

## تشخیص جریان هجومی و جلوگیری از عملکرد بی‌مورد رله دیفرانسیل با استفاده از شکل‌های لیسازور جریان

بهرروز طاهری<sup>(۱)</sup> - سید امیر حسینی<sup>(۲)</sup> - حسین عسکریان ایبانه<sup>(۳)</sup> - فرزاد رضوی<sup>(۴)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

(۲) استادیار - گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، اصفهان، ایران

(۳) استاد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(۴) استادیار - دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۹۸/۸/۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۷

**خلاصه:** جریان هجومی همدردی که در ترانسفورماتورهای سری و موازی اتفاق می‌افتد، می‌تواند دو مشکل عمده را در حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت ایجاد کند. اولین مشکل این است که سیستم حفاظت از ترانسفورماتور ممکن است به علت افزایش زیاد جریان عملکرد نادرست داشته باشد. دوم ممکن است وقتی یک سیستم حفاظت مشترک برای ترانسفورماتورهای موازی طراحی می‌گردد، موجب شود که جریان ورودی خط که حاصل جمع برداری دو جریان ورودی است، شبیه خطای تک فاز شود و به همین دلیل، سیستم حفاظت عملکرد اشتباه داشته باشد. بدین منظور در این مقاله یک روش جدید تشخیص جریان هجومی بر پایه لیسازورهای جریان ارائه شده است. روش بیان شده سرعت بالایی در تشخیص خطا دارد، هم‌چنین این روش در مقابل نویزهای شدید همچون نویز گوسی سفید مقاوم است. این روش با استفاده از یک شبکه با ترانسفورماتورهای موازی ۲۳۰ به ۶۳ کیلوولت و گروه‌برداری Ynd11 به‌ازای حالت‌های مختلف جریان هجومی و خطاهای همزمان با آن، مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم‌چنین روش پیشنهادی با روش‌های متداول صنعتی (از جمله روش هارمونیک دوم، روش عبور از صفر سیگنال و روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان) که امروزه در رله‌های حفاظتی به‌ویژه در رله‌های دیفرانسیل نسل پنجم شرکت زیمنس استفاده می‌شوند، مقایسه شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهند که روش پیشنهادی عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به روش‌های معمول صنعتی دارد.

**کلمات کلیدی:** جریان هجومی همدردی، رله دیفرانسیل، حفاظت سیستم‌های قدرت، لیسازورهای جریان.

## A New Inrush Current Detection Method Based on Current Lissajous Figure

Behrooz Taheri<sup>(1)</sup> - Seyed Amir Hosseini<sup>(2)</sup> - Hossein Askarian-Abyaneh<sup>(3)</sup> - Farzad Razavi<sup>(4)</sup>

(1) Young Researchers and Elite Club, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

(2) Department of Electrical Engineering, Golpayegan University of Technology, Isfahan, Iran.  
hosseini.amir@gut.ac.ir

(3) Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

(4) Faculty of Electrical, Biomedical and Mechatronics Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

**Abstract:** The sympathetic Inrush current that occurs in series and parallel transformers can cause the creation of two major problems in the protection of power transformers. The main problem is that the peak of the inrush current for this case is more severe rather than common inrush current that the protection system may mal-operate. Besides, when a common protection system is designed for parallel transformers, the line input current, the vector summation of the input currents, will be detected as a single-phase fault that can cause the incorrect operation of the protection system. For this purpose, this paper presents a novel approach based on Lissajous of current signal for detection of inrush current phenomenon. The proposed method detects the faults very quickly; as well as, this method has appropriate operation under noisy conditions, like white Gaussian noise. This method is evaluated using a network consist of 230 to 63 kV parallel transformers with vector group ynd11. The results show that the proposed method performs better than conventional industrial schemes, such as second harmonic, zero-crossing, and waveform analysis method.

**Index Terms:** Sympathetic Inrush current, Differential relay, Power system protection, Current lissajous.

## ۱- مقدمه

جریان هجومی<sup>۱</sup> یک حالت غیرطبیعی در سیستم قدرت است. این پدیده می‌تواند موجب عملکرد بی‌مورد رله دیفرانسیل و در نهایت مختل شدن عملکرد سیستم قدرت شود. جریان هجومی می‌تواند در تجهیزات مختلف سیستم قدرت مانند بانک‌های خازنی، موتورهای برفی بزرگ و ترانسفورماتورهای قدرت رخ دهد. شدیدترین نوع جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت رخ می‌دهد که می‌تواند تا چندین برابر جریان نامی ترانسفورماتور افزایش یابد [۱]. در واقع، جریان هجومی ترانسفورماتور قدرت در زمان وصل کلید ترانسفورماتور ایجاد می‌شود و ممکن است تا چندین برابر بیشتر از جریان نامی ترانسفورماتور افزایش یابد [۲]. این جریان هجومی می‌تواند باعث اشتباه در رله دیفرانسیل شده و موجب ارسال اشتباه فرمان قطع به کلید قدرت گردد [۱، ۳-۶]. بر این اساس باید در سریع‌ترین زمان ممکن بین جریان هجومی و خطا در رله دیفرانسیل تمایز گذاشته شود. برای تشخیص جریان هجومی مطالعات گسترده‌ای انجام شده است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

اولین روش‌های استفاده‌شده برای تشخیص جریان هجومی از نسبت هارمونیک دوم به هارمونیک اصلی استفاده می‌کنند [۷-۱۰]. نسبت هارمونیک دوم به هارمونیک اصلی در زمان ایجاد جریان هجومی بیشتر از زمان ایجاد خطا است. با این وجود، این روش‌ها قابلیت تشخیص خطا با هارمونیک دوم بالا را ندارند. همچنین با پیشرفت تکنولوژی، ترانسفورماتورهایی تولید شده است که هارمونیک دوم در آن‌ها به هفت درصد کاهش داده شده است. این عمل سبب می‌شود که هارمونیک دوم خطا همواره بیشتر از هارمونیک دوم جریان هجومی باشد و بنابراین صحت عملکرد این دسته از مطالعات را با چالش همراه می‌سازد [۱۱]. در روش ارائه شده در مرجع [۸] از دیگر هارمونیک‌ها (هارمونیک‌های دوم و چهارم) و در مرجع [۱۰] روشی بر اساس توالی منفی توان برای تشخیص جریان هجومی، ارائه شده است. در مطالعات [۱۲، ۱۳] از طول فاصله زمانی بین نقاط عبور از صفر جریان دیفرانسیل برای تشخیص جریان هجومی و بلاک کردن رله دیفرانسیل استفاده شده است. این روش در زمان ایجاد اشباع ترانسفورماتور جریان<sup>۲</sup> به دلیل وجود یک مولفه DC بزرگ در جریان هجومی دچار اشتباه می‌شود [۱۴]. در مقالات [۱۵-۱۸] روش‌های استخراج ویژگی‌ها بر پایه تبدیل موجک جهت تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی پیشنهاد شده است. یک طرح جدید برای حفاظت از ترانسفورماتور بر اساس زاویه متوسط مشتق دوم نظیر جریان دیفرانسیل برای تشخیص جریان هجومی در [۱۹] ارائه شده است. در این روش با استفاده از اختلاف زاویه فاز، بین جریان هجومی و خطا تمایز گذاشته می‌شود. مقاله [۲۰] از فرکانس لحظه‌ای بر پایه تبدیل هیلبرت برای تشخیص جریان هجومی استفاده می‌کند. روش ارائه شده در [۲۱] از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> برای تشخیص جریان هجومی استفاده کرده است. مقالات [۲۲، ۲۳] شیوه‌ای بر اساس منطق فازی<sup>۴</sup> ارائه داده‌اند. همچنین روش مرکب از ماشین بردار پشتیبان<sup>۵</sup>، به‌عنوان طبقه‌بندی کننده و تبدیل موجک به‌عنوان استخراج ویژگی نیز در

[۲۴] ارائه شده است. لازم به ذکر است، در برخی دیگر از روش‌های پیشنهادی، سایر طبقه‌بندی کننده‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی و نوع دیگر ANN یعنی شبکه عصبی احتمالی<sup>۶</sup> برای تشخیص خطاهای داخلی پیشنهاد شده‌اند [۲۵-۲۸]. در مرجع [۲۹]، شبکه عصبی مصنوعی آموزش یافته با الگوریتم PSO هسته اصلی رله‌ی دیفرانسیلی هوشمند پیشنهادی را تشکیل داده‌اند. با این وجود، روش‌های هوشمند نیاز به ایجاد شبیه‌سازی‌های آفلاین زیادی برای آموزش نرخ‌های متفاوت خطا و جریان هجومی دارند. روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان در مرجع [۳۰] ارائه شده است. این روش در زمان ایجاد جریان هجومی همدردی دچار اشتباه شده و موجب قطع خطوط می‌شود.

