Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 57-69

Vol. 11/ No. 1/ Spring 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

A novel strategy based on group method of data handling neural network for detection of inrush current and preventing the mal-operation of the differential relay

Seyed Amir Hosseini [1], Assistant professor, Behrooz Taheri[2]
1- Electrical and Computer Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran, Email: s.hosseini@iut.ac.ir (Corresponding author)
2- Faculty of Electrical, Biomedical, and Mechatronics Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
Email: behrooztaheri1372@gmail.com

Abstract:
Low impedance differential relays are widely used in the protection systems of power transformers. While being highly reliable, differential relays can misidentify the inrush currents generated during the switching of power transformers as faults and issue a tripping command when one is not needed. Therefore, these protection systems need a mechanism to differentiate between inrush currents and faults in order to prevent unnecessary activation. Accordingly, this paper presents a new method based on a group method of data handling (GMDH) neural network for differentiating faults from inrush currents. The proposed method can quickly detect a wide variety of faults that may occur simultaneously with inrush currents and is perfectly noise-resistant. The proposed method is compared with the conventional methods used in the industry, namely second harmonic and zero-crossing methods. The results demonstrate the ability of the proposed method to outperform conventional methods under a wide variety of operating conditions.

Keywords: Inrush current, Differential relay, Power system protection, Group method of data handling (GMDH).

Submit date: 2021/10/16
Accepted date: 2021/12/13

Corresponding author Name: Seyed Amir Hosseini
Corresponding author address: Electrical and Computer Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, 87717-67498, Iran.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۶۹- ۵۷

Vol. 11 / No. 1/ Spring 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

ارائه یک استراتژی جدید مبتنی بر شبکه عصبی GMDH برای تشخیص جریان هجومی و جلوگیری از عملکرد نادرست رله دیفرانسیل در ترانسفورماتورهای قدرت

نوع مطالعه: پژوهشی

سید امیر حسینی[۱]، استادیار، بهروز طاهری[۲]

۱- گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران
s.hosseini@iut.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک- دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین- قزوین- ایران
behrooztaheri1372@gmail.com

چکیده: از رله‌های دیفرانسیل امپدانس پایین به‌طور گسترده برای حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت استفاده می‌شود. رله‌های دیفرانسیل با وجود قابلیت اطمینان بسیار بالا ممکن است در هنگام کلیدزنی ترانسفورماتور قدرت و ایجاد جریان هجومی دچار اشتباه شده و جریان هجومی ایجاد شده را به عنوان خطا تشخیص داده و فرمان قطع کلید قدرت را صادر نمایند. به همین دلیل نیاز به توسعه روش‌هایی است تا در رله دیفرانسیل بین جریان هجومی و خطای دائم تمایز گذاشته و از عملکرد بی‌مورد رله دیفرانسیل جلوگیری کنند. براین‌اساس در این مقاله روشی جدید بر پایه شبکه عصبی GMDH برای تمایز گذاشتن بین جریان هجومی و خطای دائم پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی قابلیت تشخیص سریع انواع خطای همزمان با جریان هجومی را دارا می‌باشد. همچنین این روش نسبت به نویز ایمن بوده و نویزی شدن سیگنال تاثیری بر عملکرد آن ندارد. روش پیشنهاد شده با روش‌های متداول مورد استفاده در صنعت (روش هارمونیک دوم و روش عبور از صفر سیگنال) مقایسه شده و نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی در این مقاله عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های معمول صنعتی دارد.

واژه‌های کلیدی: جریان هجومی، رله دیفرانسیل، شبکه‌های عصبی مصنوعی، حفاظت سیستم‌های قدرت، GMDH.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول : سید امیر حسینی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

۱- مقدمه

۱-۱- انگیزه

جریان هجومی[۱] یک مشکل معمول در سیستم‌های قدرت است که در زمان برق‌دار کردن یا بی‌برق کردن یک ترانسفورماتور قدرت رخ می‌دهد. زمانی که یک ترانسفورماتور قدرت برق‌دار می‌شود، می‌تواند جریانی معادل ۱۰ تا ۱۵ برابر جریان نامی از شبکه بکشد. بدترین نوع جریان هجومی هنگامی رخ می‌دهد که ترانسفورماتور قدرت در زمان گذر از صفر ولتاژ تحریک برق‌دار شود. دلیل این امر آن است که در این حالت شار دو برابر برای راه‌اندازی نیاز است و این مسئله باعث می‌شود که جریان لازم برای اشباع هسته به‌شدت بالا رود (Taheri & Sedighizadeh, 2021; Ziegler, 2012). مشکلات جریان هجومی می‌تواند با کنترل جداگانه کلیدزنی کلیدهای قدرت و با اطمینان از اینکه هر فاز ولتاژ در لحظه بیشینه برق‌دار می‌شود تا حدود زیادی کاهش داده شود. اما با این وجود این مسئله می‌تواند به علت وجود شار پسماند زمانی که ترانسفورماتور می‌خواهد دوباره به شبکه وصل شود اتفاق بیافتد. به همین دلیل نیاز به روش‌هایی برای تشخیص جریان هجومی و جلوگیری از عملکرد بی‌مورد رله دیفرانسیل در طول برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت وجود دارد (Taheri et al).

۱-۲- بررسی تحقیقات گذشته

مسئله مهم در طرح‌های حفاظتی ترانسفورماتور قدرت تشخیص جریان هجومی از خطای داخلی است. روش‌های اولیه متکی بر غیر فعال‌سازی موقت یا تاخیر موقت عمدی رله بوده‌اند تا بدین گونه دوره‌ی جریان هجومی طی شود. اما تبعات چنین راهکاری تاخیر در حذف خطای داخلی احتمالی نیز بوده است (Taheri & Sedighizadeh, 2021). مرجع (Guzman et al., 2002) روشی بر اساس استفاده از نسبت هارمونیک دوم به هارمونیک اصلی پیشنهاد کرده است. این روش امروزه به‌طور گسترده در اکثر رله‌های حفاظتی موجود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملکرد این روش به این صورت است که زمانی که مقدار هارمونیک دوم از یک مقدار مشخص نسبت به مقدار مولفه اصلی (حدود ۱۵ درصد) بیشتر شود، رله بلاک شده و اگر این مقدار کمتر از مقدار تنظیمی شود، رله خطای رخ داده را تشخیص می‌دهد. با این وجود، روش هارمونیک دوم ممکن است در زمان رخ دادن خطاهایی با هارمونیک دوم بالا دچار اشتباه شود (Mao & Aggarwal, 2001). همچنین ترانسفورماتورهای جدید مقدار هارمونیک دوم به‌مراتب کمتری در زمان کلیدزنی ایجاد می‌کنند که این مسئله عملکرد این روش را با چالش همراه می‌کند (Hunt et al., 2008; Kolla, 1989). در مراجع (Bouderbala et al., 2011; Raju, 2012) 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[۲] به دلیل وجود یک مولفه DC بزرگ در جریان هجومی دچار اشتباه می‌شود. روش ارائه شده در (Pihler et al., 1997) از شبکه عصبی مصنوعی[۳] برای تشخیص جریان هجومی استفاده کرده است.

