در جهت پایش تغییرات جریان هجومی و خطای داخلی استفاده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی بخش (۵) نشان می‌دهد که شاخص آماری RSS با حاشیه اطمینان بالاتری نسبت به دیگر شاخص‌های آماری معرفی شده، جریان هجومی را از جریان خطای داخلی متمایز می‌کند. بدین ترتیب که اگر مقدار RSS کوچک‌تر از یک باشد، جریان از نوع هجومی است و رله عملکردی ندارد و اگر مقدار RSS بزرگ‌تر از یک باشد، جریان از نوع خطای داخلی است و بنابراین رله فرمان قطع را صادر می‌کند. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده‌است.



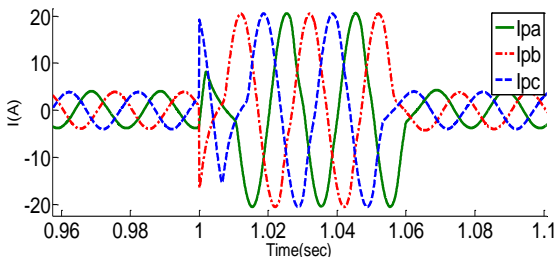
شکل ۲: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی جریان هجومی فاز A

a	mean	var	std	rss	Avp
۰/۵	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۰/۷۵	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۹	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۶۰	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱/۵	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱/۷۵	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱

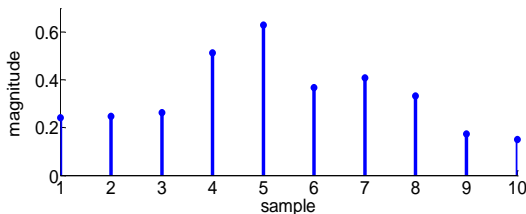
۵-۲- خطای داخلی

خطاهای داخلی در ترانسفورماتور به سه دسته خطاهای ابتدایی، خطا در پایانه‌ها و سیم‌پیچی، ذاتاً بسیار خطرناک بوده و می‌تواند به ترانسفورماتور آسیب برساند. مرتبط با خطای داخلی نیز ۱۰۰ مورد از انواع خطاهای پایانه تک‌فاز به زمین، دوفاز به زمین و سه‌فاز به زمین در لحظات مختلف کلیدزنی همراه با مقاومت‌های گوناگون شبیه‌سازی شده‌است. در شکل ۵ نمونه‌ای از جریان خطای داخلی از نوع سه‌فاز به زمین که در لحظه $t=1s$ به مدت $0/1$ ثانیه اتفاق افتاده است، نشان داده شده‌است.

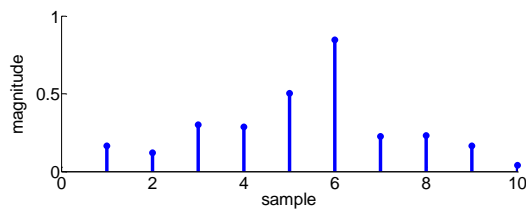


شکل ۵: جریان خطای داخلی سه‌فاز

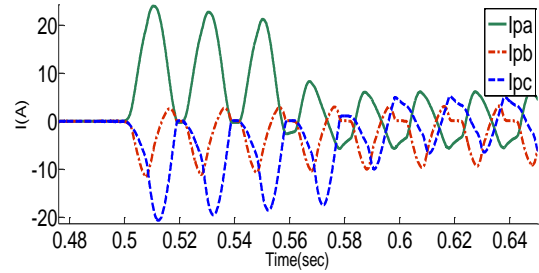
پس از تولید و نمونه‌برداری سیگنال‌ها، الگوریتم موردنظر در مقادیر مختلف a به آن‌ها اعمال می‌شود. خروجی الگوریتم در مورد خطای داخلی از نوع سه‌فاز به زمین و مقادیر مختلف a مربوط به فاز A در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



(الف)

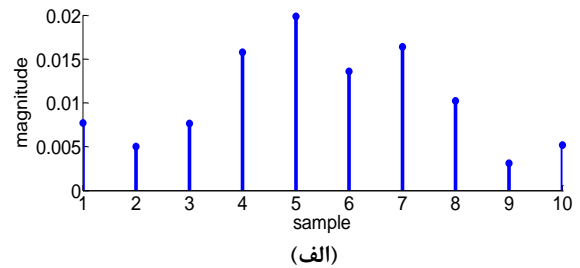


(ب)