همان‌طور که بررسی شد اکثر روش‌های تشخیص جریان هجومی دارای مشکلاتی مانند اشتباه در تشخیص خطا به دلیل وجود هارمونیک بالا در برخی از خطاها، نداشتن عملکرد درست در ترانسفورماتورهای جدید، نیاز به آموزش نرخ‌های زیاد خطا و جریان هجومی و احتیاج به داشتن یک مقدار آستانه دقیق هستند که کاربردی بودن آن‌ها را بسیار محدود می‌کند. بر این اساس در این مقاله یک شیوه جدید تشخیص جریان هجومی بر اساس لیسازور<sup>۷</sup> جریان ارائه شده است. این روش از جریان‌های دیفرانسیل برای تشخیص جریان هجومی استفاده می‌کند. بدین منظور ابتدا جریان‌های دیفرانسیل نسبت به هم رسم می‌شوند، سپس در ادامه تعداد نقاط در یک فاصله معین به‌دست آورده می‌شود. با علم به این موضوع که تعداد نقاط در زمان رخداد جریان هجومی بیشتر از تعداد نقاط در زمان رخداد خطا است، روش پیشنهادی به‌خوبی قادر به ایجاد تمایز میان انواع خطا و جریان‌های هجومی است. از ویژگی‌های روش پیشنهادی در این مقاله، سرعت بالای تشخیص خطای آن است. همچنین این روش در مقابل نویزهای شدید همچون نویز گوسی سفید مقاوم است. این روش با استفاده از نرم‌افزار دیگسایلنت و متلب با استفاده از یک شبکه با ترانسفورماتورهای موازی ۲۳۰ به ۶۳ کیلوولت با گروه برداری Ynd11 مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به روش‌های معمول صنعتی از جمله روش هارمونیک دوم، روش عبور از صفر سیگنال و روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان<sup>۸</sup> دارد.

ساختار این مقاله بدین شکل است. در بخش دوم، روش جدید پیشنهادی ارائه شده است. در بخش سوم، ویژگی‌های جریان هجومی همدردی ارائه شده است. در بخش چهارم، روش پیشنهادی به‌ازای حالت‌های مختلف جریان هجومی همدردی و خطاهای داخلی ترانسفورماتور قدرت در شبکه ۲۳۰ به ۶۳ کیلوولت با استفاده از ترانسفورماتور Ynd11 مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش پنجم، روش پیشنهادی مقاله حاضر با روش‌های متداول صنعتی مقایسه و تحلیل شده است.

## ۲- روش جدید پیشنهادی

### ۲-۱- فرمولاسیون روش پیشنهادی

برای تمایز گذاشتن بین جریان هجومی و خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت ابتدا نیاز است تا سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال تبدیل شود.

بعد از محاسبه  $I_{diff}$  ها هر  $I_{diff}$  یکبار بر اساس  $I_{diff}$  دیگر رسم می‌شود. به عنوان مثال یک بار  $I_{diffA}$  بر اساس  $I_{diffB}$ ،  $I_{diffB}$  بر اساس  $I_{diffA}$  و  $I_{diffC}$  بر اساس  $I_{diffB}$  رسم می‌شود. در این مقاله برای نشان دادن عملکرد الگوریتم فقط از لیسازور  $I_{diffA}$  بر اساس  $I_{diffB}$  استفاده شده است. بر این اساس فاز جریان لحظه‌ای از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$i = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

در این معادله  $I_m$  دامنه سیگنال و  $\theta$  زاویه سیگنال است. با در نظر گرفتن مدل منبع ارائه شده در مطالعات [۳۱، ۳۲]، جریان فاز  $I_{diffA}$  را می‌توان به صورت روابط (۵) و (۶) بیان کرد.

$$I_{diffA} = I_{m11} \sin(\omega_1 t + \theta_{i1}) + I_{m21} \sin(\omega_2 t + \theta_{i2}) \quad (5)$$

$$I_{diffB} = I_{m12} \sin(\omega_1 t + \theta_{i1}) + I_{m22} \sin(\omega_2 t + \theta_{i2}) \quad (6)$$

در این روابط  $I_{m11}$  دامنه جزء اول جریان  $I_{diffA}$  و  $I_{m21}$  دامنه جزء دوم جریان  $I_{diffA}$  می‌باشند. به همین ترتیب،  $I_{m12}$  دامنه جزء اول جریان  $I_{diffB}$  و  $I_{m22}$  دامنه جزء دوم جریان  $I_{diffB}$  هستند. بر این اساس شکل لیسازور  $I_{diffA}$  و  $I_{diffB}$  با استفاده از روابط (۵) و (۶) قابل ترسیم است. لازم به ذکر است، شیب مماس شکل لیسازور مدنظر با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$g = \frac{dI_{diffA}}{dI_{diffB}} = \frac{dI_{diffA}}{dt} / \frac{dI_{diffB}}{dt} = \quad (7)$$

$$\frac{\omega_1 I_{m11} \cos(\omega_1 t + \theta_{i1}) + \omega_2 I_{m21} \cos(\omega_2 t + \theta_{i2})}{\omega_1 I_{m12} \cos(\omega_1 t + \theta_{i1}) + \omega_2 I_{m22} \cos(\omega_2 t + \theta_{i2})}$$

فاصله زمانی بین دو داده متوالی را در شکل لیسازور می‌توان از رابطه (۸) به دست آورد.

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega} = \frac{1}{2f} \quad (8)$$

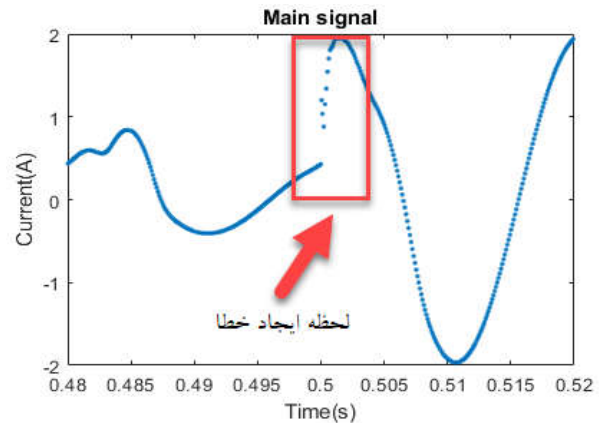
در این رابطه  $f$  فرکانس و  $\omega = 2\pi f$  است. اگر فرکانس نمونه برداری  $f_s$  باشد (فرکانس نمونه برداری در این مقاله برابر ۱ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است) آنگاه تعداد نقاط نمونه در فاصله  $\Delta t$  از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$SI = \frac{\Delta t}{1/f_s} = \frac{f_s}{2f} \quad (9)$$

بعد از رسم  $I_{diffA}$  بر اساس  $I_{diffB}$  در زمان خطای سه فاز همزمان با جریان هجومی، شکل (۳-الف) به وجود می‌آید. شکل (۳-ب) تعداد نقاط در یک فاصله مشخص (۲۰ میلی آمپر در محور X ها و ۵۰ میلی آمپر در محور Y ها) در زمان ایجاد جریان هجومی را نشان می‌دهد، همچنین در شکل (۳-ج) تعداد نقاط در یک فاصله زمانی در هنگام رخداد خطای سه فاز نشان داده شده است. همان طور که از این شکلها مشخص است تعداد نقاط موجود در یک فاصله مشخص در زمان جریان هجومی بیشتر از تعداد این نقاط در زمان بروز خطا است. با استفاده از این ویژگی می‌توان بین جریان هجومی و خطا تمایز ایجاد نمود. بر اساس موارد بیان شده شرط تشخیص جریان هجومی مطابق رابطه (۱۰)، پیشنهاد می‌شود.

$$If (SI > K) \Rightarrow \text{Inrush current detection} \quad (10)$$

برای انجام این کار ابتدا باید از سیگنال جریان نمونه برداری شود. نمونه‌های به دست آمده از سیگنال جریان در طول رخداد جریان هجومی کاملاً پیوسته هستند، این در صورتی است که همین نمونه‌ها در زمان رخداد خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت پیوستگی خود را از دست داده و با سرعت بیشتری تغییر می‌کنند. شکل (۱) این ویژگی داده‌های نمونه برداری شده را نشان می‌دهد. در این مقاله برای استفاده از این ویژگی از شکل‌های لیسازور جریان استفاده می‌شود.