مراجع (Bejmert et al., 2014; Wiszniewski & Kasztenny, 1995) شیوه‌ای براساس منطق فازی[۴] ارائه داده‌اند. همچنین روش مرکب از ماشین بردار پشتیبان[۵]، به‌عنوان طبقه‌بندی کننده و تبدیل موجک به‌عنوان استخراج ویژگی نیز در (Rad et al., 2011) 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[۶] برای تشخیص خطاهای داخلی پیشنهاد شده‌اند (Barbosa et al., 2011; Gondane et al., 2018; Shin et al., 2003; Zhalefar & Sanaye-Pasand, 2010). در (Geethanjali et al., 2008)، شبکه عصبی مصنوعی آموزش یافته با الگوریتم PSO هسته اصلی رله‌ی دیفرانسیل هوشمند پیشنهادی را تشکیل داده‌اند. روش‌های هوشمند نیاز به ایجاد شبیه‌سازی‌های آفلاین زیادی برای آموزش نرخ‌های متفاوت خطا و جریان هجومی دارند. مرجع (Sanaye-Pasand et al., 2003) روشی براساس مقایسه شکل و تخمین خطا برای تمایز بین خطای داخلی و جریان هجومی ارائه داده است. در مراجع (Abniki et al., 2010; Baoming et al., 2005; Bi et al., 2008; Tripathy, 2010) از روش‌های استخراج ویژگی‌ها بر پایه تبدیل موجک جهت تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی استفاده شده است. یک طرح جدید برای حفاظت از ترانسفورماتور بر اساس زاویه متوسط مشتق دوم جریان دیفرانسیل برای تشخیص جریان هجومی در مرجع (Patel et al., 2018) ارائه شده است. در این طرح تبعیض بین خطا و جریان هجومی براساس درصد اختلاف تعادلی همراه با مقایسه زاویه فاز بین جریان اولیه و ثانویه انجام شده است.

مرجع (Bainy & Silva, 2020) از generalized alpha plane (GAP) در حفاظت دیفرانسیل استفاده کرده است. این روش به‌جای ویژگی‌های معمول یک رله دیفرانسیل از یک مشخصه عملیاتی ساده استفاده می‌کند. علاوه بر این، تنظیمات مورد نیاز به نوع دستگاه مورد حفاظت (باسبار، خطوط انتقال و ترانسفورماتورهای قدرت) بستگی ندارد. با کمک اصل انتگرال، مرجع (Bejmert et al., 2020) روشی را برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ارائه می‌دهد. مرجع (Weng et al., 2019) از فاصله hausdoff در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت استفاده می‌کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

جدول (۱): مقایسه مطالعات در حوزه تشخیص خطای داخلی و جریان هجومی ترانسفورماتورهای قدرت

مراجع	روش	نوع ترانسفورماتور	نرخ نمونه‌برداری	زمان تشخیص خطا	نویزی شدن سیگنال	اشباع CT	خطای داخلی با هارمونیک دوم بالا	نیاز به تعیین مقدار آستانه
(Bainy & Silva, 2020)	Generalized alpha plan	230:69 kV-Ynd11	-	-	×	✓	✓	✓
(Bejmert et al., 2020)	Integral approach	226.7:16.5 kV-Yd11	-	20 ms	×	✓	✓	✓
(Weng et al., 2019)	Waveform sinusoidal similarity identification	110:35 kV-Ynd	4 kHz	50 ms	✓	✓	✓	×
(Rad et al., 2011)	Normalized grille curve	1 kV:380 V-Ynd11	1 kHz	23 ms	×	✓	×	✓
(He et al., 2006)	Error estimation	Ynd11	1 kHz	20 ms	×	×	×	✓
(Abniki et al., 2010)	Inductance-based technique	400:230 kV-Yd11	-	-	×	✓	×	✓
(Behvandi et al., 2020)	Clark's transform	230:36 kV-Ynd11	2.5 kHz	12 ms	×	✓	✓	×
(Velásquez & Lara, 2020)	Artificial neural network	60:10 kV	-	-	×	×	×	✓
(Medeiros et al., 2015)	Wavelet transform	Different transformers	15.36 kHz	-	✓	✓	✓	✓
(Oliveira & Bretas, 2009)	Wavelet transform	13.8:138 kV-Ynd11	16 kHz	5 ms	×	×	×	✓
Ozgonenel & Karagol,) (2014	Wavelet transform	400:220 kV	4 kHz	8.3 ms	×	✓	✓	✓
(Tripathy et al., 2009)	Probabilistic neural network	400:220 kV	1 kHz	13 ms	×	✓	×	×
روش ارائه‌شده	GMDH	230:63 kV-Ynd11	10 kHz	8-9 ms	✓	✓	✓	✓

مرجع (Behvandi et al., 2020) از ترکیب تبدیل کلارک و تبدیل S برای شناسایی خطاهای داخلی ترانسفورماتور قدرت و تمایز گذاشتن بین این خطاها و جریان هجومی استفاده می‌کند. مرجع (Velásquez & Lara, 2020) از یک شبکه عصبی مصنوعی تنظیم شده توسط یک الگوریتم ژنتیک برای تشخیص انواع خطا در یک ترانسفورماتور قدرت استفاده می‌کند. مراجع (Medeiros et al., 2015; Oliveira & Bretas, 2009; Ozgonenel & Karagol, 2014) از تبدیل موجک در رله دیفرانسیل استفاده کرده‌اند. در مرجع (Tripathy et al., 2009) استفاده از شبکه عصبی احتمالی بهینه برای تمایز بین جریان هجومی و خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد شده است.

تحقیقات انجام‌شده در زمینه تشخیص جریان هجومی و تمایز بین جریان هجومی و خطای داخلی را می‌توان از نقطه نظرهای مختلفی از قبیل روش تشخیص، زمان تشخیص خطا، میزان نمونه‌برداری و غیره دسته‌بندی کرد. جدول (۱) برخی از مطالعات اخیر در مورد تشخیص جریان هجومی را با روش پیشنهاد شده در مقاله حاضر مقایسه نموده است. این جدول همچنین نوآوری‌های روش پیشنهادی در این مقاله را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می‌دهد. با توجه به بررسی انجام شده و همچنین اطلاعات موجود در جدول (۱) می‌توان مشکلات موجود در تشخیص جریان هجومی را به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱. عملکرد نامناسب در زمان رخداد خطا با هارمونیک دوم بالا.
۲. مناسب نبودن برای حفاظت از نسل جدید ترانسفورماتورها به دلیل پایین بودن هارمونیک دوم در این ترانسفورماتورها.
۳. بالا بودن زمان تشخیص خطای همزمان با جریان هجومی.
۴. عملکرد نامناسب در زمان رخداد اشباع CT.
۵. داشتن عملکرد نامناسب در زمان نویزی شدن سیگنال.

۱-۳- مشارکت‌ها و پیشرفت‌ها

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بخش قبل می‌توان دریافت که اکثر روش‌های موجود تشخیص جریان هجومی دارای مشکلاتی هستند که استفاده از آن‌ها را بسیار محدود خواهد کرد. بنابراین در این مقاله یک روش جدید به‌منظور تشخیص جریان هجومی بر اساس پیش‌بینی سیگنال با استفاده از شبکه عصبی Group Method of Data Handling (GMDH) پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی دارای دقت و سرعت تشخیص مناسبی است. همچنین این روش توانایی عملکرد در زمان به اشباع رفتن CT و یا نویزی شدن سیگنال را نیز دارا می‌باشد. روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزارهای DIgSILNET و Matlab بر روی یک ترانسفورماتور ۶۳/۲۳۰ کیلوولت تست شده است. نتایج نشان می‌دهند که در مقایسه با روش‌های متداول صنعتی، روش پیشنهادی در مقاله حاضر عملکرد بسیار مناسب‌تری در زمان رخداد خطا با هارمونیک دوم بالا، تشخیص خطا تحت اشباع CT و نویزی شدن سیگنال دارد. با توجه به نکات بیان‌شده پیشرفت‌های این مقاله را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی نمود:

۱. ارائه یک الگوریتم دقیق و سریع بر پایه شبکه عصبی GMDH برای تمایز گذاشتن بین جریان هجومی و خطاهای داخلی در ترانسفورماتور قدرت.
۲. عملکرد مناسب در زمان نویزی شدن سیگنال و خطا با هارمونیک دوم بالا.
۳. عملکرد دقیق در زمان رخداد اشباع CT.