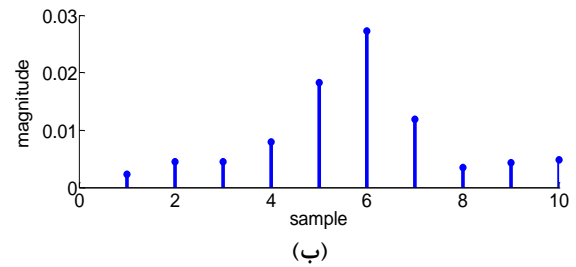


شکل ۳: جریان هجومی سه‌فاز

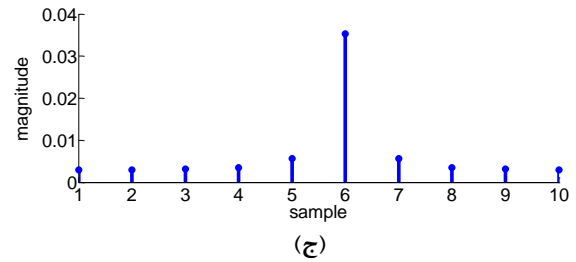
پس از تولید و نمونه‌برداری سیگنال‌های جریان هجومی، الگوریتم موردنظر در مقادیر مختلف a به آن‌ها اعمال می‌شود. خروجی الگوریتم در مقادیر مختلف a مربوط به فاز A در شکل ۴ قابل مشاهده است.



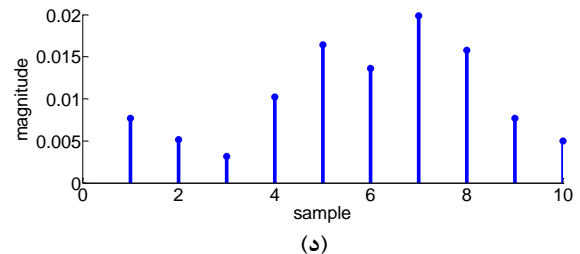
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴: خروجی الگوریتم تبدیل فوریه کسری جریان هجومی فاز A

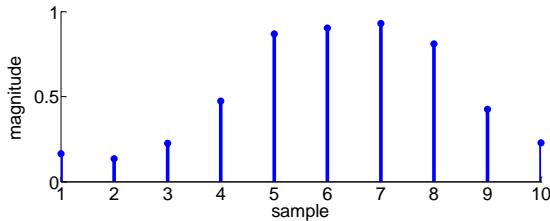
(الف) $a=0/75$ (ب) $a=1$ (ج) $a=1/5$ (د) $a=1/75$

مرحله بعدی محاسبه شاخص‌های آماری ذکر شده در ابتدای بخش، به‌ازای مقادیر مختلف a می‌باشد. در شبیه‌سازی مقادیر a از ۰ تا ۲ با پله $0/1$ تغییر می‌کند. در جدول ۱ مقدار این شاخص‌ها در شش مقدار a برای جریان هجومی فاز A آورده شده‌است.

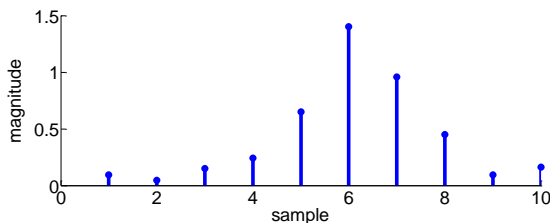
۵-۳- خطای داخلی و جریان هجومی

در این قسمت به بررسی اثر الگوریتم پیشنهادی در وقوع همزمان جریان هجومی و خطای داخلی پرداخته شده است. در شکل ۷ نمونه‌های خروجی فاز A پس از نمونه برداری و اعمال الگوریتم نمایش داده شده است.

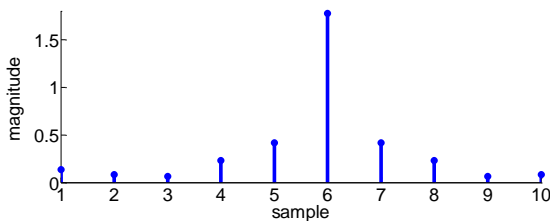
در ادامه نتایج در جداول ۵ الی ۷ آورده شده است.



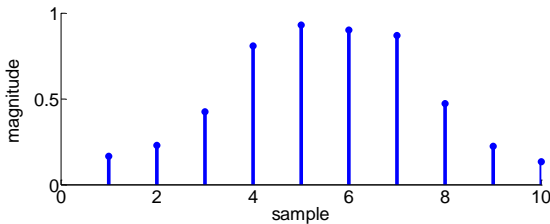
(الف)



(ب)



(ج)



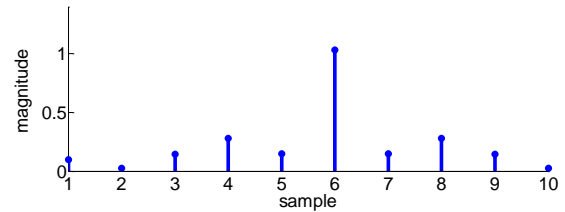
(د)