شکل (۱): تغییرات داده‌های نمونه برداری شده در زمان خطا  
Fig. (1): Changes in sampled data at fault time

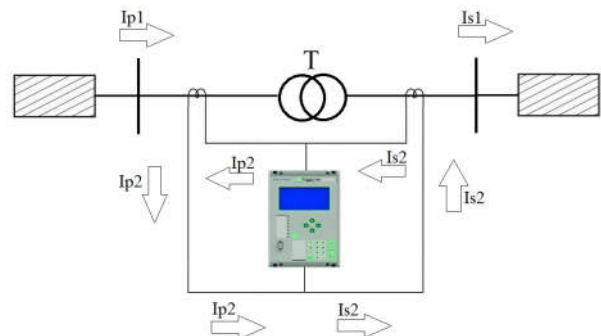
از شکل‌های لیسازور در مطالعه [۳۱] برای تشخیص نوسان توان در رله‌های دیستانس استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های شکل‌های لیسازور جریان به‌ویژه داشتن ماهیت مشخص در هنگام شرایط جریان هجومی و خطا، لذا در مقاله حاضر از این شکل‌ها برای توسعه یک روش تشخیص جریان هجومی در رله‌های دیفرانسیل استفاده شده است. برای استفاده از لیسازور جریان ابتدا لازم است تا مقدار  $I_{diff}$  در هر فاز با توجه به شکل (۲) به دست آورده شود. بر این اساس مقدار  $I_{diff}$  در هر فاز از روابط (۱) تا (۳) قابل محاسبه است.

$$I_{diffA} = I_{P2A} + I_{S2A} \quad (1)$$

$$I_{diffB} = I_{P2B} + I_{S2B} \quad (2)$$

$$I_{diffC} = I_{P2C} + I_{S2C} \quad (3)$$

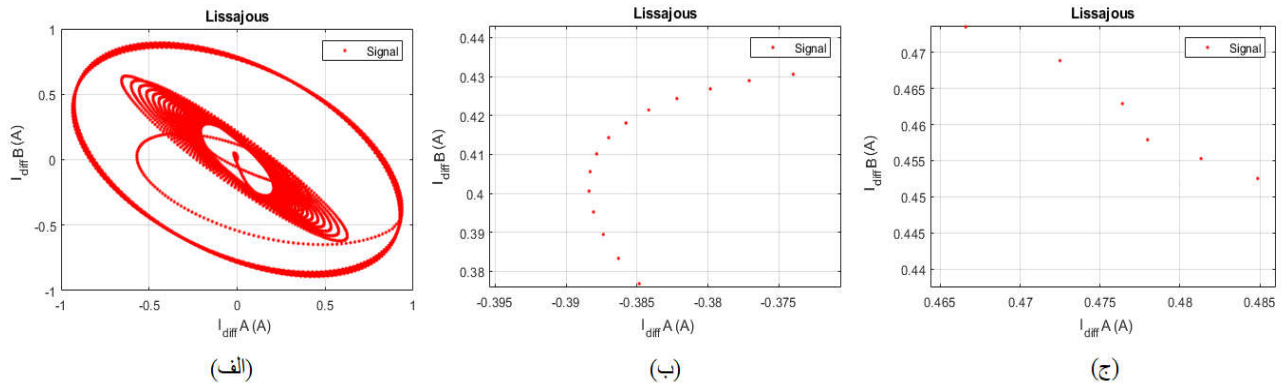
در این روابط  $I_p$  ها جریان‌های طرف اولیه در هر فاز و  $I_s$  ها جریان‌های طرف ثانویه ترانسفورماتور هستند.



شکل (۲): حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت  
Fig. (2): Differential protection in power transformer

هجومی می شود. در ادامه در زمان ۵۰۰ میلی ثانیه یک خطای سه فاز بر روی سیم پیچ های ترانسفورماتور قرار داده شده است. براساس شکل (۴) حدود ۱۸/۵ میلی ثانیه زمان نیاز است تا شکل لیسازور از حالت جریان هجومی به حالت خطا وارد شود.

در این رابطه  $K$  تعداد نقاط مجاز در یک فاصله مشخص است. اگر تعداد نقاط از این مقدار بیشتر باشد، جریان هجومی تشخیص داده می شود. شکل (۴) لیسازور رسم شده  $I_{diffA}$  بر اساس  $I_{diffB}$  در طول زمان را نشان می دهد. برای ایجاد این شکل ابتدا کلیدهای قدرت ترانسفورماتور در زمان ۲۰ میلی ثانیه بسته شده اند که این مسئله موجب ایجاد جریان



شکل (۳): الف) لیسازور جریان ها در زمان جریان هجومی و رخداد خطای سه فاز ب) تعداد نقاط در یک فاصله معین در زمان جریان هجومی ج) تعداد نقاط در یک فاصله معین در زمان رخداد خطای سه فاز

Fig. (3): a) Lissajous current during the inrush current and three-phase fault. b) The number of points in a specified distance when an inrush current occurs c) The number of points in a specified distance when a three-phase fault occurs

رخداد انواع خطا مقدار  $SI$  به دست آمده همواره کمتر از ۱۰ است. در حالت نویزی شدن سیگنال برای مقدار  $SI$  دو عدد درج شده است، عدد ۱۹ به هنگام وقوع جریان هجومی و عدد ۸ برای وقوع خطا در شبکه.

Table (1): Computer simulations needed to determine the threshold value

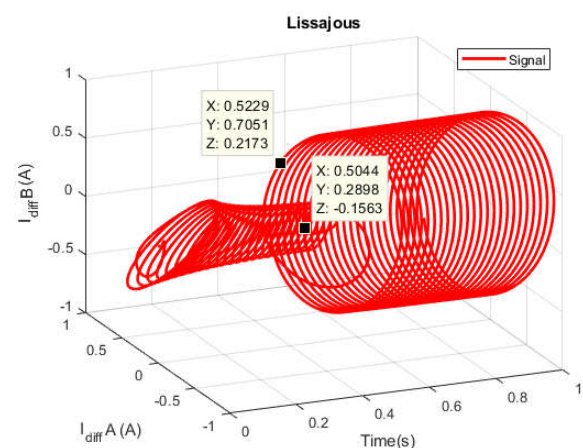
جدول (۱): شبیه سازی های کامپیوتری مورد نیاز برای تعیین مقدار آستانه

ردیف	نوع شبیه سازی	زاویه کلیدزنی	مقدار $SI$
۱	جریان هجومی	۰	۱۵
۲		۸۰	۱۶
۳		۱۲۰	۱۵
۴	جریان هجومی همدردی	۰	۱۴
۵		۸۰	۱۵
۶		۱۲۰	۱۵
۷	خطای تک فاز	-	۵
۸	خطای دو فاز	-	۶
۹	خطای سه فاز	-	۵
۱۰	نویزی شدن سیگنال	-	۸-۱۹

بر اساس تحلیل های انجام شده، مشخص است که مقدار  $SI$  به دست آمده در حالت های مختلف جریان هجومی همواره بیشتر از ۱۰ و این مقدار برای خطاهای مختلف کمتر از ۱۰ است. به همین دلیل مقدار آستانه در این مقاله مقدار ۱۰ در نظر گرفته می شود.

### ۳- جریان هجومی همدردی

پدیده جریان هجومی همدردی<sup>۹</sup> در ترانسفورماتورهای سری و موازی اتفاق می افتد. به منظور توصیف این پدیده و ارزیابی روش پیشنهادی به هنگام وقوع آن، شبکه شکل (۵) ارائه شده است. بر اساس شبکه نشان داده شده در شکل (۵)، ترانسفورماتور T2 در حالت اتصال به شبکه است و ترانسفورماتور T1 با بسته شدن کلید قدرت<sup>۱۰</sup> به شبکه متصل می شود. پس از بسته شدن کلید قدرت جریان هجومی از طریق



شکل (۴): لیسازورهای جریان در حالت سه بعدی در زمان رخداد جریان هجومی و خطای سه فاز

Fig. (4): 3D Lissajous in inrush current and a three-phase fault.

### ۲-۲- نحوه تعیین مقدار آستانه

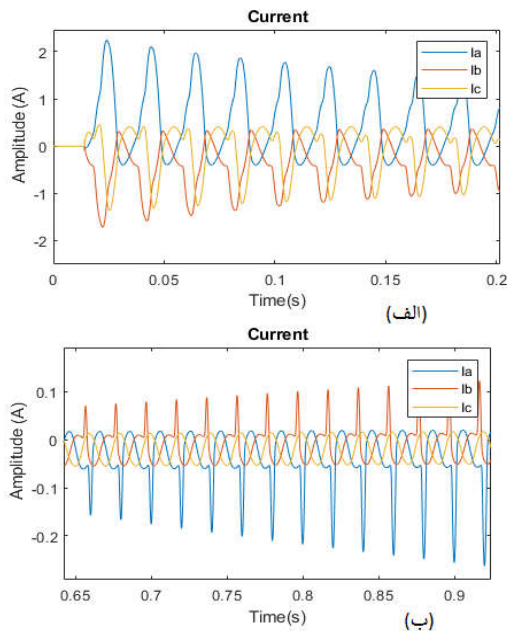
همان طور که در قسمت قبل بیان شد برای عملکرد درست روش پیشنهادی نیاز به تعیین مقدار مناسب آستانه است. مقدار آستانه بر اساس شبیه سازی های کامپیوتری حالات مختلف جریان هجومی و خطا به دست می آید. جدول (۱) شبیه سازی های مورد نیاز برای تعیین درست مقدار آستانه را نشان می دهد. بر اساس موارد بیان شده در این جدول برای تعیین مقدار آستانه نیاز به شبیه سازی جریان هجومی با زاویه کلیدزنی مختلف، جریان هجومی همدردی، انواع خطا و حالت نویزی شدن سیگنال است.

همان طور که از جدول (۱) مشخص است در زمان ایجاد جریان هجومی معمولی و جریان هجومی همدردی مقدار  $SI$  به دست آمده از رابطه (۹) همواره در شرایط مختلف کلیدزنی بیشتر از ۱۰ است. اما در زمان

شکل (۷-الف) شکل موج جریان در حالت جریان هجومی معمولی و شکل (۷-ب) شکل موج جریان در حالت جریان هجومی همدردی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۷-ب) مشخص است در زمان ایجاد جریان هجومی همدردی دامنه جریان رفته‌رفته زیاد می‌شود این در حالی است که در زمان رخداد جریان هجومی معمولی دامنه جریان کاهش می‌یابد به طوری که بعد از گذشت چند سیکل جریان هجومی از بین می‌رود.