ساختار این مقاله بدین شکل است. در بخش دوم روش جدید پیشنهادی ارائه شده است. در بخش سوم روش پیشنهادی به ازای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

حالت‌های مختلف جریان هجومی و خطاهای داخلی ترانسفورماتور قدرت در شبکه 230(kV)/63(kV) با استفاده از ترانسفورماتور YNd11 مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش چهارم روش جدید پیشنهادی با دیگر روش‌های موجود در رله‌های صنعتی مقایسه شده است.

۲- روش جدید ارائه‌شده

۲-۱- شبکه عصبی GMDH

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیر صورت گرفته در زمینه شبکه‌های عصبی مصنوعی، باعث شده تا این شبکه‌ها به‌عنوان رقیبی در مقابل روش‌های سنتی محاسبات مورد توجه واقع شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی مجموعه‌ای از مشاهدات متشکل از ورودی‌ها و خروجی‌ها را که اغلب به‌صورت سری‌های زمانی هستند، انجام می‌دهند و سعی می‌کنند نحوه تبدیل این ورودی‌ها به خروجی‌های متناظر (مرحله آموزش) را تکرار کنند تا شبکه حاصل بتواند از ورودی‌های آینده برای پیش‌بینی استفاده کند. شبکه عصبی مورد استفاده در این مقاله از نوع GMDH است. اطلاعات دقیق در مورد شبکه عصبی GMDH را می‌توان در مراجع (Anastasakis & Mort, 2001; Nikolaev & Iba, 2003) یافت. GMDH یک شبکه عصبی چند جمله‌ای است که اولین بار توسط الکسی گیریگوورویچ در سال ۱۹۶۸ معرفی شد. رابطه بین ورودی و خروجی در یک شبکه GMDH را می‌توان بر اساس چند جمله‌ای کولموگوروف – گابور به‌صورت رابطه (۱) بیان کرد (Hosseini et al., 2021).

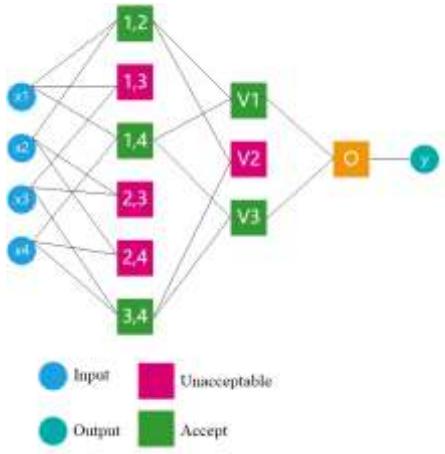
$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_i x_j + \dots \qquad (۱)$$

در این رابطه $X = (x_1, x_2, ..., x_m)$ بردار متغیرهای ورودی، $A = (a_0, a_i, a_{ij}, ...)$ بردار ضرایب و y خروجی سیستم هستند.

شکل (۱) شبکه عصبی GMDH را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، در شبکه GMDH، مجموعه‌ای از ورودی‌های اصلی وجود دارند که از طریق لایه‌های شبکه عصبی به خروجی مطلوب متصل می‌شوند. در شبکه عصبی GMDH، بهترین گره‌های لایه ورودی حفظ می‌شوند و ورودی را به لایه بعدی انتقال می‌دهند. ورودی‌های لایه ۱ با در نظر گرفتن تمام ترکیبات تقریبی خروجی بازمانده از گره‌های لایه ورودی تشکیل می‌شوند. از شکل (۱) مشاهده می‌شود که در هر لایه ترتیب تقریب چندجمله‌ای به دو مورد افزایش می‌یابد. لایه ۲ بهترین گره‌ها برای تقریب خروجی سیستم حفظ می‌شوند و ورودی‌های لایه ۳ را تشکیل می‌دهند. این روند تا زمانی که بهترین تقریب لایه فعلی پایین‌تر از بهترین تقریب لایه قبلی باشد، تکرار می‌شود.

۲-۲- الگوریتم تشخیص جریان هجومی با استفاده از شبکه عصبی GMDH

معادلات حاکم بر GMDH و نحوه عملکرد آن در بخش قبلی توضیح داده شد. با توجه به این نکته که هدف اصلی این مقاله استفاده از GMDH در حفاظت دیفرانسیل و تمایز گذاشتن بین خطا و جریان هجومی است، در این قسمت به نحوه استفاده از GMDH در حفاظت دیفرانسیل پرداخته می‌شود.



شکل (۱): لایه‌های شبکه عصبی GMDH.

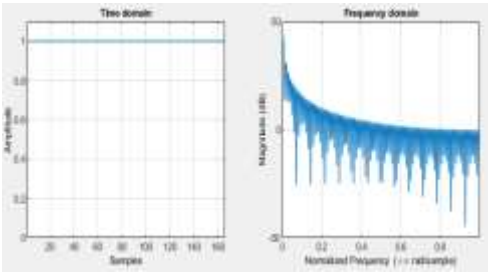
برای انجام این کار و تمایز گذاشتن بین جریان هجومی و خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت ابتدا نیاز است تا سیگنال‌های آنالوگ به‌دست آمده از خطوط انتقال انرژی به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل شوند. برای رسیدن به این هدف با استفاده از یک مبدل سیگنال آنالوگ به دیجیتال از سیگنال آنالوگ ورودی با استفاده از یک پنجره سیگنال نمونه‌برداری خواهد شد. پنجره سیگنال مورد استفاده در این مقاله از نوع مربعی است که طول آن از رابطه (۲) به دست می‌آید، به‌علاوه time domain و frequency domain این پنجره سیگنال در شکل (۲) نشان داده‌شده است.

$$window's\ length = \frac{F_s}{F_f} \qquad (۲)$$

که در آن F_s فرکانس نمونه‌برداری و F_f فرکانس پایه سیستم قدرت می‌باشد. با توجه به این نکته که فرکانس نمونه‌برداری می‌تواند بر روی عملکرد الگوریتم‌های حفاظتی تاثیر بسزایی داشته باشد (Salehimehr et al., 2021)، در این مقاله برای رسیدن به دقت و سرعت عملکردی مناسب نرخ نمونه‌برداری برابر ۱۰(kHz) درنظر گرفته شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]



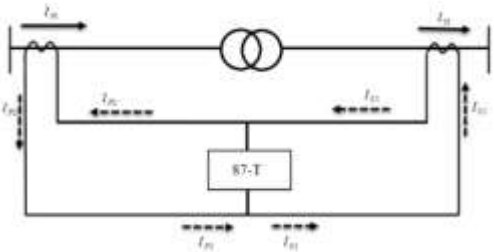
شکل (۲): time domain و frequency domain پنجره سیگنال مربعی.

اغلب روش‌های بررسی‌شده در مقدمه بعد از نمونه‌برداری از سیگنال اقدام به پردازش سیگنال با استفاده از روش‌های مختلف پردازش سیگنال می‌کنند. اما در این مقاله به دلیل افزایش سرعت تشخیص هیچ پیش‌پردازش و یا پردازشی استفاده نخواهد شد. همه روابط ارائه شده مستقیما بر روی‌داده‌های نمونه‌برداری شده اعمال خواهند شد. تمامی معادلات و نتایج ارائه شده برای فاز اول از سیستم سه فاز ارائه خواهند شد. لازم به ذکر است که نحوه عملکرد و تمامی معادلات بر روی دو فاز دیگر نیز یکسان خواهد بود.