شکل ۷: خروجی الگوریتم تبدیل فوریه کسری در وقوع همزمان خطای داخلی سه فاز به زمین و جریان هجومی فاز A. (الف) $a=0.75$ (ب) $a=1$ (ج) $a=0.5$ (د) $a=0.25$

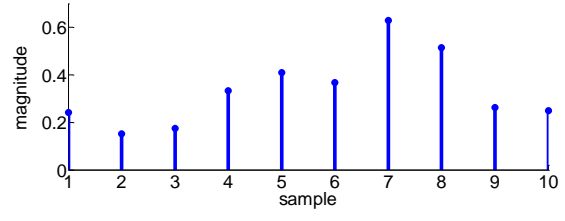
جدول ۵: نتایج شبیه سازی جریان هجومی همراه با خطای داخلی

AG - فاز A

a	mean	var	std	rss	avp
0.5	0.5157	0.0976	0.3125	1/9.69	0.3636
0.75	0.4246	0.1832	0.4281	1/9.69	0.3636
1	0.3502	0.2409	0.4908	1/9.69	0.3636
1.5	0.5157	0.0976	0.3125	1/9.69	0.3636
1.75	0.5520	0.0588	0.2425	1/9.69	0.3636
2	0.5605	0.0493	0.2222	1/9.69	0.3636



(ج)



(د)

شکل ۶: خروجی الگوریتم تبدیل فوریه کسری جریان خطای داخلی

سه فاز به زمین فاز A. (الف) $a=0.75$ (ب) $a=1$ (ج) $a=0.5$ (د) $a=0.25$

پس از اعمال الگوریتم به جریان های دیفرانسیلی، شاخص های آماری به ازای مقادیر مختلف a محاسبه شده است. در شبیه سازی، مقادیر a از ۰ تا ۲ با پله ۰/۱ تغییر می کند. در جداول ۲ الی ۴ مقدار این شاخص ها مربوط به فاز A در شش مقدار a و برای سه نوع جریان خطای داخلی آورده شده است.

جدول ۲: نتایج شبیه سازی خطای داخلی AG - فاز A

a	mean	var	std	rss	avp
0.5	0.3150	0.0183	0.1354	1/0.843	0.1175
0.75	0.2736	0.0427	0.2066	1/0.843	0.1175
1	0.2258	0.0665	0.2580	1/0.843	0.1175
1.5	0.3150	0.0183	0.1354	1/0.843	0.1175
1.75	0.3171	0.0169	0.1303	1/0.843	0.1175
2	0.3039	0.0252	0.1588	1/0.843	0.1175

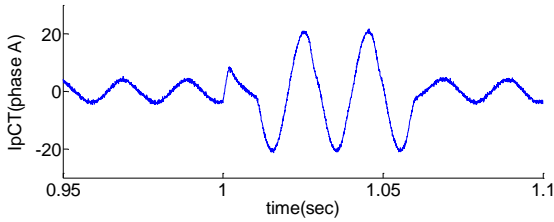
جدول ۳: نتایج شبیه سازی خطای داخلی ABG - فاز A

a	mean	var	std	rss	avp
0.5	0.3236	0.0194	0.1393	1/1.142	0.1142
0.75	0.2806	0.0453	0.2130	1/1.142	0.1142
1	0.2292	0.0715	0.2675	1/1.142	0.1142
1.5	0.3236	0.0194	0.1393	1/1.142	0.1142
1.75	0.3267	0.0173	0.1317	1/1.142	0.1142
2	0.3144	0.0252	0.1584	1/1.142	0.1142

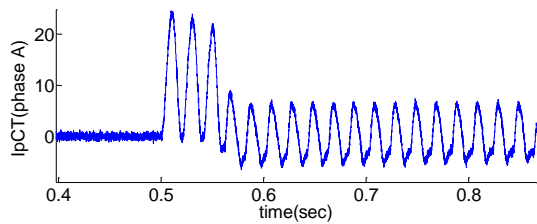
جدول ۴: نتایج شبیه سازی خطای داخلی ABCG - فاز A

a	mean	var	Std	rss	avp
0.5	0.3328	0.0205	0.1434	1/1.460	0.1313
0.75	0.2882	0.0482	0.2197	1/1.460	0.1313
1	0.2324	0.0773	0.2780	1/1.460	0.1313
1.5	0.3328	0.0205	0.1434	1/1.460	0.1313
1.75	0.3371	0.0176	0.1328	1/1.460	0.1313
2	0.3258	0.0251	0.1586	1/1.460	0.1313

بدین منظور به جریان های دیفرانسیل دو مقدار نویز ۲۰ دسی بل و ۳۰ دسی بل اعمال شده است. شکل ۸، نمونه ای از جریان خطای داخلی از نوع سه فاز به زمین و یک نمونه جریان هجومی مربوط فاز A در حضور ۲۰ دسی بل نویز نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۸: جریان فاز A در حضور ۲۰db نویز (الف) جریان خطای داخلی سه فاز به زمین (ب) جریان هجومی