#### ۴- تست نرم‌افزاری روش پیشنهادی

در این بخش از مقاله حاضر، به بررسی عملکرد روش پیشنهادی در زمان رخداد جریان هجومی در ترانسفورماتور قدرت پرداخته می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده در این بخش انواع حالت‌های ممکن برای جریان هجومی را در نظر می‌گیرد. بدین منظور عملکرد روش پیشنهادی در هنگام وقوع جریان هجومی همدردی، خطای همزمان با جریان هجومی و وجود نویز همراه با جریان هجومی مورد بررسی قرار می‌گیرند.



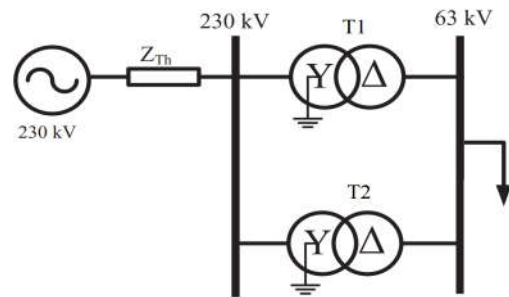
شکل (۷): الف) شکل موج جریان در حالت رخداد جریان هجومی معمولی. ب) شکل موج جریان در حالت رخداد جریان هجومی همدردی.  
Fig. (7): a) Current waveform in normal inrush current b) Current waveform in sympathetic inrush current

#### ۴-۱- عملکرد در زمان رخداد جریان هجومی همدردی

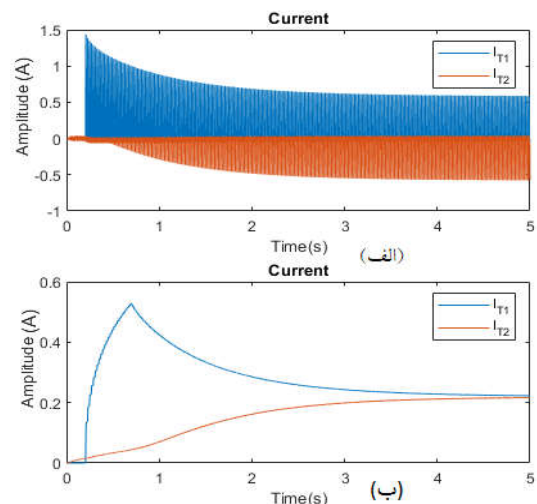
برای بررسی تاثیر جریان هجومی همدردی کلید قدرت ترانسفورماتور T1 در زاویه‌های مختلف ( $\theta$ ) بسته می‌شود. این کار باعث بررسی جامع از نحوه عملکرد روش پیشنهادی در زمان ایجاد جریان‌های هجومی متفاوت می‌شود. شکل (۸) نحوه عملکرد این روش در زمان کلید زنی در زاویه  $\theta = 0$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است، الگوریتم پیشنهادی جریان هجومی همدردی را به درستی در زمان ۸ میلی‌ثانیه تشخیص داده و رله را قفل نموده است. با توجه به این شکل بعد از کلید زنی ترانسفورماتور، الگوریتم شروع به

سیم‌پیچ ترانسفورماتور T1 ایجاد می‌شود. در مرحله بعد جریان هجومی (جریان هجومی همدردی) ترانسفورماتور T2 افزایش می‌یابد. این در حالی است که جریان T1 کاهش می‌یابد (شکل (۶)). بنابراین به دلیل کاهش جریان هجومی معمولی و افزایش جریان هجومی همدردی در طول زمان، پس از گذشت چند سیکل دامنه جریان هجومی همدردی بیشتر از دامنه جریان هجومی معمولی خواهد شد. همچنین برخلاف جریان هجومی معمولی که بعد از گذشت چند سیکل از بین می‌رود، جریان هجومی همدردی برای مدت زمان طولانی در شبکه باقی می‌ماند. با توجه به ویژگی‌های جریان هجومی همدردی، این نوع از جریان هجومی می‌تواند دو مشکل عمده برای حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت ایجاد کند [۱].

۱. سیستم حفاظت از ترانسفورماتور T2 ممکن است به علت افزایش زیاد جریان عملکرد نادرست داشته باشد.  
۲. وقتی یک سیستم حفاظت مشترک برای ترانسفورماتورهای موازی طراحی شود، ممکن است موجب شود که جریان ورودی خط که حاصل جمع برداری دو جریان ورودی است، شبیه خطای تک فاز شود.



شکل (۵): شبکه مورد مطالعه  
Fig. (5): Sample network



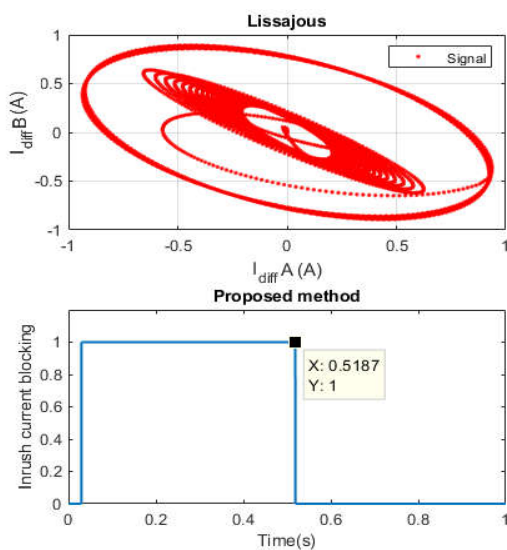
شکل (۶): الف) جریان‌های ترانسفورماتورهای T1 و T2 در زمان وصل ترانسفورماتور T1 ب) مقدار موثر جریان‌های ترانسفورماتورهای T1 و T2 در زمان وصل ترانسفورماتور T1  
Fig. (6): a) Currents of transformers T1 and T2 when they are on b) RMS currents of transformer T1 and T2 when they are on

#### ۴-۲- عملکرد روش پیشنهادی در خطای همزمان با جریان هجومی

به‌منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در برابر خطای همزمان با جریان هجومی، یک خطای سه فاز بر روی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور T2 شکل (۵) اعمال شده است. بر این اساس شکل (۹) عملکرد روش پیشنهادی در برابر یک خطای همزمان با جریان هجومی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۹) بعد از کلید زنی ترانسفورماتور، الگوریتم پیشنهادی شروع به کار کرده و ابتدا  $I_{diffA}$  بر اساس  $I_{diffB}$  را رسم می‌کند در ادامه مطابق رابطه (۹) تعداد نقاط در فاصله  $\Delta t$  محاسبه می‌شود. در این مرحله چون تعداد نقاط موجود در فاصله  $\Delta t$  بیشتر از مقدار آستانه است، شرط رابطه (۱۰) نقض نشده و رله بلاک می‌شود. در ادامه در زمان ۰/۵ ثانیه یک خطای سه فاز بر روی ترانسفورماتور T2 اعمال می‌شود. در این زمان با توجه به شکل (۴) حدود ۱۸ میلی ثانیه طول می‌کشد تا شکل لیسازور از حالت جریان هجومی به حالت خطا وارد شود. در این حالت تعداد نقاط محاسبه شده در فاصله  $\Delta t$  کمتر از مقدار آستانه می‌گردد و شرط بیان شده در رابطه (۱۰) نقض شده و بنابراین رله به درستی از حالت قفل بودن خارج می‌شود.

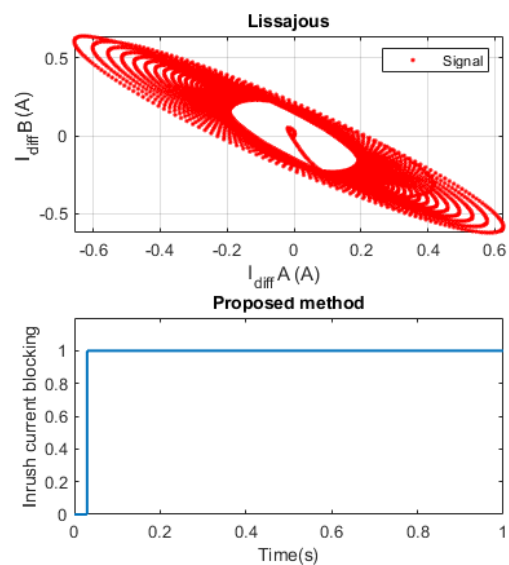
شکل (۱۰) عملکرد روش پیشنهادی به ازای حالت‌های مختلف شبکه و زوایای مختلف کلید زنی ترانسفورماتور T2 در زمان اعمال انواع مختلف خطا بر روی ترانسفورماتور T2 را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، الگوریتم پیشنهادی در حالات مختلف شبکه و در زمان رخداد انواع خطا عملکرد تقریباً یکسانی از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، جدول ارائه شده در پایین شکل (۱۰)، زمان تشخیص خطا توسط الگوریتم پیشنهادی در زمان رخداد انواع مختلف خطا و زوایای مختلف کلید زنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، روش پیشنهادی توانسته است در زمان کوتاه کلیه خطاهای رخ داده را به درستی تشخیص دهد.