رله دیفرانسیل یک حفاظت تک زون است. ناحیه عملکردی آن بین دو CT که اطلاعات جریان شبکه را به رله انتقال می‌دهند قرار دارد. شش جریان برای دو سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور به‌منظور آنالیز خطا وارد رله دیفرانسیل می‌شوند (Taheri, Hosseini, Salehimehr, et al.). شکل (۳) رله دیفرانسیل حفاظت ترانسفورماتور (T-۸۷) و جریان‌های عبوری از آن را نشان می‌دهد. به‌منظور بهره‌مندی از جریان‌های عبوری از هر دو سمت ترانسفورماتور، در الگوریتم حفاظتی ارائه شده با استفاده از رابطه (۳) جریان دیفرانسیل محاسبه خواهد شد.

$$I_{diff} = I_P + I_S \qquad (۳)$$

که در آن I_P و I_S جریان‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت در هر فاز هستند.



شکل (۳): حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت.

در این مقاله از ویژگی پیش‌بینی سیگنال شبکه عصبی GMDH برای تمایز گذاشتن بین خطای داخلی ترانسفورماتور قدرت و جریان هجومی استفاده شده است. بدین منظور، مقادیری که می‌بایست حین جریان هجومی و بعد از وقوع خطا دنبال و پیش‌بینی شوند را می‌توان به ترتیب به‌صورت زیر بیان کرد (Tekdemir & Alboyaci, 2016):

$$f(t) = A.\cos(2\pi f_2 t).\cos(2\pi f_1 t + \theta) \qquad (۴)$$

$$f(t) = B.e^{F.t.e^{\frac{-1}{\tau_1}}}.\cos(2\pi f_1 t + \theta) \qquad (۵)$$

در این معادلات τ ثابت زمانی، A و B دامنه سیگنال، f_1 و f_2 فرکانس سیستم AC، θ زاویه تغییر فاز و t زمان است. از معادلات بالا می‌توان استنباط نمود که پیش‌بینی نمونه جریان در شرایط نرمال و جریان هجومی با موفقیت بیشتری نسبت به لحظه وقوع خطا انجام خواهد گرفت (به دلیل حضور مؤلفه میرا شونده در لحظه بروز خطا). به دلیل اینکه در حالت عادی طبق رابطه (۶) مؤلفه DC در شکل موج وجود ندارد، لازم است که نمونه‌های واقعی را با حذف مؤلفه DC در نظر گرفت و پس از آن مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقایسه شوند. بنابراین برای جریان ورودی ارائه شده در رابطه (۶)، نمونه‌های پیش‌بینی شده به‌صورت رابطه (۷) خواهند بود.

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) \qquad (۶)$$

$$sample^*(n+1)_{actual} = sample(n+1)_{actual} - \sum_{g=0}^{N-1} sample(n-g+1)_{actual} \qquad (۷)$$

در معادلات (۶) و (۷) دامنه سیگنال، I_m، $\omega = 2\pi f$، n سیگنال نمونه‌برداری شده، N تعداد کل نمونه‌ها و g مولفه dc سیگنال است. درنهایت مقدار اختلاف بین سیگنال پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$Error(n+1) = abs(sample(n+1)_{estimated} - sample^*(n+1)_{actual}) \qquad (۸)$$

با توجه به این نکته که GMDH برای تخمین درست سیگنال در انواع مختلف جریان هجومی آموزش دیده است، در زمان بروز خطا مقدار ارور به دست آمده، افزایش خواهد یافت. می‌توان از همین نکته به‌منظور تمایز گذاشتن بین جریان هجومی و خطا استفاده کرد. براین-اساس شرط تشخیص جریان هجومی در رابطه (۹) نشان داده شده است.

$$If\ Error > k \Rightarrow \text{Fault detection} \qquad (۹)$$

در آن k مقدار آستانه است. مقدار آستانه در این مقاله برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. مقدار آستانه با استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری مختلف برای حالت‌های مختلف خطا و جریان هجومی به دست می‌آید. این روش برای به دست آوردن مقدار آستانه به‌طور گسترده در مقالات مربوط به حفاظت از سیستم‌های قدرت در سال‌های اخیر استفاده شده است (Salehimehr et al., 2021).

با توجه به موارد بیان شده، الگوریتم روش پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است. طبق این شکل مراحل تشخیص جریان هجومی را می‌توان به‌صورت زیر ارائه کرد:

۱. نمونه‌برداری از سیگنال‌های طرف اولیه و ثانویه ترانسفورماتور.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

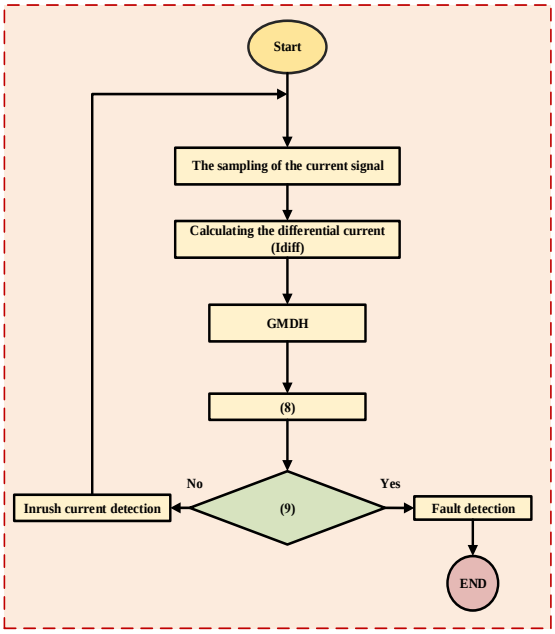
۲. محاسبه I_{diff} با استفاده از رابطه (۳).

۳. تخمین سیگنال به‌وسیله GMDH (بخش ۲-۲).

۴. محاسبه خطا با استفاده از رابطه (۸).

۵. چک کردن شرط رابطه (۹).

بعد از مرحله ۵ اگر شرط رابطه (۹) برقرار باشد، الگوریتم خطا را تشخیص داده و فرمان قطع کلید قدرت را صادر می‌کند. در مقابل اگر شرط رابطه (۹) برقرار نباشد، الگوریتم جریان هجومی را تشخیص داده و مانع از عملکرد رله دیفرانسیل خواهد شد.

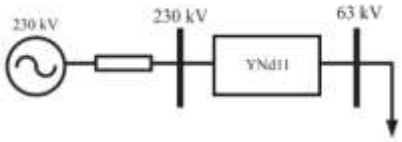


شکل (۴): الگوریتم روش پیشنهادی.

۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- شبکه موردمطالعه

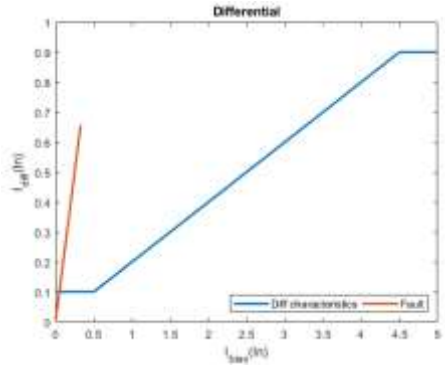
عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی یک سیستم معمول که از یک ترانسفورماتور ۲۳۰ به ۶۳ کیلوولت با گروه‌برداری Ynd11 و CTهای مربوطه تشکیل شده است، ارزیابی می‌شود. دیاگرام تک‌خطی این شبکه در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین اطلاعات این شبکه در مرجع (Davarpanah et al., 2012) موجود است. شبکه و ترانسفورماتور قدرت مورد استفاده در محیط نرم‌افزار DIgSILENT پیاده‌سازی شده و شرایط مختلف خطا و نوسان توان در آن ایجاد شده است. سپس داده‌های به‌دست آمده در نرم‌افزار DIgSILENT به محیط نرم‌افزار MATLAB انتقال داده شده و الگوریتم مربوط به تشخیص جریان هجومی در آنجا پیاده‌سازی شده است.



شکل (۵): شبکه مورد مطالعه.