همانند قبل پس از نمونه برداری از جریان های هجومی و خطای داخلی دارای نویز و اعمال الگوریتم تبدیل فوری به نمونه ها، پنج شاخص آماری محاسبه شد. مرتبط با خطای داخلی ۱۰۰ مورد از انواع خطاهای پایانه تک فاز به زمین، دوفاز به زمین و سه فاز به زمین در لحظات مختلف کلیدزنی همراه با مقاومت های گوناگون شبیه سازی شده است. مقادیر این شاخص ها در مورد خطای داخلی سه فاز به زمین فاز A در حضور ۲۰ دسی بل نویز در جدول (۸) و در حضور ۳۰ دسی بل نویز در جدول (۹) آورده شده است. ۵۰ مورد جریان هجومی دارای نویز نیز شبیه سازی شده است که نتایج مربوط به شاخص های آماری آن در مورد فاز A و در حضور ۲۰ و ۳۰ دسی بل نویز به ترتیب در جداول (۱۰) و (۱۱) قابل مشاهده است.

جدول ۸: نتایج خطای داخلی از نوع سه فاز به زمین با ۲۰db نویز - فاز A

a	mean	var	Std	rss	avp
۰/۵	۰/۳۳۲۸	۰/۰۲۰۵	۰/۱۴۳۵	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۰/۷۵	۰/۲۸۸۲	۰/۰۴۸۲	۰/۲۱۹۷	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۱	۰/۲۳۲۴	۰/۰۷۷۳	۰/۲۷۸۰	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۱/۵	۰/۳۳۲۸	۰/۰۲۰۵	۰/۱۴۳۴	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۱/۷۵	۰/۳۳۷۱	۰/۰۱۷۶	۰/۱۳۳۸	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۲	۰/۳۲۵۸	۰/۰۲۵۱	۰/۱۵۸۶	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳

جدول ۹: نتایج خطای داخلی از نوع سه فاز به زمین با ۳۰db نویز - فاز A

a	mean	var	std	rss	avp
۰/۵	۰/۳۳۲۸	۰/۰۲۰۵	۰/۱۴۳۵	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۰/۷۵	۰/۲۸۸۲	۰/۰۴۸۲	۰/۲۱۹۷	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳

جدول ۶: نتایج شبیه سازی جریان هجومی همراه با خطای داخلی

A فاز - ABG

a	mean	var	Std	rss	avp
۰/۵	۰/۵۱۵۹	۰/۰۹۷۷	۰/۳۱۲۶	۱/۹۰۷۶	۰/۳۶۳۸
۰/۷۵	۰/۴۲۴۶	۰/۱۸۳۵	۰/۴۲۸۴	۱/۹۰۷۶	۰/۳۶۳۸
۱	۰/۳۴۹۵	۰/۲۴۱۷	۰/۴۹۱۶	۱/۹۰۷۶	۰/۳۶۳۸
۱/۵	۰/۵۱۵۹	۰/۰۹۷۷	۰/۳۱۲۶	۱/۹۰۷۶	۰/۳۶۳۸
۱/۷۵	۰/۵۵۲۴	۰/۰۵۸۶	۰/۲۲۲۴	۱/۹۰۷۶	۰/۳۶۳۸
۲	۰/۵۶۱۱	۰/۰۴۹۰	۰/۲۲۱۴	۱/۹۰۷۶	۰/۳۶۳۸

جدول ۷: نتایج شبیه سازی جریان هجومی همراه با خطای داخلی

A فاز - ABCG

a	mean	var	std	rss	avp
۰/۵	۰/۵۱۶۱	۰/۰۹۷۸	۰/۳۱۲۷	۱/۹۰۸۵	۰/۳۶۴۰
۰/۷۵	۰/۴۲۴۶	۰/۱۸۳۸	۰/۴۲۸۷	۱/۹۰۸۵	۰/۳۶۴۰
۱	۰/۳۰۹۰	۰/۲۴۲۵	۰/۴۹۲۴	۱/۹۰۸۵	۰/۳۶۴۰
۱/۵	۰/۵۱۶۱	۰/۰۹۷۸	۰/۳۱۲۷	۱/۹۰۸۵	۰/۳۶۴۰
۱/۷۵	۰/۵۵۲۸	۰/۰۵۸۴	۰/۲۰۲۰	۱/۹۰۸۵	۰/۳۶۴۰
۲	۰/۵۶۱۶	۰/۰۴۸۷	۰/۲۲۰۸	۱/۹۰۸۵	۰/۳۶۴۰