شکل (۹): عملکرد روش پیشنهادی در زمان ایجاد خطای همزمان با جریان هجومی با زاویه کلید زنی صفر

Fig. (9): Performance of the proposed method during simultaneous fault and inrush current with zero switching angle.

کار کرده و ابتدا  $I_{diffA}$  بر اساس  $I_{diffB}$  را رسم نموده است. در ادامه بر اساس رابطه (۹) تعداد نقاط در فاصله  $\Delta t$  محاسبه می‌شوند. در این مرحله چون تعداد نقاط موجود در فاصله  $\Delta t$  بیشتر از مقدار آستانه است، لذا شرط رابطه (۱۰) نقض نشده و عملکرد رله قفل می‌شود. به‌منظور ارزیابی حالات مختلف، جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول، عملکرد روش پیشنهادی به ازای حالت‌های مختلف شبکه و زوایای مختلف کلید زنی ترانسفورماتور T2 ارزیابی شده است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، الگوریتم پیشنهادی در حالت‌های مختلف شبکه (شبکه بدون بار و شبکه با بار کامل) عملکرد تقریباً یکسانی از خود نشان می‌دهد. همچنین زاویه کلید زنی تأثیری بر روی عملکرد روش پیشنهادی ندارد که این مسئله یکی از مزایای روش پیشنهادی است.



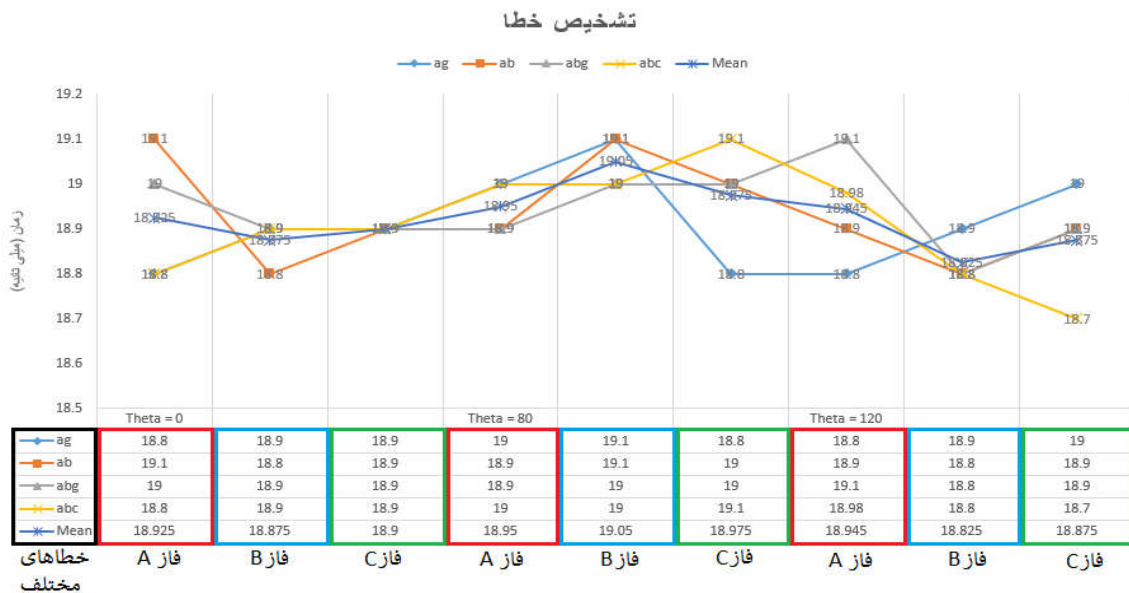
شکل (۸): عملکرد روش بیان شده در زمان جریان هجومی با زاویه کلید زنی صفر

Fig. (8): Performane of the proposed method during inrush current with zero switching angle

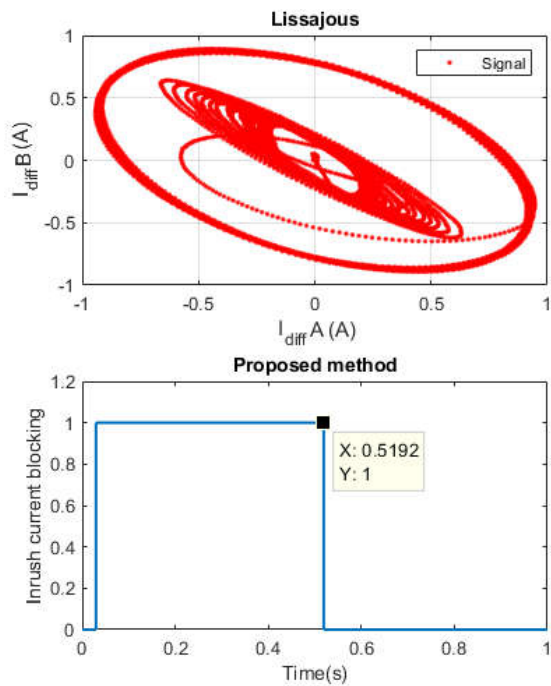
Table (2): Performance of the proposed method for different inrush current

جدول (۲): عملکرد روش پیشنهادی به ازای حالات مختلف جریان هجومی

$\theta$	فاز	زمان قفل کردن رله (ms)	
		شبکه بدون بار	شبکه با بار کامل
۰	A	۸	۸
	B	۷	۸
	C	۷	۸
۸۰	A	۷	۸
	B	۸	۸
	C	۷	۸
۱۲۰	A	۸	۸
	B	۷	۸
	C	۸	۷



شکل (۱۰): منحنی عملکرد روش پیشنهادی در زمان ایجاد انواع خطا  
 Fig. (10): Performance curve of the proposed method during different faults



شکل (۱۱): عملکرد روش بیان شده در زمان نویزی شدن سیگنال  
 Fig. (11): Performance of the proposed method during noisy signal

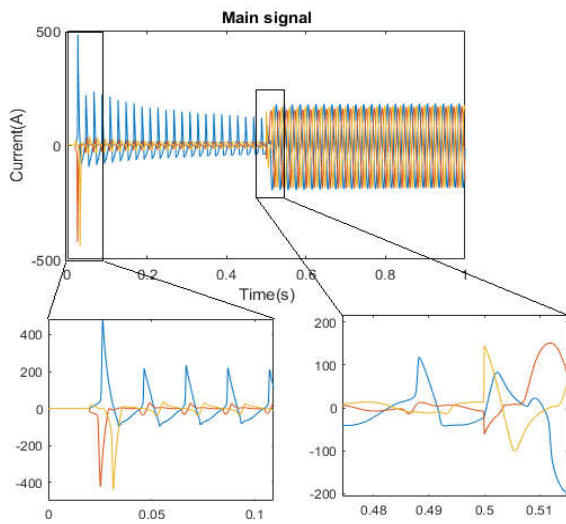
#### ۴-۴- بررسی عملکرد روش پیشنهادی در زمان ایجاد خطا با هارمونیک بالا

وجود هارمونیک دوم بالا در برخی از خطاهای سیستم قدرت می تواند موجب اشتباه روش های معمول تشخیص جریان هجومی شود. به همین دلیل در این قسمت به بررسی تاثیر افزایش هارمونیک دوم خطا بر عملکرد روش پیشنهادی پرداخته می شود. برای این کار یک خطا با هارمونیک بالا در زمان ۵۰۰ میلی ثانیه بر روی سیم پیچ های ترانسفورماتور قدرت قرار داده می شود. شکل (۱۲) عملکرد روش پیشنهادی در زمان رخداد این خطا را نشان می دهد. همان طور که از این شکل مشخص است در حالت عادی شبکه، هارمونیک دوم صفر

#### ۴-۳- تاثیر نویز بر عملکرد روش پیشنهادی

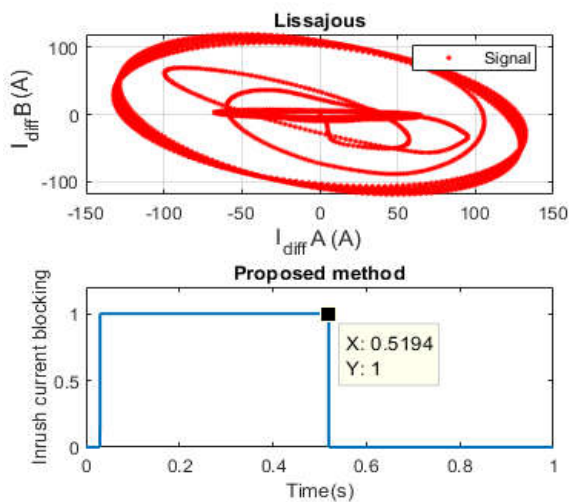
نویز سفید گوسی می تواند اثرات نامطلوبی بر روی سیگنال بگذارد. این اثرات نامطلوب می توانند باعث عملکرد اشتباه الگوریتم های تشخیص جریان هجومی شوند. بدین منظور در این بخش از ارزیابی نرم افزاری روش پیشنهادی، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در برابر خطای سه فاز همزمان با جریان هجومی همراه با نویز گوسی سفید بررسی می گردد. مشخصات در نظر گرفته شده برای نویز گوسی سفید بر اساس مطالعه [۳۳] در نظر گرفته شده است.