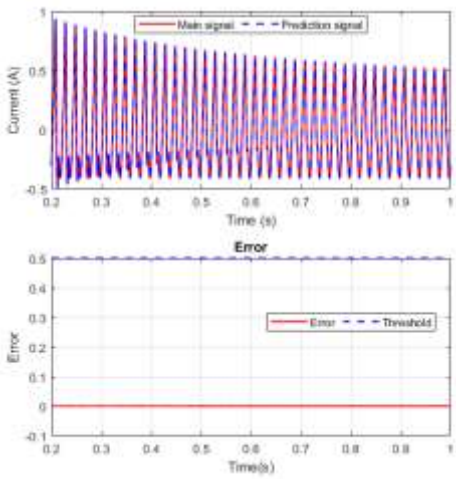
۳-۲- جریان هجومی

جریان‌های هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت در زمان کلیدزنی رخ می‌دهند. این جریان‌ها می‌توانند رله دیفرانسیل را به اشتباه وارد منطقه عملیاتی کنند. شکل (۶) نشان می‌دهد که چگونه یک جریان هجومی می‌تواند باعث ورود رله دیفرانسیل به منطقه عملیاتی شود.



شکل (۶): ورود جریان هجومی به منطقه عملیاتی رله دیفرانسیل.

برای ایجاد جریان هجومی، کلید قدرت ترانسفورماتور در زاویه‌های مختلف (θ) بسته می‌شود. این کار باعث بررسی جامع از نحوه عملکرد روش پیشنهاد شده در زمان ایجاد جریان‌های هجومی متفاوت می‌شود. شکل (۷) نحوه عملکرد این روش در زمان کلیدزنی در زاویه $\theta = 0$ را نشان می‌دهد. همچنین جدول (۲) عملکرد روش پیشنهادی به ازای حالت‌های مختلف شبکه و زوایای مختلف کلیدزنی را نشان می‌دهد.



[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

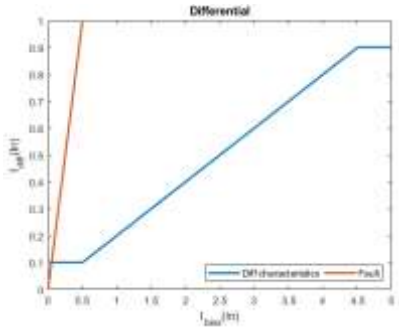
شکل (۷): عملکرد روش پیشنهادی در زمان رخداد جریان هجومی با زاویه کلیدزنی صفر.

جدول (۲): عملکرد روش پیشنهادی در زمان ایجاد جریان‌های هجومی مختلف.

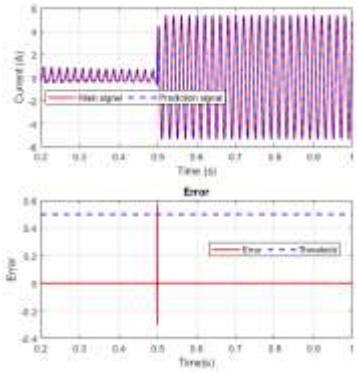
θ	فاز	زمان قفل‌کردن رله (ms)	
		شبکه بدون بار	شبکه با بار کامل
۰	A	۸	۹
	B	۹	۸
	C	۸	۸
۸۰	A	۸	۸
	B	۹	۸
	C	۸	۹
۱۲۰	A	۸	۸
	B	۸	۹
	C	۹	۸

۳-۳- خطای داخلی

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی برای خطاهای داخلی مختلف با شبیه‌سازی چندین نوع خطا در شبکه شکل (۵) مورد ارزیابی قرارگرفته است. شکل (۸) تاثیر خطا بر روی ناحیه عملیاتی رله دیفرانسیل را نشان می‌دهد و شکل (۹) عملکرد روش پیشنهادی را در تشخیص خطای سه فاز همزمان با جریان هجومی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از رخداد خطا، شبکه عصبی GMDH نمی‌تواند سیگنال را به درستی پیش‌بینی کند، همین امر منجر به ایجاد یک خطای بزرگ در پیش‌بینی شده و شرط رابطه (۹) را نقض می‌کند.



شکل (۸): تاثیر خطا بر روی منطقه عملیاتی رله دیفرانسیل.



شکل (۹): عملکرد روش پیشنهادی تحت یک خطای سه فاز رخداده همزمان با جریان هجومی.

جدول (۳) عملکرد روش پیشنهادی را در شرایط مختلف کلیدزنی و انواع خطاهای داخلی نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول مشخص است الگوریتم پیشنهادی در شرایط مختلف جریان هجومی و خطاهای داخلی به‌خوبی عمل می‌کند.

جدول (۳): عملکرد روش پیشنهادی در زمان ایجاد جریان‌های هجومی و خطاهای مختلف.

θ	فاز	زمان تشخیص خطا (ms)							
		شبکه بدون بار				شبکه با بار کامل			
		abc	abg	ab	ag	abc	abg	ab	ag
۰	A	۸	۸	۹	۸	۸	۸	۸	۸
	B	۸	۹	۸	۸	۹	۸	۸	۸
	C	۹	۸	۸	۹	۸	۸	۸	۹
۸۰	A	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
	B	۹	۸	۸	۸	۹	۸	۸	۸
	C	۸	۸	۸	۹	۸	۸	۸	۹
۱۲۰	A	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
	B	۸	۹	۸	۸	۸	۹	۸	۸
	C	۸	۹	۹	۸	۸	۸	۹	۸

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب منحنی‌های زمان پاسخگویی روش ارائه شده را تحت انواع مختلف خطا در شبکه بدون بار و شبکه با بارگذاری کامل را نشان می‌دهند. همان‌طور که از این دو شکل مشخص است، میانگین زمان پاسخ روش ارائه شده در شبکه بدون بار و شبکه با بار کامل به ترتیب ۸/۲۵ و ۸/۱۶۶ میلی‌ثانیه است. بر اساس این نتایج روش ارائه شده به عنوان یک روش تشخیص سریع خطا طبقه‌بندی می‌شود. علاوه بر این با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) و شکل‌های (۱۰) و (۱۱) روش پیشنهادی می‌تواند بدرستی طیف گسترده‌ای از خطاها را تشخیص دهد. همچنین حالت بهره‌برداری شبکه تاثیر قابل توجهی بر زمان پاسخگویی روش پیشنهادی ندارد.