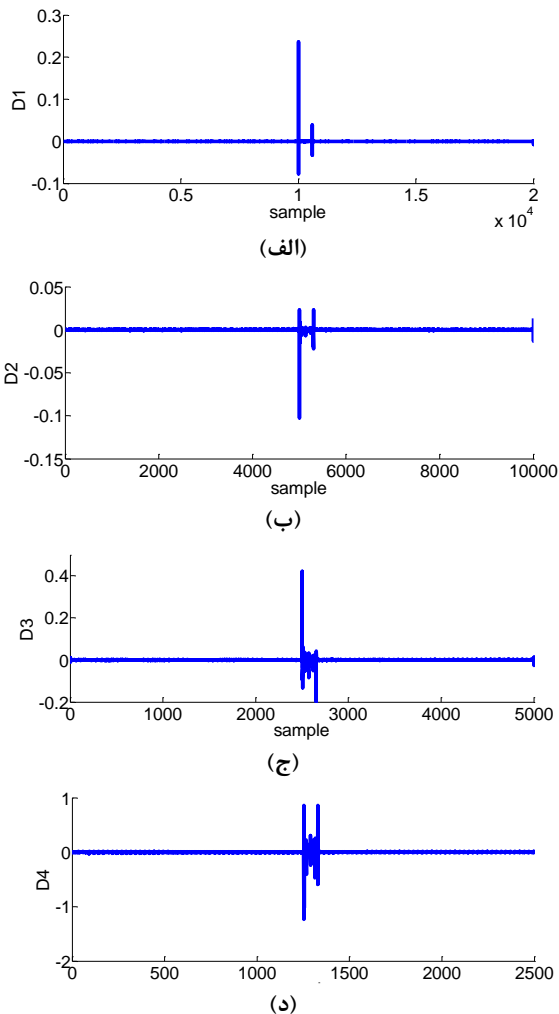
همان طور که در جداول نیز مشخص است مقادیر شاخص های آماری در خطای داخلی و در تمام مقادیر a، بزرگ تر از شاخص های آماری مربوط به جریان هجومی می باشد. در شبیه سازی ها مقدار شاخص میانگین انواع خطاهای داخلی بزرگتر از ۰/۲ است در حالی که همین شاخص در مورد جریان هجومی کوچکتر از ۰/۲ به دست آمده است. مقادیر واریانس در هر یک از انواع خطاهای داخلی مقداری غیر صفر دارد اما در وقوع جریان هجومی، مقدار این شاخص خیلی کوچک و نزدیک به صفر است که با احتساب چهار رقم اعشار ۰/۰۰۱ به دست آمده است. از آنجا که انحراف معیار جذر واریانس می باشد، مقدار این شاخص همانند واریانس در مورد خطای داخلی بزرگتر از جریان هجومی می باشد. شاخص بعدی جذر مجموع مربعات می باشد که با علامت اختصاری rss نشان داده شده است. در تمام انواع خطاهای داخلی مقداری بیشتر از ۱ دارد و هر چه خطا شدیدتر باشد مقدار بزرگتری به خود می گیرد. مقدار این شاخص در جریان هجومی کوچکتر از ۱ و حداکثر ۰/۰۵ می باشد. نکته قابل توجه دیگری که در مورد شاخص rss وجود دارد این است که مقدار آن در یک نوع خطا یا جریان هجومی، به ازای مقادیر مختلف a ثابت می ماند.

از نتایج به دست آمده مشاهده می شود شاخص توان متوسط در انواع خطاهای داخلی مقداری غیر صفر دارد که مقدار آن با شدت خطا رابطه مستقیم دارد در حالی که مقدار همین شاخص در مورد جریان هجومی حداکثر ۰/۰۰۵ می باشد. همانند شاخص rss، این شاخص نیز در یک پدیده و مقادیر مختلف a ثابت است.

۴-۵- عملکرد روش پیشنهادی با وجود نویز

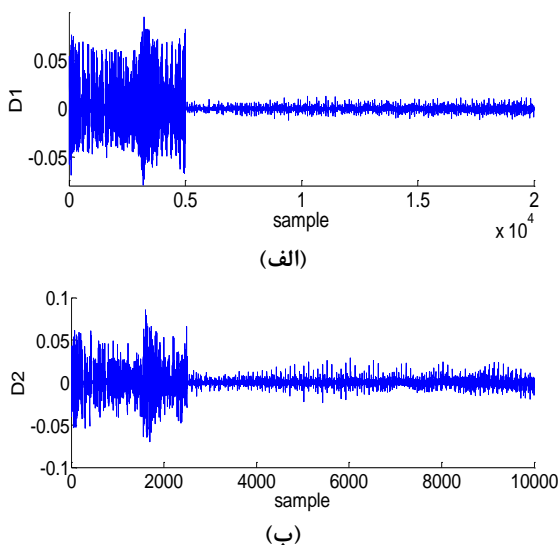
از آنجا که در عمل، جریان های دیفرانسیل دارای نویز می باشند، تصمیم گرفته شد تا عملکرد این تبدیل تحت شرایط نویزی نیز بررسی گردد.