شکل (۱۱) عملکرد روش پیشنهادی در برابر نویز گوسی سفید را نشان می دهد (نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی بل<sup>۱۱</sup> در نظر گرفته شده است). همان طور که از این شکل مشخص است، بعد از کلید زنی ترانسفورماتور T2، الگوریتم شروع به کار کرده و ابتدا  $I_{diffA}$  بر اساس  $I_{diffB}$  را رسم می کند. در ادامه بر اساس رابطه (۹) تعداد نقاط در فاصله  $\Delta t$  محاسبه می شود. در این مرحله چون تعداد نقاط موجود در فاصله  $\Delta t$  بیشتر از مقدار آستانه است، شرط رابطه (۱۰) نقض نشده و رله به درستی قفل می شود. در ادامه در زمان ۰/۵ ثانیه یک خطای سه فاز بر روی ترانسفورماتور T2 اعمال می شود. در این حالت تعداد نقاط محاسبه شده در فاصله  $\Delta t$  کمتر از مقدار آستانه شده و شرط بیان شده در رابطه (۱۰) نقض می شود و بنابراین رله از حالت قفل بودن خارج می شود. در تمامی مراحل بیان شده یک نویز گوسی سفید بر اساس مطالعه [۳۳] به سیگنال جریان اضافه شده است. همان طور که از نتایج این بخش مشخص است، نویز شدید (با SNR پایین) نیز تاثیری بر روی عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی نداشته و این روش به خوبی توانسته خطا را تشخیص دهد.



شکل (۱۳): جریان هجومی و خطای اعمال شده به روش ارائه شده در زمان اشباع ترانسفورماتور جریان

Fig. (13): Inrush current and fault applied to the proposed method at current transformer saturation



شکل (۱۴): عملکرد روش پیشنهادی در زمان اشباع ترانسفورماتور جریان

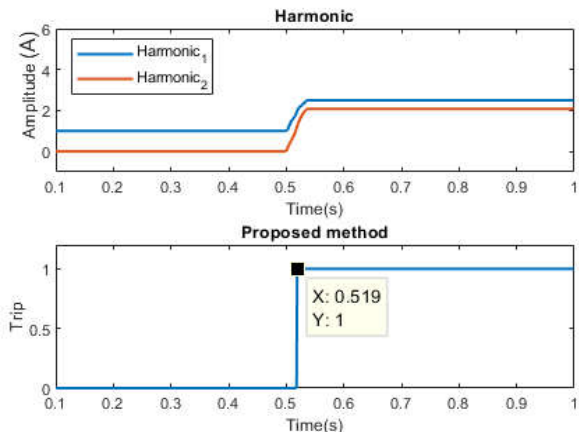
Fig. (14): Performance of the proposed method at the time of current transformer saturation

#### ۴-۶- بررسی عملکرد روش پیشنهادی در ترانسفورماتورها با

##### هسته اصلاح شده

سطح هارمونیک دوم در ترانسفورماتورهای قدیمی در زمان ایجاد جریان هجومی بسیار بیشتر از سطح هارمونیک اصلی بوده است. شکل (۱۵) تغییرات هارمونیک اول و دوم را در زمان ایجاد جریان هجومی نشان می دهد. همان طور که از این شکل مشخص است هارمونیک دوم در شبکه بیشتر از ۱۵ درصد هارمونیک اصلی است پس روش های استفاده کننده از هارمونیک دوم توانایی تشخیص این نوع از جریان هجومی را دارا هستند.

است. اما در زمان رخداد خطا، هارمونیک دوم رفته رفته افزایش یافته تا به نزدیکی هارمونیک اول می رسد. در چنین شرایطی روش های استفاده کننده از هارمونیک دوم خطا را به طور اشتباه جریان هجومی تشخیص داده و از عملکرد رله جلوگیری به عمل می آوردند [۳۴]. اما همان طور که مشخص است، روش ارائه شده در این مقاله وابسته به نوع هارمونیک نبوده و بدون توجه به افزایش هارمونیک دوم خطا را تشخیص داده و فرمان قطع کلید قدرت را صادر می کند.



شکل (۱۲): عملکرد روش پیشنهادی در زمان رخداد خطا با هارمونیک بالا

Fig. (12): Performance of the proposed method in the event of high harmonic fault

#### ۴-۵- بررسی عملکرد روش پیشنهادی در زمان اشباع

##### ترانسفورماتور جریان

اشباع ترانسفورماتور جریان موجب کاهش شدید اندوکتانس مغناطیسی و بالطبع افزایش جریان مغناطیس کنندگی هسته می گردد. از آنجا که جریان ثانویه ترانسفورماتور از تفاضل جریان اولیه و جریان مغناطیس کنندگی به دست می آید، افزایش شدید جریان مغناطیس کنندگی موجب نقصان و کاهش جریان ثانویه در بخش هایی از شکل موج که اشباع رخ داده است، می شود. این امر موجب اندازه گیری غیر دقیق جریان سیستم می گردد که می تواند موجب عملکرد ناصحیح روش های تشخیص جریان هجومی شود [۳۴].

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به تشخیص درست جریان هجومی به هنگام اشباع ترانسفورماتور جریان، موج حامل جریان هجومی و خطای همزمان رخ داده با آن در زمان وقوع اشباع ترانسفورماتور جریان، مطابق شکل (۱۳) به روش پیشنهادی اعمال می گردد. شکل (۱۴) عملکرد روش پیشنهادی را نشان می دهد. همان طور که از این شکل مشخص است، باوجود به اشباع رفتن ترانسفورماتور جریان در زمان ایجاد جریان هجومی، روش ارائه شده به دلیل اینکه شرط بیان شده در رابطه (۱۰) برهم نمی خورد جریان هجومی را تشخیص داده و رله را قفل کرده است. همچنین بعد از اعمال خطا در زمان ۵۰۰ میلی ثانیه شرط بیان شده در رابطه (۱۰) برهم خورده و روش ارائه شده خطا را تشخیص داده و فرمان قطع کلید قدرت را صادر می کند.



Table (3): Performance of the proposed method for different residual fluxes in the core

جدول (۳): عملکرد روش پیشنهادی به ازای شارهای باقیمانده مختلف در هسته

ردیف	شار باقی مانده در هسته (%)	عملکرد
۱	۰	درست
۲	۶۰	درست
۳	۸۰	درست

به منظور بررسی این حالت، ترانسفورماتور قدرت با شارهای مختلف پسماند کلیدزنی می شوند. جدول (۳)، عملکرد روش پیشنهادی به ازای شارهای مختلف باقی مانده در هسته را نشان می دهد. همان طور که از این جدول مشخص است درصد شار باقی مانده در هسته تاثیری بر روی عملکرد روش بیان شده نداشته و این روش به خوبی انواع جریان هجومی را تشخیص داده است.

#### ۴-۸- تاثیر امپدانس خطا بر عملکرد روش پیشنهادی

تغییرات امپدانس خطا نباید بر روی الگوریتم تشخیص دهنده جریان هجومی و خطا تاثیری داشته باشد. به همین دلیل در این قسمت به بررسی تاثیر امپدانس خطا بر روی عملکرد روش پیشنهادی پرداخته می شود. جدول (۴) عملکرد این روش در برابر انواع امپدانس خطا را نشان می دهد. همان طور که از این جدول مشخص است، افزایش امپدانس خطا تاثیری بر عملکرد روش جدید پیشنهادی نداشته و این روش در شرایط مختلف، عملکرد یکسانی از خود نشان می دهد.

Table (4): Performance of the proposed method for different values of efault impedance

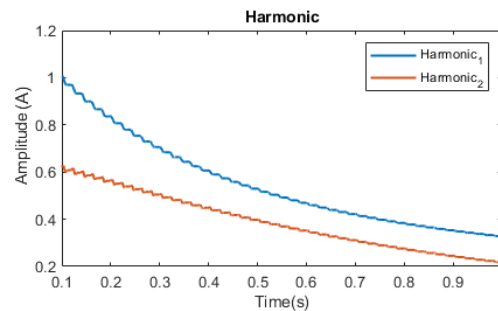
جدول (۴): عملکرد روش پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف امپدانس خطا

ردیف	امپدانس خطا (اهم)	عملکرد
۱	۰	درست
۲	۵۰	درست
۳	۱۰۰	درست
۴	۱۵۰	درست
۵	۲۰۰	درست

#### ۵- مقایسه روش پیشنهادی با روش های متداول صنعتی

##### مورد استفاده در رله های حفاظتی

روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان توسط رله های نسل پنجم زیمنس مانند رله 7UT82 برای رفع مشکلات روش هارمونیک دوم مورد استفاده قرار می گیرد [۳۰]. مهم ترین مشکل ایجاد شده توسط این روش آن است که در زمان رخداد جریان هجومی همدردی که در بخش (۴-۱) بیان شد به علت اینکه جریان هجومی ایجاد شده در طول زمان افزایش می یابد (شکل (۷-ب))، لذا روش مورد استفاده در این رله قادر به تشخیص جریان هجومی نبوده و موجب اشتباه در عملکرد رله دیفرانسیل می شود. شکل (۱۷) عملکرد روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان را در زمان رخداد جریان هجومی همدردی نشان می دهد (روشی که در رله های شرکت های مختلف از جمله