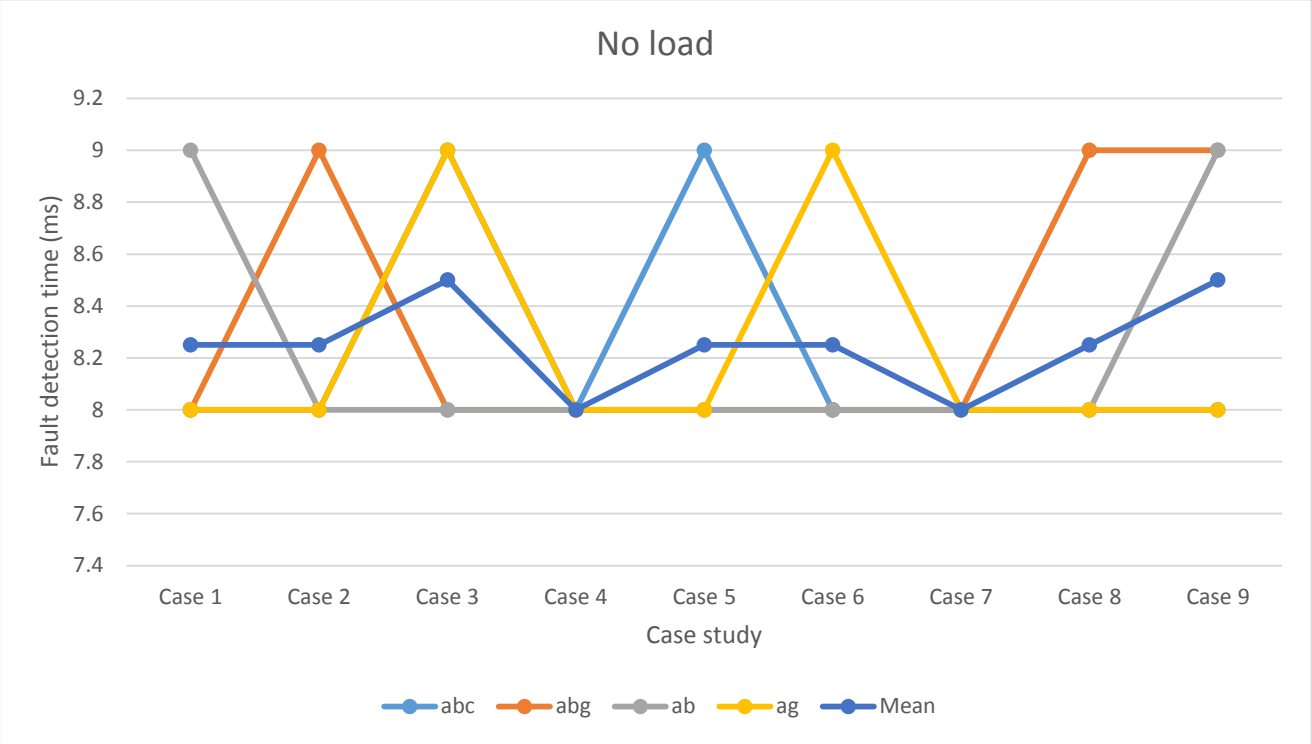
۴-۳- سیگنال نویزدار

در مهندسی برق و پردازش سیگنال، نویز گوسی سفید سیگنالی با توزیع و شدت یکنواخت در تمام فرکانس‌ها است. این نویز سفید نامیده می‌شود زیرا مانند نور سفید، چگالی طیفی توان تقریبا ثابتی در

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

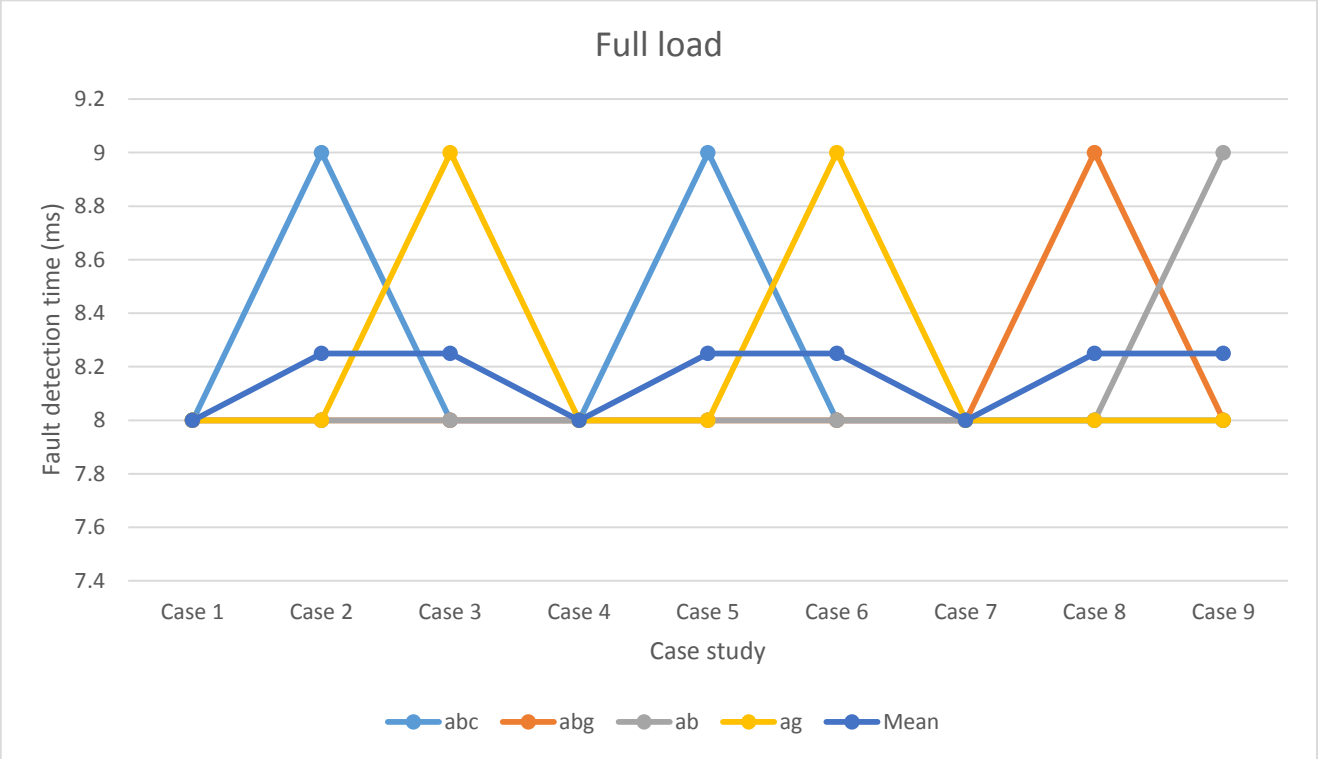
همه فرکانس‌ها دارد. تابع خودهمبستگی نویز سفید به شکل تابع دلتای دیراک است. نویز سفید یک فرآیند ذاتا تصادفی است و بنابراین به مدل آماری سیگنال‌ها و منابع سیگنال اشاره دارد تا به هر سیگنال خاصی. نویز سفید همچنین به یک سیگنال زمانی گسسته اشاره دارد که نمونه‌های آن دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی ناهمبسته با میانگین صفر و واریانس محدود هستند. بااین‌حال، بسته به کاربرد، ممکن است لازم باشد نمونه‌ها مستقل یا با توزیع احتمال مشابه در نظر گرفته شوند.



شکل (۱۰): منحنی عملکرد روش پیشنهادی تحت خطاهای شبیه‌سازی شده در شبکه بدون بار.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

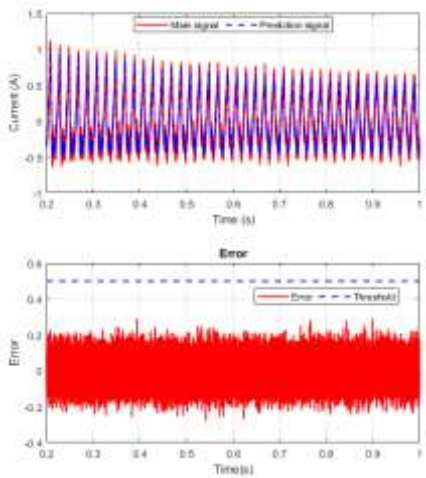
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]



شکل (۱۱): منحنی عملکرد روش پیشنهادی تحت خطاهای شبیه‌سازی شده در شبکه با بار کامل.

نویز گوسی سفید می‌تواند تاثیرات نامطلوبی بر کیفیت سیگنال داشته باشد. این اثرات نامطلوب می‌تواند باعث اخلال در عملکرد الگوریتم‌های تشخیص جریان هجومی شوند. بنابراین در این بخش از ارزیابی روش پیشنهادی، عملکرد روش پیشنهادی در حضور نویز گوسی سفید نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱۲) عملکرد روش پیشنهادی را در حضور نویز گوسی سفید نشان می‌دهد (نسبت سیگنال به نویز[۷] ۲۰ دسی‌بل[۸] در نظر گرفته‌شده است). همان‌طور که از این شکل مشخص است، در سراسر جریان هجومی خطای پیش‌بینی الگوریتم ارائه شده افزایش یافته است اما این افزایش در حضور نویز شدید از مقدار آستانه فراتر نرفته و شرط رابطه (۹) را نقض نمی‌کند.