سپس جریان‌های دیفرانسیلی به چهار سطح تجزیه شده‌است. نمونه‌ای از سطوح تجزیه در مورد خطای داخلی سه‌فاز به زمین و هم‌چنین جریان هجومی فاز A در شکل‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود.



شکل ۹: ضرایب جزئیات تبدیل موجک جریان خطای داخلی فاز A

D1(الف) D2(ب) D3(ج) D4(د)



۱	۰/۲۳۲۴	۰/۰۷۷۳	۰/۲۷۸۰	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۱/۵	۰/۳۳۲۸	۰/۰۲۰۵	۰/۱۴۳۴	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۱/۷۵	۰/۳۳۷۱	۰/۰۱۷۶	۰/۱۳۲۸	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳
۲	۰/۳۲۵۸	۰/۰۲۵۱	۰/۱۵۸۶	۱/۱۴۶۰	۰/۱۳۱۳

جدول ۱۰: نتایج جریان هجومی با ۲۰db نویز - فاز A

a	mean	var	std	rss	avp
۰/۵	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۴	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۰/۷۵	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۸	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۵۹	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱/۵	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱/۷۵	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱

جدول ۱۱: نتایج جریان هجومی با ۳۰db نویز - فاز A

a	mean	var	std	rss	avp
۰/۵	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۰/۷۵	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۹	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۶۰	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱/۵	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۱/۷۵	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱
۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۰۱

با توجه به مقادیر جداول مشاهده می‌شود، چهار نتیجه‌ای که در در حالت بدون نویز به دست آمد، در شرایط نویزی نیز صادق است و بنابراین الگوریتم پیشنهادی در شرایط نویزی نیز عملکرد صحیحی دارد و تحت تأثیر نویز قرار نمی‌گیرد.

در ادامه به منظور به دست آوردن دقت روش پیشنهادی تعداد ۱۰۰ مورد خطای داخلی و جریان هجومی شبیه‌سازی و تست شده‌است. در جدول زیر درصد خطای روش در مورد تعدادی از خطاهای داخلی و جریان هجومی آورده شده‌است.

جدول ۱۲: تست روش پیشنهادی

		بدون نویز (/)	در حضور نویز (/)
انواع خطای داخلی	AG	۹۷	۹۷
	BG	۹۶	۹۶
	CG	۹۷	۹۷
	ABG	۹۹	۹۹
	ACG	۹۹	۹۹
	BCG	۹۸	۹۸
	ABCG	۹۹	۹۹
جریان هجومی		۹۹	۹۹

۶- مقایسه روش پیشنهادی با تبدیل موجک

به منظور مقایسه روش تبدیل فوریه کسری با تبدیل موجک، تبدیل موجک به جریان‌های دیفرانسیلی اعمال شده‌است. بعد از بررسی‌های انجام شده و با توجه به میزان شباهت db4 با سیگنال‌های دیفرانسیلی مورد نظر، از این نوع موجک به عنوان موجک مادر استفاده می‌گردد.

در نهایت ماحصل نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و تبدیل موجک به منظور مقایسه بهتر در ادامه آمده است. در این جدول خطای داخلی از نوع سه فاز به زمین در نظر گرفته شده و تمام اعداد مربوط به فاز A است. به منظور جلوگیری از تفصیل جدول تنها شاخص rSS بررسی شده است.

جدول ۱۷: مقایسه روش پیشنهادی با تبدیل موجک - فاز A

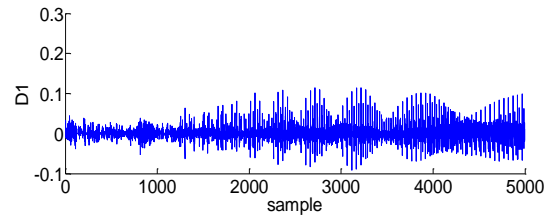
		مقدار rSS جریان هجومی		مقدار rSS خطای داخلی	
		بدون نویز	با نویز (۲۰db)	بدون نویز	با نویز (۲۰db)
تبدیل فوریه کسری	a=۰/۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۲۴۴	۱/۱۴۶۰	۱/۱۴۶۰
	a=۱	۰/۰۲۴۴	۰/۰۲۴۴	۱/۱۴۶۰	۱/۱۴۶۰
	a=۰/۷۵	۰/۰۲۴۴	۰/۰۲۴۴	۱/۱۴۶۰	۱/۱۴۶۰
تبدیل موجک	D1	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۵۵	۰/۱۶۹۱
	D2	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۲۰	۰/۱۲۶۳
	D3	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۲۵	۰/۱۰۵۴	۰/۱۲۷۱
	D4	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱۹	۰/۱۶۰۲	۰/۱۶۵۲