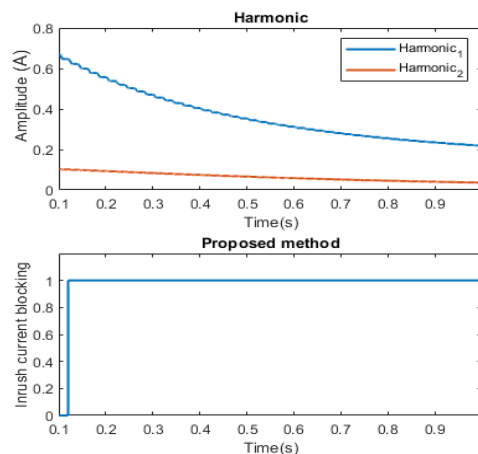
شکل (۱۵): تغییرات هارمونیک اصلی و هارمونیک دوم در ترانسفورماتورهای قدرت معمولی

Fig. (15): Main and second harmonic changes in conventional power transformers

در ترانسفورماتورهای نسل جدید به دلیل ایجاد تغییرات در هسته ترانسفورماتور، میزان هارمونیک دوم ایجاد شده توسط این نوع از ترانسفورماتورها بسیار کاهش پیدا کرده و کمتر از ۱۵ درصد هارمونیک اصلی می شود. شکل (۱۶) تغییرات هارمونیک اصلی و هارمونیک دوم را در زمان جریان هجومی در ترانسفورماتورهای جدید نشان می دهد. همان طور که مشخص است به دلیل کاهش سطح هارمونیک دوم روش های استفاده کننده از هارمونیک دوم قادر به تشخیص جریان هجومی نبوده و به اشتباه جریان هجومی را خطا تشخیص می دهند. این شکل به روش پیشنهادی به منظور ارزیابی رفتار آن، اعمال شده است. همان طور که از سیگنال خروجی ثبت شده از روش پیشنهادی مشخص است، این روش موفق شده به خوبی جریان هجومی را تشخیص داده و رله را بلاک نماید.

#### ۴-۷- تاثیر شار باقیمانده در هسته بر عملکرد روش پیشنهادی

برای بررسی دقیق عملکرد الگوریتم تشخیص جریان هجومی لازم است تا تمامی مواردی که در شرایط واقعی امکان وقوع آن ها وجود دارد شبیه سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. یکی از این موارد اندازه شار پسماند در هسته ترانسفورماتور است [۳۵].



شکل (۱۶): عملکرد روش پیشنهادی در زمان استفاده از ترانسفورماتورهای نسل جدید

Fig. (16): Performance of the proposed method when using new generation transformers

## ۶- نتیجه‌گیری

رله‌های دیفرانسیل به‌طور گسترده به‌عنوان حفاظت اصلی ترانسفورماتورهای قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. رله‌های دیفرانسیل در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور و ایجاد جریان هجومی دچار اشتباه شده و فرمان قطع کلید قدرت را صادر می‌کنند. برای جلوگیری از این مشکل، در این مقاله راه‌حلی جدید برای تمایز گذاشتن بین جریان هجومی و خطا بر پایه شکل لیسازور جریان ارائه شده است. روش ارائه‌شده با استفاده از یک شبکه با ترانسفورماتور موازی ۲۳۰ به ۶۳ کیلوولت و ترانسفورماتورهای Ynd11 در شرایط مختلف جریان هجومی همدردی، خطا و نویز تست شده است. در ادامه روش پیشنهادی با روش‌های تجزیه و تحلیل شکل موج جریان مورد استفاده در رله‌های نسل پنجم زمینس مقایسه شده است. نتایج به‌خوبی نشان می‌دهد که به علت ایجاد شکل خاص در سیگنال جریان در هنگام بروز جریان هجومی همدردی روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان قابلیت تشخیص این نوع از جریان هجومی را ندارد و موجب اشتباه در عملکرد رله دیستانس می‌شود. این در صورتی است که روش پیشنهادی در این مقاله به‌خوبی قادر است این نوع از جریان هجومی را نیز تشخیص دهد و از عملکرد رله دیفرانسیل جلوگیری به عمل آورد.

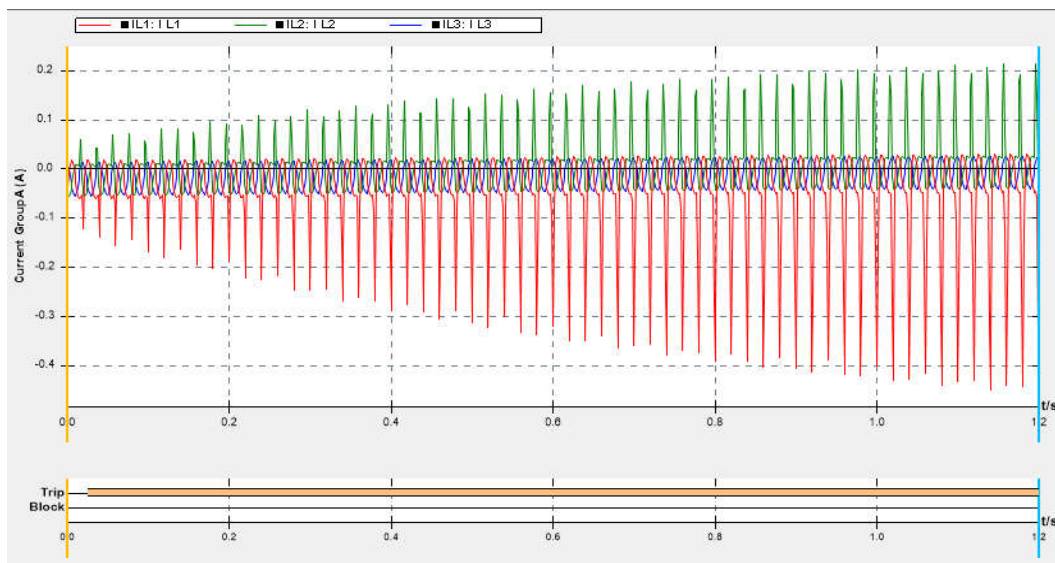
## پی‌نوشت:

1. Inrush current
2. Current transformer (CT)
3. Artificial neural network (ANN)
4. Fuzzy logic
5. Support vector machine (SVM)
6. Probabilistic neural network (PNN)
7. Lissajous
8. Current wave shape analysis (CWA)
9. Sympathetic
10. Circuit breaker (CB)
11. Signal-to-noise ratio (SNR)
12. Decibel (dB)

زمینس استفاده می‌شود). همان‌طور که از این شکل مشخص است، روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان، در تشخیص جریان هجومی دچار اشتباه شده و رله دیفرانسیل را قفل نکرده است. بنابراین رله دیفرانسیل فرمان قطع کلید قدرت را صادر کرده است. این در صورتی است که مطابق ارزیابی‌های نرم‌افزاری انجام‌شده در بخش (۴-۱)، الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله به‌خوبی قادر به تشخیص جریان هجومی همدردی است.

علاوه بر مقایسه انجام شده میان روش پیشنهادی و روش استفاده شده در رله 7UT82 شرکت زمینس به لحاظ عملکرد در زمان وقوع جریان هجومی همدردی، جدول (۵) به مقایسه روش پیشنهادی در این مقاله و سایر روش‌های معمول استفاده‌شده در رله‌های حفاظتی مانند روش هارمونیک دوم و روش عبور از صفر جریان می‌پردازد. همان‌طور که از این جدول مشخص است، در این مقایسه کلیه شرایط مختلف ایجادشده همراه با جریان هجومی مدنظر قرار گرفته است. بنابراین روش پیشنهادی در این مقاله به لحاظ سایر شرایط نیز با روش استفاده‌شده در رله زمینس مقایسه شده است.

همان‌طور که از جدول (۵) مشخص است، روش‌هایی که از هارمونیک دوم برای تشخیص جریان هجومی استفاده می‌کنند، قادر به تشخیص خطا با هارمونیک دوم بالا نیستند. همچنین این روش در ترانسفورماتورهای جدید که هارمونیک دوم کمتری تولید می‌کنند، قابل استفاده نیست. به‌طور مشابه روش عبور از صفر جریان که توسط برخی تولیدکنندگان رله برای رفع ایرادات روش هارمونیک دوم ارائه شده است، در زمان اشباع ترانسفورماتور جریان، عملکرد درستی از خود نشان نمی‌دهد. روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان که برای رفع مشکلات بیان‌شده روش هارمونیک دوم ارائه‌شده است نیز قابلیت تشخیص جریان هجومی همدردی را ندارد (که در ابتدای همین بخش از مقاله حاضر نیز بررسی شد). این در صورتی است که روش پیشنهادی در این مقاله در تمامی شرایط ارائه‌شده در جدول (۵) عملکرد مناسبی داشته است.