به‌منظور ارائه یک دید بهتر از رفتار روش پیشنهادی تحت نویز، ویژگی‌های عملکرد آن تحت انواع نویزها در طول یک خطای سه فاز در شبکه بدون بار و با بار کامل در جدول (۴) ارائه شده است.



شکل (۱۲): عملکرد روش پیشنهادی تحت نویز گوسی سفید.

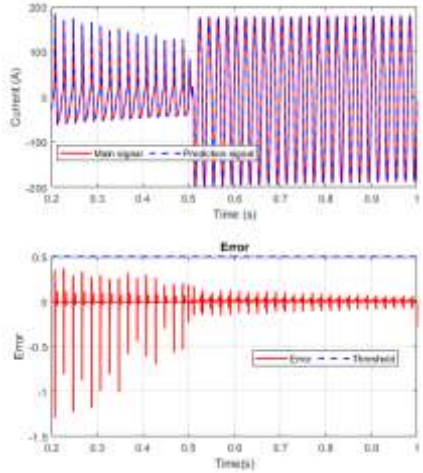
جدول (۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت انواع نویز

θ	نویز	عملکرد روش پیشنهادی	
		شبکه بدون بار	شبکه با بار کامل
0	SNR =20	درست	درست
	SNR = 30	درست	درست
	SNR = 40	درست	درست
80	SNR = 20	درست	درست
	SNR = 30	درست	درست
	SNR = 40	درست	درست
120	SNR = 20	درست	درست
	SNR = 30	درست	درست
	SNR = 40	درست	درست

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

۳-۵- اشباع CT

بروز اشباع CT می‌تواند به شدت اندوکتانس مغناطیسی را کاهش دهد و منجر به افزایش جریان مغناطیس‌کنندگی در هسته ترانسفورماتور شود. از آنجایی که جریان ثانویه ترانسفورماتور از اختلاف بین جریان اولیه و جریان مغناطیس‌کنندگی به دست می‌آید، افزایش شدید جریان مغناطیس‌کنندگی جریان ثانویه را کاهش می‌دهد. این مورد می‌تواند بر اندازه‌گیری جریان سیستم و در نتیجه عملکرد الگوریتم‌های تشخیص جریان هجومی تاثیر بگذارد. بنابراین باید عملکرد روش ارائه شده در طول اشباع CT نیز مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۱۳) عملکرد الگوریتم پیشنهادی را در طول اشباع CT نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): عملکرد روش پیشنهادی در زمان اشباع CT.

۳-۶- اثر شار باقی‌مانده در هسته بر عملکرد روش پیشنهادی

برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد الگوریتم تشخیص جریان هجومی پیشنهادی باید عاملی در نظر گرفته شود که ممکن است بر عملکرد آن در شرایط واقعی تاثیر بگذارد. یکی از مهم‌ترین این عوامل اندازه شار باقیمانده در هسته ترانسفورماتور است. برای بررسی این موضوع ترانسفورماتور قدرت با شارهای باقیمانده مختلف سوئیچ شده است. جدول (۵) عملکرد روش پیشنهادی را پس از کلیدزنی ترانسفورماتور و با شارهای باقیمانده مختلف در هسته نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد شار باقیمانده در هسته تاثیری بر عملکرد روش پیشنهادی ندارد.

جدول (۵): عملکرد روش پیشنهادی پس از کلیدزنی ترانسفورماتور با شارهای باقی‌مانده در هسته

ردیف	شار باقی‌مانده در هسته (%)	عملکرد روش ارائه‌شده
۱	۰	درست
۲	۶۰	درست
۳	۸۰	درست

۳-۷- تاثیر امپدانس خطا بر روش پیشنهادی

عملکرد الگوریتم‌های تشخیص جریان هجومی و خطای داخلی نباید تحت تاثیر تغییرات امپدانس خطا قرار بگیرند. بنابراین تاثیر امپدانس خطا بر عملکرد روش پیشنهادی در این قسمت بررسی شده است. جدول (۶) عملکرد روش پیشنهادی را در برابر امپدانس‌های مختلف خطا نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول مشخص است، افزایش امپدانس خطا تاثیری بر عملکرد روش پیشنهادی نداشته است. به عبارت دیگر روش ارائه شده می‌تواند سطح عملکرد ثابتی را تحت شرایط امپدانس مختلف خطا داشته باشد.

جدول (۶): عملکرد روش پیشنهادی در امپدانس‌های خطای مختلف

ردیف	امپدانس خطا(Ω)	عملکرد روش ارائه‌شده
۱	۰	درست
۲	۲۰	درست
۳	۴۰	درست
۴	۶۰	درست
۵	۸۰	درست
۶	۱۰۰	درست

۴- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های صنعتی مرسوم

در جدول (۷) نتایج به دست آمده از آزمایش روش پیشنهادی و روش‌های مرسوم تشخیص جریان هجومی صنعتی (هامونیک دوم و عبور از صفر) تحت شرایط مختلف خطای داخلی و جریان هجومی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش تشخیص جریان هجومی مبتنی بر هارمونیک دوم نمی‌تواند خطاهای با هارمونیک دوم بالا را تشخیص دهد. همچنین این روش با ترانسفورماتورهای جدید که هارمونیک دوم پایین در هنگام کلیدزنی تولید می‌کنند سازگار نیست. روش عبور از صفر که توسط سازندگان رله برای رفع مشکلات روش هارمونی دوم ایجاد شده است، در طول اشباع CT دچار اختلال می‌شود. این در صورتی است که روش پیشنهادی در مقاله حاضر توانسته است سطح بالایی از عملکرد را تحت شرایط مختلف ارائه دهد.

جدول (۷): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های معمول صنعتی

روش	جریان هجومی	خطای سه فاز	خطا با هارمونیک دوم بالا	اشباع CT	ترانسفورماتورهای جدید
هارمونیک دوم	✓	✓	×	✓	×
گذر از صفر	✓	✓	✓	×	✓
روش ارائه‌شده	✓	✓	✓	✓	✓

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

۵- نتیجه‌گیری

ترانسفورماتورهای قدرت یکی از اجزای ضروری سیستم‌های قدرت هستند که بدون آن‌ها انتقال نیرو عملا غیرممکن است. با توجه به اهمیت ترانسفورماتورهای قدرت، سیستم‌های حفاظتی آن‌ها باید بسیار سریع و بسیار دقیق باشند. رله‌های دیفرانسیل امپدانس پایین به‌طور گسترده‌ای برای محافظت از ترانسفورماتورهای قدرت استفاده می‌شوند. این رله‌ها علی‌رغم ویژگی‌های بسیار خوبشان، تحت جریان‌های هجومی تولیدشده توسط کلیدزنی ترانسفورماتور، مستعد اشتباه هستند و در مواقعی که نیازی نیست، فرمان قطع را صادر می‌کنند. این مقاله یک روش جدید مبتنی بر شبکه عصبی GMDH برای تشخیص جریان‌های هجومی ارائه می‌کند. روش ارائه شده تحت حالت‌های مختلف عملیات شبکه، انواع خطا و شرایط نویز تست شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از روش‌های تشخیص جریان هجومی صنعتی معمولی (هارمونیک دوم و گذر از صفر) تحت شرایط عملیاتی متنوعی، بهتر عمل می‌کند.

مراجع

Abniki, H., Monsef, H., Khajavi, P., & Dashti, H. (2010). A novel inductance-based technique for discrimination of internal faults from magnetizing inrush currents in power transformers. 2010 Modern Electric Power Systems ,

Anastasakis, L., & Mort, N. (2001). The development of self-organization techniques in modelling: a review of the group method of data handling (GMDH). RESEARCH REPORT-UNIVERSITY OF SHEFFIELD DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL AND SYSTEMS ENGINEERING .