۷- نتیجه گیری

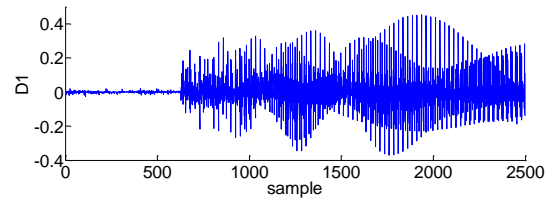
در این مقاله تبدیل فوریه کسری، روش جدیدی است که جهت تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی در ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. صحت عملکرد روش پیشنهادی با شبیه سازی یک سیستم قدرت نمونه بررسی گردید و مشاهده شد که بعد از اعمال الگوریتم و محاسبه شاخص های آماری، rSS بهترین حاشیه اطمینان را جهت تمایز جریان هجومی از جریان خطای داخلی ارائه می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، روش پیشنهادی از دقت و قابلیت اطمینان بالایی در راستای تشخیص و تمایز جریان هجومی از جریان خطای داخلی در ترانسفورماتورهای قدرت برخوردار است. همچنین روش پیشنهادی به سیگنال های دارای نویز نیز اعمال شد. از طرف دیگر به منظور مقایسه روش پیشنهادی با روش تبدیل موجک که در مقاله های بسیاری استفاده شده است، شاخص های آماری بعد از اعمال تبدیل موجک بدون حضور نویز و با حضور نویز محاسبه گردید و مشاهده شد که روش پیشنهادی بر خلاف تبدیل موجک در حضور نویز نیز پایدار باقی می ماند.

مراجع

- [1] H. Weng, and X. Lin, "Studies on the unusual mal-operation of transformer differential protection during the nonlinear load switch-in," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, May, 2009.
- [2] A. Hooshyar, M. SanayePasand, S. Afsharnia, M. Davarpanah and B. M. Ebrahimi, "Time-domain analysis of differential power signal to detect magnetizing inrush in power transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, no. 3, June, 2012.
- [3] O. Ozgonenel and S. Karagol, "Power transformer protection based on decision tree approach," IET Electric Power Applications, vol. 8, no. 7, July, 2014.



(ج)



(د)

شکل ۱۰: ضرایب جزئیات تبدیل موجک جریان هجومی فاز A
الف) D1 ب) D2 ج) D3 د) D4

در هر سطح از تجزیه، مقادیر هر یک از شاخص های آماری محاسبه شده است. نتایج مقادیر شاخص ها در هر سطح برای جریان هجومی و خطای داخلی از نوع سه فاز به زمین فاز A در جداول ۱۵-۱۲ آورده شده است. همان طور که مشاهده می گردد، شاخص ها در حضور نویز پایدار نیستند.

جدول ۱۳: نتایج تبدیل موجک جریان هجومی بدون نویز - فاز A

سطوح تجزیه	mean	var	std	rss	avp
D1	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱
D2	-۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
D3	-۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲
D4	-۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰

جدول ۱۴: نتایج تبدیل موجک جریان هجومی با ۲۰db نویز - فاز A

سطوح تجزیه	mean	var	std	rss	avp
D1	-۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰
D2	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰
D3	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰
D4	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰

جدول ۱۵: نتایج تبدیل موجک جریان خطای داخلی بدون نویز - فاز A

سطوح تجزیه	mean	var	std	rss	avp
D1	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۰۰
D2	-۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۳۲۰	۰/۰۰۰۰
D3	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۴۰	۰/۱۰۵۴	۰/۰۰۰۲
D4	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۲۸۶	۰/۱۶۰۲	۰/۰۰۰۸

جدول ۱۶: نتایج تبدیل موجک جریان خطای داخلی با ۲۰db نویز - فاز A

سطوح تجزیه	Mean	var	std	Rss	avp
D1	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۱۸	۰/۱۶۹۱	۰/۰۰۰۱
D2	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۲۳	۰/۱۲۶۳	۰/۰۰۰۲
D3	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۶۹	۰/۱۲۷۱	۰/۰۰۰۳
D4	-۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۲۸۰	۰/۱۶۵۲	۰/۰۰۰۸