شکل (۱۷): عملکرد روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان در زمان رخداد جریان هجومی همدردی  
Fig. (17): The performance of the CWA method during sympathetic inrush current

Table (5): Comparison of the proposed method with the conventional industrial methods

جدول (۵): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های متداول صنعتی

عملکرد در زمان ایجاد جریان هجومی همدردی	عملکرد درست در ترانسفورماتورهای جدید با هسته اصلاح شده	تشخیص در زمان اشباع ترانسفورماتور جریان	تشخیص خطا با هارمونیک دوم بالا	تشخیص خطای سه فاز	تشخیص جریان هجومی	روش
بله	خیر	بله	خیر	بله	بله	هارمونیک دوم
خیر	بله	خیر	بله	بله	بله	عبور از صفر جریان
خیر	بله	بله	بله	بله	بله	روش تجزیه و تحلیل شکل موج جریان
بله	بله	بله	بله	بله	بله	روش پیشنهادی

### References

- [1] M. H. Sadeghi, Y. Damchi, H. Shirani, "Improvement of operation of power transformer protection system during sympathetic inrush current phenomena using fault current limiter", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 12, No. 22, pp. 5968-5974, Nov. 2018 (doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5697).
- [2] G. Ziegler, Numerical differential protection: principles and applications, John Wiley & Sons, 2012.
- [3] H. C. Seo, C. H. Kim, S. B. Rhee, J. C. Kim, O. B. Hyun, "Superconducting fault current limiter application for reduction of the transformer inrush current: A decision scheme of the optimal insertion resistance", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 4, pp. 2255-2264, Aug. 2010 (doi: 10.1109/TASC.2010.2048214).
- [4] H. Shimizu, K. Mutsuura, Y. Yokomizu, T. Matsumura, "Inrush-current-limiting with high T/sub c/ Superconductor", IEEE Trans. on applied superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 2071-2073, June 2005 (doi: 10.1109/TASC.2005.849454).
- [5] A. Adly, "Computation of inrush current forces on transformer windings", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 2855-2857, July 2001 (doi: 10.1109/20.951327).
- [6] S. Hong-ming, Z. Tao, H. Shao-feng, L. Ou, "Study on a Mal-operation case of differential protection due to the interaction between magnetizing inrush and sympathetic inrush", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 1-5, National Harbor, MD, USA, July 2014 (doi: 10.1109/PESGM.2014.6939046).
- [7] J. Sykes, I. Morrison, "A proposed method of harmonic restraint differential protecting of transformers by digital computer", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, No. 3, pp. 1266-1272, May 1972 (doi: 10.1109/TPAS.1972.293485).
- [8] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, H. J. Altuve, "A current-based solution for transformer differential protection. II. Relay description and evaluation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, pp. 886-893, Oct. 2002 (doi: 10.1109/TPWRD.2002.803736).
- [9] A. Guzman, Z. Zocholl, G. Benmouyal, and H. J. Altuve, "A current-based solution for transformer differential protection. I. Problem statement", IEEE Trans. on power delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 485-491, Oct 2001. (doi: 10.1109/61.956726).
- [10] K. Tian and P. Liu, "Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults based on negative sequence power", Proceedings of the IEEE/EMPD, Vol. 2, pp. 422-425, Singapore, March 1998 (doi: 10.1109/EMPD.1998.702605).
- [11] R. S. Girgis, "Characteristics of inrush current of present designs of power transformers", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 1-6, Tampa, FL, USA, June 2007 (doi: 10.1109/PES.2007.386291).
- [12] Technical reference manual of RET 521 / 2.3 (Transformer protection terminal). ABB relay catalogue-1MRK 504 016-UEN. <www.abb.com>.
- [13] Technical manual of P631, P632, P633, P634 (Transformer differential protection). AREVA relay catalogue-P63x/UK M/A54.
- [14] H. Dashti, M. Davarpanah, M. Sanaye-Pasand, and H. Lesani, "Discriminating transformer large inrush currents from fault currents", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 75, pp. 74-82, Feb. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.08.025).
- [15] D. Bi, S. Li, X. Wang, W. Wang, "A novel double-side average equivalent instantaneous inductance in nonsaturation zone based transformer protection", Proceeding of the IEEE/ICEMS, Wuhan, pp. 4364-4369, China, Oct 2008.
- [16] H. Abniki, H. Monsef, P. Khajavi, H. Dashti, "A novel inductance-based technique for discrimination of internal faults from magnetizing inrush currents in power transformers", Proceeding of the IEEE/MEPS, pp. 1-6, Wroclaw, Poland, Sept 2010.
- [17] M. Tripathy, "Power transformer differential protection using neural network principal component analysis and

- radial basis function neural network", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 18, No. 5, pp. 600-611, May 2010 (doi: 10.1016/j.simpat.2010.01.003).
- [18] G. Baoming, A. T. de Almeida, Z. Qionglin, W. Xiangheng, "An equivalent instantaneous inductance-based technique for discrimination between inrush current and internal faults in power transformers", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 20, No. 4, pp. 2473-2482, Oct 2005 (doi: 10.1109/TPWRD.2005.855443).
- [19] D. Patel, N. Chothoni, and K. Mistry, "Discrimination of inrush, internal, and external fault in power transformer using phasor angle comparison and biased differential principle", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 46, No. 7, pp. 788-801, Oct 2018 (doi: 10.1080/15325008.2018.1509915).
- [20] B. Taheri, A. Bazhdar, S. Salehimehr, M. Faghilou, and F. Razavi, "A new inrush current detection method for transformer differential protection using instantaneous frequency", *Proceeding of the International Conference on Engineering and Technology*, 2019.
- [21] J. Pihler, B. Grear, D. Dolinar, "Improved operation of power transformer protection using artificial neural network", *IEEE Trans. on power delivery*, Vol. 12, No. 3, pp. 1128-1136, Jul 1997 (doi: 10.1109/61.636919).
- [22] A. Wiszniewski and B. Kasztenny, "A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzy logic", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, No. 4, pp. 1786-1792, Oct 1995 (doi: 10.1109/61.473379).
- [23] D. Bejmert, W. Rebizant, and L. Schiel, "Transformer differential protection with fuzzy logic based inrush stabilization", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 63, pp. 51-63, December 2014 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.05.056).
- [24] I. S. Rad, M. Alinezhad, S. E. Naghibi, and M. A. Kamarposhti, "Detection of internal fault in differential transformer protection based on fuzzy method", *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 6, No. 26, pp. 6150-6158, Oct 2011 (doi: 10.5897/IJPS11.478).
- [25] M.-C. Shin, C.-W. Park, and J.-H. Kim, "Fuzzy logic-based relaying for large power transformer protection", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, pp. 718-724, July 2003 (doi: 10.1109/TPWRD.2003.813598).
- [26] F. Zhalefar and M. Sanaye-Pasand, "A new fuzzy-logic-based extended blocking scheme for differential protection of power transformers", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 38, No. 6, pp. 675-694, Apr 2010 (doi: 10.1080/15325000903489678).
- [27] D. Barbosa, U. C. Netto, D. V. Coury, M. Oleskovicz, "Power transformer differential protection based on Clarke's transform and fuzzy systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 26, No. 2, pp. 1212-1220, January 2011 (doi: 10.1109/TPWRD.2010.2097281).
- [28] P. R. Gondane, R. M. Sheikh, K. A. Chawre, V. V. Wasnik, A. Badar, and M. Hasan, "Inrush current detection using wavelet transform and artificial neural network", *Proceeding of the IEEE/ICCMC, Erode*, pp. 866-868, India, Feb 2018 (doi: 10.1109/ICCMC.2018.8487832).
- [29] M. Geethanjali, S. M. R. Slochanal, R. Bhavani, "PSO trained ANN-based differential protection scheme for power transformers", *Neurocomputing*, Vol. 71, No. 4-6, pp. 904-918, January 2008 (doi: 10.1016/j.neucom.2007.02.014).
- [30] Siemens, "SIPROTEC 5 transformer differential protection", 7UT82, 7UT85, 7UT86, 7UT87, V7.30 and higher.
- [31] B. Patel, P. Bera, "Detection of power swing and fault during power swing using Lissajous figure", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 33, No. 6, pp. 3019-3027, Dec. 2018 (doi: 10.1109/TPWRD.2018.2850958).
- [32] Q.-Q. Xu, J. Suonan, Y.-Z. Ge, "Real-time measurement of mean frequency in two-machine system during power swings", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 1018-1023, July 2004 (doi: 10.1109/TPWRD.2003.823208).
- [33] B Taheri, SA Hosseini, F Razavi, "Detection of power oscillation and simultaneous faults using Clark transform", *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Vol. 8, No. 1, pp. 82-92, 2019.
- [34] B. Taheri, S. A. Hosseini, S. Salehimehr, "An energy variation-based method for discrimination between the internal fault and inrush current in power transformers", *14<sup>th</sup> International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS)*, Jan. 2020.
- [35] A Jalilvand, B Faraedi, "Discrimination between internal fault and inrush currents in transformers by using chaotic method", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp. 53-61, 2017.