Bainy, R. G., & Silva, K. M. (2020). Enhanced generalized alpha plane for numerical differential protection applications. IEEE transactions on power delivery, 36(2), 587-597 .

Baoming, G., de Almeida, A. T., Qionglin, Z., & Xiangheng, W. (2005). An equivalent instantaneous inductance-based technique for discrimination between inrush current and internal faults in power transformers. IEEE transactions on power delivery, 20(4), 2473-2482 .

Barbosa, D., Netto, U. C., Coury, D. V., & Oleskovicz, M. (2011). Power transformer differential protection based on Clarke's transform and fuzzy systems. IEEE transactions on power delivery, 26(2), 1212-1220 .

Behvandi, A., Seifossadat, S. G., & Saffarian, A. (2020). A new method for discrimination of internal fault from other transient states in power transformer using Clarke’s transform and modified hyperbolic S-transform. Electric Power Systems Research, 178, 106023 .

Bejmert, D., Kereit, M., Mieske, F., Rebizant, W., Solak, K., & Wiszniewski, A. (2020). Power transformer differential protection with integral approach. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 118, 105859 .

Bejmert, D., Rebizant, W., & Schiel, L. (2014). Transformer differential protection with fuzzy logic based inrush stabilization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 63, 51-63 .

Bi, D., Li, S., Wang, X., & Wang, W. (2008). A novel double-side average equivalent instantaneous inductance in nonsaturation zone based transformer protection. 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems ,

Bouderbala, R., Bentarzi, H., & Ouadi, A. (2011). Digital differential relay reliability enhancement of power transformer. International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, 5(3), 263-270 .

Davarpanah, M., Sanaye-Pasand, M., & Iravani, R. (2012). Performance enhancement of the transformer restricted earth fault relay. IEEE transactions on power delivery, 28(1), 467-474 .

Geethanjali, M., Slochanal, S. M. R., & Bhavani, R. (2008). PSO trained ANN-based differential protection scheme for power transformers. Neurocomputing, 71(4-6), 904-918 .

Gondane, P. R., Sheikh, R. M., Chawre, K. A., Wasnik, V. V., Badar, A., & Hasan, M. (2018). Inrush current detection using wavelet transform and artificial neural network. 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) ,

Guzman, A., Zocholl, S., Benmouyal, G., Altuve, H.J., 2002. A current-based solution for transformer differential protection. II. Relay description and evaluation. IEEE Trans. Power Deliv. 17 (4), 886–893. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803736.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

Pihler, J., Grcar, B., & Dolinar, D. (1997). Improved operation of power transformer protection using artificial neural network. IEEE transactions on power delivery, 12(3), 1128-1136 .

Rad, I. S., Alinezhad, M., Naghibi, S. E., & Kamarposhti, M. A. (2011). Detection of internal fault in differential transformer protection based on fuzzy method. International Journal of Physical Sciences, 6(26), 6150-6158 .

Raju, K. (2012). Ramamohan Reddy, and M. Tech: Differential Relay Reliability Implement Enhancement of Power Transformer. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), 2, 3612-3618 .

Salehimehr, S., Taheri, B., & Faghihlou, M. (2021). Detection of power swing and blocking the distance relay using the variance calculation of the current sampled data. Electrical Engineering, 1-15 .

Sanaye-Pasand, M., Zangiabadi, M., & Fereidunian, A. (2003). An extended magnetizing inrush restraint method applied to digital differential relays for transformer protection. 2003 IEEE power engineering society general meeting (IEEE Cat. No. 03CH37491) ,

Shin, M.-C., Park, C.-W., & Kim, J.-H. (2003). Fuzzy logic-based relaying for large power transformer protection. IEEE transactions on power delivery, 18(3), 718-724 .

Taheri, B., Hosseini, S. A., & Salehimehr, S. An Energy Variation-Based Method for Discrimination Between the Internal Fault and Inrush Current in Power Transformers. 2020 14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS) ,

Taheri, B., Hosseini, S. A., Salehimehr, S., & Razavi, F. A New Method for the End-To-End Testing of Differential Relays. 2020 14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS) ,

Taheri, B., & Sedighizadeh, M. (2021). A moving window average method for internal fault detection of power transformers. Cleaner Engineering and Technology, 4, 100195 .

He, B., Zhang, X., & Bo, Z. Q. (2006). A new method to identify inrush current based on error estimation. IEEE transactions on power delivery, 21(3), 1163-1168 .

Hosseini, S. A., Taheri, B., Abyaneh, H. A., & Razavi, F. (2021). Comprehensive power swing detection by current signal modeling and prediction using the GMDH method. Protection and Control of Modern Power Systems, 6(1), 1-11 .

Hunt, R., Schaefer, J., & Bentert, B. (2008). Practical experience in setting transformer differential inrush restraint. 2008 61st Annual conference for protective relay engineers ,

Kolla, S. (1989). Application of block pulse functions for digital protection of power transformers. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 31(2), 193-196 .

Mao, P. L., & Aggarwal, R. K. (2001). A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network. IEEE transactions on power delivery, 16(4), 654-660 .

Medeiros, R., Costa, F., & Silva, K. (2015). Power transformer differential protection using the boundary discrete wavelet transform. IEEE transactions on power delivery, 31(5), 2083-2095 .

Nikolaev, N. Y., & Iba, H. (2003). Polynomial harmonic GMDH learning networks for time series modeling. Neural Networks, 16(10), 1527-1540 .

Oliveira, M., & Bretas, A. (2009). Application of discrete wavelet transform for differential protection of power transformers. 2009 IEEE Bucharest PowerTech ,

Ozgonenel, O., & Karagol, S. (2014). Transformer differential protection using wavelet transform. Electric Power Systems Research, 114, 60-67 .

Patel, D., Chothani, N., & Mistry, K. (2018). Discrimination of inrush, internal, and external fault in power transformer using phasor angle comparison and biased differential principle. Electric Power Components and Systems, 46(7), 788-801 .

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]

Tekdemir, I. G., & Alboyaci, B. (2016). A novel approach for improvement of power swing blocking and deblocking functions in distance relays. IEEE transactions on power delivery, 32(4), 1986-1994 .

Tripathy, M. (2010). Power transformer differential protection using neural network principal component analysis and radial basis function neural network. Simulation Modelling Practice and Theory, 18(5), 600-611 .

Tripathy, M., Maheshwari, R. P., & Verma, H. (2009). Power transformer differential protection based on optimal probabilistic neural network. IEEE transactions on power delivery, 25(1), 102-112 .

Velásquez, R. M. A., & Lara, J. V. M. (2020). Root cause analysis improved with machine learning for failure analysis in power transformers. Engineering Failure Analysis, 115, 104684 .

Weng, H., Wang, S., Lin, X., Li, Z., & Huang, J. (2019). A novel criterion applicable to transformer differential protection based on waveform sinusoidal similarity identification. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 105, 305-314 .

Wiszniewski, A., & Kasztenny, B. (1995). A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzy logic. IEEE transactions on power delivery, 10(4), 1786-1792 .

Zhalefar, F., & Sanaye-Pasand, M. (2010). A new fuzzy-logic-based extended blocking scheme for differential protection of power transformers. Electric Power Components and Systems, 38(6), 675-694 .

Ziegler, G. (2012). Numerical differential protection: principles and applications. John Wiley & Sons .

زیرنویس‌ها

1. Inrush current.
2. Current transformer (CT).
3. Artificial neutral network (ANN).
4. Fuzzy logic.
5. Support vector machine (SVM).
6. Probabilistic neural network (PNN).
7. Signal-to-noise ratio (SNR).
8. Decibel (dB).

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.1.10.2]