- test,"IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 23, no. 2, pp. 717-725, April, 2008.
- [17] H. M. Ozaktas, Z. Zalevsky and M. A. Kutay, The fractional Fourier transform with applications in optics and signal processing. Chichester, Wiley Publishing, 2001.
- [18] E. Sejdi, I. Djurovi and J. Jiang, "Timefrequencyfeature representation using energy concentration: An overview of recent advances," Digital Signal Processing, vol. 19, no. 1, pp. 153—183, January, 2009.
- [19] D. Mendlovic and H.M.Ozaktas, "Fractional fourier transforms and their optical implementation: part I," Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, vol. 10, no. 9, pp. 1875-1881, September, 1993.
- [20] D. Mendlovic and H. M. Ozaktas, "Fractional Fourier transforms and their optical implementation: part II," Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, vol. 10, no. 12, pp. 2522-2531, December, 1993.
- [21] L. B. Almeida, "The fractional fourier transform and time frequency representations," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 42, no. 11, pp. 3084-3091, Nov, 1994.
- [22] G. Cariolaro, T. Erseghe, P. Kraniuskas and N. Laurenti, "A unified framework for the fractional fourier transform," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 46, no. 12, pp. 3206-3219, Dec, 1998.
- [23] V. Namias, "The fractional order fourier transform and its application to quantum mechanics," IMA Journal of Applied Mathematics, vol. 25, no. 3, pp. 241-265, March, 1980.
- [24] M. Irfan, L. Zheng and H. Shahzad, "Review of computing algorithms for discrete fractional Fourier transform," Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, vol. 6, no. 11, pp. 1911-1919, July, 2013.
- [25] A. Rezaei-Zare, R. Iravani, M. Sanaye-Pasand, H. Mohseni, S. Farhangi, "An accurate current transformer model based on Preisach theory for the analysis of electromagnetic transients," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 1, pp. 233-242, Jan, 2008.
- [۲۶] بهرام نوشاد، مرتضی رزاز و سید قدرت اله سیف السادات. تعیین یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان برای آنالیز حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی در طی خطاهای الکتریکی. مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۱، شماره ۲، صفحات ۸۶-۷۵، ۱۳۹۰.
- [27] U.D. Annakkage, P.G. McLaren, E. Dirks, "A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp. 51-67, Jan, 2000.
- [28] A.A. Hossum-Eldin, 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 Systems Research, Vol. 81, no. 1, pp. 1-6, January, 2011.
- [4] Z. Moravej, D. N. Vishwakarma and S. P. Singh, "Application of radial basic function neural network for differential relaying of a power transformer," Computers & Electrical Engineering, vol. 29, no. 3, May, 2003.
- [5] H. Balaga, N. Gupta and D. N. Vishwakarma, "GA trained parallel hidden layered ANN based differential protection of three phase power transformer," Int. J. Electr. Power Energy Syst, vol. 67, May, 2015.
- [6] N. Logan than and A. Pavithra, "Distinguishing the Various Faults in transformer and Its Protection Using Support Vector Machine," International Journal of Research and Engineering, vol. 2, no. 4, Apr, 2015.
- [۷] امید قادری و محمدرضا فیضی، «روش جدید برای تخمین عمر باقی‌مانده ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از آنالیز گازهای محلول در روغن»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۱، جلد ۳۹، صفحه ۳۶-۲۵، ۱۳۸۸.
- [8] H. O. Mota, F. H. Vasconcelos and C. L. de Castro, "A comparison of cycle spinning versus stationary wavelet Transform for the Extraction of Features of Partial Discharge signals," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 2, May 2016.
- [9] O. Ozgonenel and S. Karagol, "Transformer differential protection using wavelet transform," Electric Power Systems Research, vol. 114, pp. 60-67, September, 2014.
- [10] A. Ashrafian, 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, October, 2012.
- [11] A. Ashrafian, M. Rostami and G. B. Gharehpetian, "Characterization of internal disturbances and external faults in transformers using an S-transform-based algorithm," Tyrk J Elec Eng & Comp Sci, vol. 21, no. 2, pp. 330-349, April, 2013.
- [12] Z. Moravej, A. A. Abdoos and M. Sanaye-Pasand, "Power transformer protection scheme based on time-frequency analysis," Int. Trans. Electr. Energy Syst, vol. 23, no. 4, pp. 473-493, January, 2013.
- [13] A. Ashrafian, B. Vahidi and M. Mirsalim, "Time-time-transform application to fault diagnosis of power transformers," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 8, no. 6, pp. 1156-1167, June, 2014.
- [14] S. K. Murugan, S. P. Simon, P. S. R. Nayak, K. Sundareswaran and N. P. Padhy, "Power transformer protection using chirplet transform," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 10, no. 10, pp. 2520-2530, July, 2016.
- [15] A. M. Shah and B.R. Bhalja, "Fault discrimination scheme for power transformer using random forest technique," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 10, no. 6, pp. 1431-1439, April, 2016.
- [16] E. Al-Ammar, G. G. Karady and H. J. Sim, "Novel technique to improve the fault detection sensitivity in transformer impulse

زیر نویس‌ها

⁶ variance (var)

⁷ standard deviation (std)

⁸ root sum of squares (rss)

⁹ average power (avp)

¹ Decision Tree (DT)

² Artificial Neural Network (ANN)

³ Support Vector Machine (SVM)

⁴ Chirplet Transform

⁵ mean